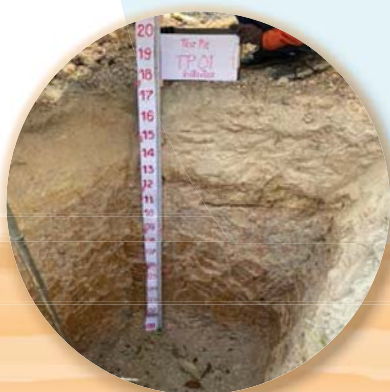
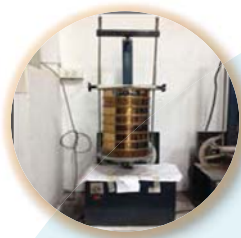
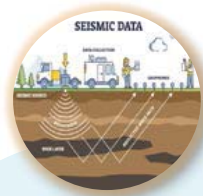




คู่มือสำรวจและทดสอบ

ทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา
ที่เกี่ยวข้องสำหรับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ
ประเภทระบบกระจายน้ำ



กองพัฒนาแหล่งน้ำ 1
กรมทรัพยากรน้ำ

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

คำนำ

กรมทรัพยากรน้ำมีภารกิจเกี่ยวกับการพัฒนา บริหารจัดการ บำรุงรักษา พื้นฟูและอนุรักษ์ ทรัพยากรน้ำสาธารณะ รวมถึงการจัดสรรน้ำ เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนในแหล่งน้ำเดิม ตอบสนอง ความต้องการใช้น้ำในพื้นที่เกษตรน้ำฝน เพื่อให้การปฏิบัติราชการเกิดผลสัมฤทธิ์ เป็นไปตามเป้าหมาย ตามแผนปฏิบัติการของกรมทรัพยากรน้ำ กองพัฒนาแหล่งน้ำ 1 กรมทรัพยากรน้ำ จึงได้แต่งตั้ง คณะทำงานเพื่อจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา ที่เกี่ยวข้อง สำหรับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ พร้อมกำหนดหลักเกณฑ์ ขั้นตอนการปฏิบัติงาน เพื่อใช้เป็นคู่มือ มาตรฐานการปฏิบัติงานให้สอดคล้องกับหลักวิชาการ สำหรับให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในส่วนกลางและ ส่วนภูมิภาค คือ สำนักงานทรัพยากรน้ำที่ 1 – 11 มีแนวทางในการปฏิบัติงานให้เป็นไปในทิศทาง เดียวกัน

คณะทำงานฯ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าคู่มือฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อเจ้าหน้าที่กรมทรัพยากรน้ำ และผู้ที่สนใจนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานสำรวจและทดสอบทางด้าน ธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องสำหรับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ประเภทระบบ กระจายน้ำ เพื่อให้งานบรรลุตามเป้าหมายต่อไป

คณะทำงานจัดทำคู่มือฯ

กองพัฒนาแหล่งน้ำ 1

สารบัญ

หน้า

คำนำ.....	ก
สารบัญ	ข
สารบัญรูป.....	จ
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตคู่มือ.....	1
1.4 การนำไปใช้ประโยชน์	1
บทที่ 2 โครงการพัฒนาแหล่งน้ำประเภทระบบกระจายน้ำ	3
2.1 คลองส่งน้ำ	3
2.2 ท่อส่งน้ำ	5
2.3 ระบบสูบน้ำ	6
บทที่ 3 การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา.....	7
3.1 การสำรวจพื้นผิว (Surface investigation).....	8
3.1.1 การสำรวจธรณีวิทยา.....	8
3.1.2 การสำรวจแหล่งวัสดุก่อสร้าง.....	10
1) แหล่งบ่อยืมดิน	13
2) แหล่งกรวดและทราย.....	13
3) แหล่งหิน.....	14
3.2 การสำรวจใต้พื้นผิว (Subsurface investigation)	17
3.2.1 การสำรวจธรณีฟิสิกส์ (Geophysical exploration).....	17
1) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey).....	17
2) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน (Seismic survey).....	26
3) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึก (Ground Penetration Radar, GPR).....	32
3.2.2 การสำรวจธรณีวิทยาและปฐพีกลศาสตร์ใต้ผิวดิน (Subsurface geological exploration)....	34
1) การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน (Hand auger)	34
2) การเจาะดินแบบฉีดล้าง (Wash boring).....	37
3) การขุดบ่อทดสอบ (Test pit)	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 การเก็บตัวอย่างดิน (Soil sampling).....	40
1) การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sampling).....	40
2) การเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนคงสภาพ (Disturbed sampling)	41
บทที่ 4 การทดสอบในภาคสนาม	42
4.1 การจำแนกดินทางวิศวกรรม (Soil classification).....	43
4.1.1 การจำแนกดินในภาคสนาม	43
4.1.2 การจำแนกดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	45
4.2 การตอกทดสอบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT).....	49
4.3 การทดสอบอัตราการรั่วซึม (Permeability test).....	61
4.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน (Plate bearing test)	69
4.5 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Sand cone method).....	74
บทที่ 5 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	86
5.1 การทดสอบหาการกระจายขนาดผลของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน (Sieve analysis).....	87
5.2 การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis)	92
5.3 การทดสอบหาขีดจำกัดแอตเทอร์เบอร์ก (Atterberg's limits).....	96
5.4 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil solid).....	105
5.5 การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density test)	109
5.6 การทดสอบความสึกกร่อน (Los Angeles Abrasion test)	116
5.7 การทดสอบความคงทน (Soundness test).....	119
5.8 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test).....	123
5.9 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test)	129
5.10 การทดสอบการบดอัด (Compaction test).....	135
5.11 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability test).....	141
บทที่ 6 การรายงานผลการสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา	146
6.1 บทนำ	146
6.2 ลักษณะทั่วไปและธรณีวิทยาฐานราก.....	146
6.3 การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา	147
6.4 การทดสอบทางวิศวกรรมธรณีวิทยา.....	147
6.5 ผลการสำรวจและทดสอบ.....	148
6.6 สรุปผล ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ.....	148

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม..... ญ

รายชื่อคณะทำงาน..... ฒ

ภาคผนวก แบบบันทึกข้อมูล

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1	คลองดิน.....	4
รูปที่ 2	คลองตาดคอนกรีต.....	4
รูปที่ 3	ท่อส่งน้ำ.....	5
รูปที่ 4	ระบบสูบน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	6
รูปที่ 5	ภาพตัดขวางแสดงผลการเอียงเทของชั้นหินต่อการคำนวณปริมาณสำรองของหิน	11
รูปที่ 6	การประเมินปริมาณสำรองของหินที่ชั้นหินวางตัวเอียงเทออกจากเขาและเอียงเทเข้าหาเขา....	12
รูปที่ 7	หินใหญ่.....	16
รูปที่ 8	เครื่องมือ Geomative และอุปกรณ์สำรวจ.....	19
รูปที่ 9	การจัดวางขั้วไฟฟ้าและการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 2 มิติ.....	20
รูปที่ 10	การจัดวางขั้วไฟฟ้าและการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 3 มิติ	20
รูปที่ 11	การติดตั้งเครื่องมือสำรวจรูปแบบ 2 มิติ โดยวางเครื่อง GD-10 Mainframe ไว้ด้านใดด้านหนึ่งของแนวสำรวจ.....	22
รูปที่ 12	การติดตั้งเครื่องมือสำรวจรูปแบบ 3 มิติ	22
รูปที่ 13	ภาพตัดขวางของสภาพใต้ผิวดิน และภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งวัดค่า	23
รูปที่ 14	ภาพตัดขวางเทียบของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏที่วัดได้จากภาคสนาม	24
รูปที่ 15	ผลการสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 3 มิติ.....	24
รูปที่ 16	ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินอัคนี และหินแปร	25
รูปที่ 17	ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินตะกอน.....	26
รูปที่ 18	ภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบของสภาพใต้ผิวดิน แสดงรายละเอียดการ สำรวจและการแปลความหมาย.....	26
รูปที่ 19	การเคลื่อนที่ของคลื่นไหวสะเทือน	27
รูปที่ 20	วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน	28
รูปที่ 21	วิธีการสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ.....	30
รูปที่ 22	การประมวลผลการสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ	31
รูปที่ 23	การสำรวจและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึก.....	32
รูปที่ 24	วิธีการสำรวจและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึกแบบอยู่กับที่และแบบ เคลื่อนที่	33
รูปที่ 25	อุปกรณ์สำหรับเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน	35
รูปที่ 26	การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน.....	36
รูปที่ 27	กระบวนการเจาะแบบฉีดล้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะ	38

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 28 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพโดยใช้กระบอกบาง	41
รูปที่ 29 การเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพโดยใช้กระบอกผ่า	41
รูปที่ 30 สมุดเทียบสีดิน	44
รูปที่ 31 เครื่องมือและอุปกรณ์การตอกทดสอบมาตรฐาน	50
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_C , N_q และ ϕ	55
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_C , N_q , N_γ , ϕ และ ค่า SPT-N value	55
รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์ยึดเกาะ (α) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ของดินเหนียว	58
รูปที่ 35 การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินที่ระดับก้นหลุม (Open end test)	63
รูปที่ 36 การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินแบบ Singer packer	65
รูปที่ 37 การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินแบบ Double packer	66
รูปที่ 38 รูปแบบการไหลของน้ำ (Lugeon pattern)	67
รูปที่ 39 ตัวอย่างการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบบนแผ่นเหล็กทดสอบโดยแม่แรงไฮดรอลิก ร่วมกับน้ำหนักบรรทุกวางอยู่บนแคร่บรรทุกน้ำหนัก	70
รูปที่ 40 ตัวอย่างการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบบนแผ่นเหล็กทดสอบโดยแม่แรงไฮดรอลิก ร่วมกับเสาเข็มสมอหรือแท่งเหล็กสมอ	70
รูปที่ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทดสอบกับค่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็ก ทดสอบ	73
รูปที่ 42 ชุดเครื่องมือทดสอบความหนาแน่นในสนามโดยใช้ทราย	75
รูปที่ 43 ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐานและเครื่องสั่นกลไฟฟ้า	89
รูปที่ 44 กราฟแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน (Sieve analysis) และวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis)	91
รูปที่ 45 การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์	93
รูปที่ 46 Phase diagram แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้น กับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดินเม็ดละเอียด	97
รูปที่ 47 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขีดจำกัดความเหลว	97
รูปที่ 48 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขีดจำกัดหดตัว	98
รูปที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการเคาะ (Number of blows) และปริมาณน้ำ ในดิน (Water content) จากการทดสอบขีดจำกัดความเหลวของดิน	100
รูปที่ 50 ตัวอย่างดินที่คลั่งจากการทดสอบหาขีดจำกัดพลาสติก	101

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 51	กราฟแสดงสภาพพลาสติกของดินเม็ดละเอียด.....	104
รูปที่ 52	โต๊ะสั่น พร้อมอุปกรณ์สำหรับทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์	110
รูปที่ 53	เครื่อง Los Angeles Abrasion สำหรับทดสอบความสึกกร่อนของวัสดุ.....	116
รูปที่ 54	เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test)	124
รูปที่ 55	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (τ) และการเคลื่อนตัวในแนวราบ	126
รูปที่ 56	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (τ) และหน่วยแรงกด (σ).....	127
รูปที่ 57	เครื่องทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Compression machine)	130
รูปที่ 58	กระบอกกลวงและค้อน สำหรับทดสอบการบดอัด.....	136
รูปที่ 59	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดิน.....	140
รูปที่ 60	การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบวิธีระดับน้ำคงที่	143
รูปที่ 61	การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน	144

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ชนิดดินที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุดินถม	13
ตารางที่ 2 ชนิดดินที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุหินถม	15
ตารางที่ 3 ขนาดคละของวัสดุหินใหญ่	16
ตารางที่ 4 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของดินในภาคสนาม	42
ตารางที่ 5 การจำแนกประเภทดินเบื้องต้นด้วยตาเปล่าและการสัมผัส	44
ตารางที่ 6 ขนาดของเม็ดดินแต่ละชนิด ตามมาตรฐาน ASTM 422-63	44
ตารางที่ 7 ตัวอย่างระหว่างความหมายของสีกับส่วนผสมในดิน	45
ตารางที่ 8 ตัวอย่างสิ่งที่ปะปนมากับดิน	45
ตารางที่ 9 สัญลักษณ์ในการจำแนกประเภทของดิน ด้วยระบบยูนิไฟด์ (USCS)	46
ตารางที่ 10 การจำแนกประเภทของดินเม็ดหยาบ ด้วยระบบยูนิไฟด์ (USCS)	47
ตารางที่ 11 การจำแนกประเภทของดินเม็ดละเอียด ด้วยระบบยูนิไฟด์ (USCS)	48
ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ค่ากำลังรับแรงเฉือน แบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)	52
ตารางที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)	52
ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) และความหนาแน่นของดินทราย (Density)	53
ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) และความหนาแน่นของดินทราย (Density)	53
ตารางที่ 16 ค่าของสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (K_0) ขึ้นอยู่กับวิธีการก่อสร้าง	59
ตารางที่ 17 ค่าของมุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน (δ) ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิว	59
ตารางที่ 18 ตัวอย่างการคำนวณความดันที่ใช้ในการทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหิน	64
ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินหรือชั้นหิน และคุณสมบัติ ของฐานราก	68
ตารางที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรของน้ำต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก	76
ตารางที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดวัสดุ ปริมาตรหลุม และน้ำหนักที่ใช้หาความชื้น	79
ตารางที่ 22 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ	86
ตารางที่ 23 ขนาดตะแกรงร่อน	88
ตารางที่ 24 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินชนิดต่าง ๆ	105
ตารางที่ 25 ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ และค่าตัวแปรปรับแก้ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 26	ขนาดและปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์	112
ตารางที่ 27	จำนวนลูกเหล็กทรงกลมที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น.....	117
ตารางที่ 28	น้ำหนักของมวลรวม และจำนวนรอบในการทดสอบ	118
ตารางที่ 29	ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างวัสดุหยาบ (ASTM C88)	120
ตารางที่ 30	ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างวัสดุละเอียด (ASTM C88).....	120
ตารางที่ 31	ตัวอย่างการคำนวณทดสอบวัสดุหยาบ (Coarse aggregate).....	122
ตารางที่ 32	ตัวอย่างการคำนวณทดสอบวัสดุละเอียด (Fine aggregate).....	122
ตารางที่ 33	ขนาดตัวอย่างทดสอบมาตรฐาน.....	131
ตารางที่ 34	อัตราการกดตัวอย่าง.....	132
ตารางที่ 35	ค่าความไวของดิน (Sensitivity).....	134
ตารางที่ 36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u), ค่ากำลังรับแรงเฉือน แบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)	134
ตารางที่ 37	ขนาดของโมลและตะแกรง สำหรับทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน	137
ตารางที่ 38	ขนาดของโมลและตะแกรง สำหรับทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	139
ตารางที่ 39	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$ และอุณหภูมิ	145

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ตามคำสั่งกรมทรัพยากรน้ำ ที่ 539/2565 ลงวันที่ 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 ได้กำหนดโครงสร้างการแบ่งงานและอำนาจหน้าที่ความรับผิดชอบของหน่วยงานภายในกรมทรัพยากรน้ำ ตามกฎกระทรวงแบ่งส่วนราชการกรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2565 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา 139 ตอนที่ 61 ก ลงวันที่ 3 ตุลาคม 2565 ได้เพิ่มภารกิจส่วนวิศวกรรมธรณีในกองพัฒนาแหล่งน้ำ 1 เพื่อให้การปฏิบัติราชการเกิดผลสัมฤทธิ์เป็นไปตามเป้าหมายและแผนปฏิบัติราชการของกรมทรัพยากรน้ำ ผู้อำนวยการกองพัฒนาแหล่งน้ำ 1 จึงได้แต่งตั้งคณะทำงานเพื่อจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา ที่เกี่ยวข้องสำหรับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ พร้อมกำหนดหลักเกณฑ์ ขั้นตอนการปฏิบัติงาน เพื่อใช้เป็นคู่มือมาตรฐานการปฏิบัติงานให้สอดคล้องกับหลักวิชาการ ครอบคลุมการดำเนินงานของเจ้าหน้าที่กรมทรัพยากรน้ำทั้งหน่วยงานส่วนกลางและส่วนภูมิภาค

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเป็นคู่มือแนวทางการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ในการสำรวจและทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา

1.2.2 เพื่อกำหนดมาตรฐานการสำรวจและทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา

1.2.3 เพื่อเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมฐานราก และวิศวกรรมธรณีวิทยา ที่เกี่ยวข้องกับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ประเภทรบบกระจายน้ำ

1.3 ขอบเขตคู่มือ

คู่มือสำรวจและทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องสำหรับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ประเภทรบบกระจายน้ำ ครอบคลุมความรู้พื้นฐาน วิธีการ ขั้นตอนการสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา รวมถึงการทดสอบทางวิศวกรรมธรณีวิทยาในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวางแผนโครงการพัฒนาแหล่งน้ำประเภทรบบกระจายน้ำและการออกแบบก่อสร้าง

1.4 การนำไปใช้ประโยชน์

คู่มือสำรวจและทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา เป็นคู่มือแนวทางในการปฏิบัติงานด้านการสำรวจเก็บข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติของดินและหิน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและครบถ้วนสำหรับงานก่อสร้างระบบกระจายน้ำ โดยครอบคลุมกระบวนการสำรวจและทดสอบในทุกขั้นตอน เพื่อให้ให้นักธรณีวิทยา วิศวกร นายช่าง

ในส่วนกลางและส่วนภูมิภาคของกรมทรัพยากรน้ำสามารถดำเนินการสำรวจและทดสอบได้อย่างเป็น
ขั้นตอน เข้าใจในกระบวนการทำงาน และดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สามารถนำผล
การสำรวจและทดสอบไปใช้เพื่อการออกแบบก่อสร้างได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

บทที่ 2

โครงการพัฒนาแหล่งน้ำประเภทระบบกระจายน้ำ

ระบบกระจายน้ำ คือ โครงการก่อสร้างอาคารลำเลียงน้ำจากแหล่งน้ำไปสู่พื้นที่รับประโยชน์ ได้แก่ พื้นที่เกษตร เลี้ยงสัตว์ อุตสาหกรรม รวมถึงการอุปโภคบริโภค โดยระบบกระจายน้ำมี 2 ระบบ คือ ระบบเปิด ได้แก่ คลองส่งน้ำ ซึ่งน้ำจะเคลื่อนที่โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง และระบบปิด ได้แก่ ท่อส่งน้ำ และระบบสูบน้ำ ซึ่งน้ำจะเคลื่อนที่ภายใต้แรงดัน รายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากคู่มือการสำรวจออกแบบโครงการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่น้ำ (2557) และเอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรช่างควบคุมงานก่อสร้างโครงการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่น้ำ ประเภทของโครงการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่น้ำ (2560) ของกรมทรัพยากรน้ำ

ทั้งนี้ ขนาดของทางน้ำจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับขนาดของพื้นที่เพาะปลูก และประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณา ได้แก่

- ด้านอุทกวิทยา เช่น ปริมาณน้ำต้นทุน ค่าการคายระเหยของพืช เป็นต้น
- ด้านชลประทาน เช่น พื้นที่เพาะปลูก ชนิดพืชที่ปลูก ปฏิทินการเพาะปลูก สัมประสิทธิ์พืช (K_c) ประสิทธิภาพการชลประทาน และความต้องการน้ำ เป็นต้น
- ด้านชลศาสตร์การไหล เช่น ปริมาณน้ำออกแบบ อาคารอัดน้ำ อาคารสลายพลังงาน เป็นต้น
- ด้านเศรษฐกิจและสังคม เช่น ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการพัฒนาโครงการทั้งการอุปโภคบริโภค การเกษตร และปศุสัตว์ เป็นต้น

2.1 คลองส่งน้ำ

คลองส่งน้ำ เป็นระบบกระจายน้ำแบบเปิด ส่งน้ำจากแหล่งน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลตามความลาดเทของพื้นที่ ตามลักษณะภูมิประเทศ ไปยังพื้นที่รับประโยชน์ ขนาดและความยาวของคลองส่งน้ำแต่ละสายขึ้นอยู่กับจำนวนพื้นที่รับประโยชน์ที่คลองสายนั้นจะควบคุมได้ และจำนวนคลองส่งน้ำทั้งหมดขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่จะส่งน้ำให้ ประเภทของคลองส่งน้ำ ได้แก่ คลองดิน และคลองตาดคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ

คลองส่งน้ำต้องมีระดับน้ำใช้การเต็มที่ในคลองส่งน้ำสูงกว่าระดับพื้นดินพอที่จะส่งน้ำไปยังพื้นที่รับประโยชน์ได้สะดวก โดยไม่ต้องสูบน้ำจากแหล่งน้ำเข้าสู่คลองส่งน้ำ และคลองส่งน้ำไม่ควรเกิดการตื้นเขินหรือการกัดเซาะในคลอง รวมถึงไม่รบกวนชุมชนมากเกินไป ดังนั้น ดินฐานรากบริเวณที่ทำคลองดินควรมีคุณสมบัติที่บ่งชี้หรือน้ำซึมผ่านได้น้อย เพื่อให้สามารถส่งน้ำไปตามแนวคลองถึงพื้นที่รับประโยชน์ได้ทุกแห่ง กรณีส่งน้ำผ่านอ่างเก็บน้ำเข้าคลองส่งน้ำโดยตรง คลองส่งน้ำสายใหญ่จะสร้างต่อจากปลายท่อปากคลองส่งน้ำท้ายเขื่อนเก็บกักน้ำ สำหรับเขื่อนทดน้ำจะสร้างคลองส่งน้ำสายใหญ่ต่อจากบริเวณท้ายประตูหรือท่อปากคลองส่งน้ำ ซึ่งสร้างบริเวณหน้าเขื่อนทดน้ำออกไป

อาคารประกอบของคลองส่งน้ำ ที่สำคัญ ได้แก่

2.1.1 อาคารลำเลียงน้ำ ได้แก่ ท่อลอดถนน อาคารน้ำตก อาคารรางเท สะพานน้ำหรือรางน้ำ

2.1.2 อาคารควบคุมน้ำ ได้แก่ ประตูระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ ประตูระบายน้ำปลายคลอง
อาคารอัดน้ำ ท่อส่งน้ำเข้าพื้นที่รับประโยชน์

2.1.3 อาคารป้องกัน ได้แก่ ท่อระบายน้ำลอดคลองส่งน้ำ อาคารระบายน้ำล้นลำน้ำธรรมชาติ

2.1.4 ท่อรับน้ำเข้าแปลงเพาะปลูก ทำหน้าที่จ่ายและควบคุมน้ำที่ส่งออกจากคลองส่งน้ำไปยัง
พื้นที่รับประโยชน์ โดยมีการก่อสร้างไว้เป็นระยะ ตามตำแหน่งที่สามารถส่งน้ำไปได้สะดวกและทั่วถึง



รูปที่ 1 คลองดิน



รูปที่ 2 คลองดาดคอนกรีต

2.2 ท่อส่งน้ำ

ท่อส่งน้ำ เป็นระบบกระจายน้ำแบบปิด ส่งน้ำด้วยแรงดันภายในท่อ เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นลูกเนินสูงต่ำสลับกัน หรือบริเวณภูเขาที่มีพื้นที่สูงต่ำแตกต่างกันจนไม่สามารถก่อสร้างคลองส่งน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 การออกแบบต้องอ้างอิงระดับผิวน้ำกักเก็บของแหล่งน้ำ เช่น ประตูระบายน้ำ ฝายน้ำล้น เป็นต้น โดยพลังงานความสูงของน้ำในท่อจะสูญเสียเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวท่อ การใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่อัตราการไหลคงที่จะช่วยลดการสูญเสียได้ เนื่องจากน้ำไหลไปในท่อตามธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อระดับท่ออยู่ต่ำกว่าระดับน้ำในแหล่งเก็บน้ำและต่ำกว่า Hydraulic Grade Line (HGL) จุดที่จะนำน้ำออกไปใช้ต้องมีระดับสูงกว่าพื้นที่เพาะปลูก การออกแบบท่อส่งน้ำให้เหมาะสมจำเป็นต้องทดลองเลือกชนิดท่อและขนาดท่อ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าลงทุนและผลประโยชน์ที่ได้รับ และเลือกชนิดท่อและขนาดท่อที่ได้ค่า B/C ratio ที่สูงที่สุด

อาคารประกอบของระบบส่งน้ำ ที่สำคัญ ได้แก่

2.2.1 อาคารระบายอากาศ เพื่อไล่ฟองอากาศที่รวมกันบริเวณจุดสูงสุดของแต่ละช่วงเส้นท่อ ควรติดตั้งวาล์วไล่อากาศทุกระยะ 500 – 1,000 เมตร

2.2.2 อาคารระบายตะกอน ทำหน้าที่ดักตะกอนแขวนลอยที่ปนมากับน้ำ ให้ตกจมบริเวณจุดต่ำสุดของแนวท่อทุกจุด เพื่อให้สามารถระบายตะกอนออกจากระบบท่อส่งน้ำ

2.2.3 อาคารประตูบังคับหรือวาล์วควบคุม ติดตั้งบริเวณจุดต้นทาง จุดปล่อยน้ำ และจุดปลายสุดของแนวท่อส่งน้ำ

2.2.4 อาคารบ่อบักน้ำและจุดปล่อยน้ำ ทำหน้าที่สลายพลังงานของน้ำที่ไหลออกจากระบบท่อ และควบคุมระดับน้ำที่จะระบายเข้าสู่คลองส่งน้ำเข้าพื้นที่รับประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 3 ท่อส่งน้ำ

2.3 ระบบสูบน้ำ

ระบบสูบน้ำ เป็นระบบกระจายน้ำแบบปิด ส่งน้ำด้วยเครื่องมือกล เพื่อเพิ่มแรงดันน้ำให้ไหลไปตามท่อส่งน้ำ หรือสูบน้ำจากที่ต่ำขึ้นที่สูง เพื่อส่งน้ำให้กับระบบคลอง เหมาะสำหรับพื้นที่แหล่งน้ำห่างไกลหรือแหล่งน้ำที่มีระดับต่ำกว่าระบบกระจายน้ำ ไม่สามารถส่งน้ำไปยังระบบกระจายน้ำและพื้นที่เพาะปลูกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ระบบสูบน้ำ ประกอบด้วย เครื่องสูบน้ำ ท่อส่งน้ำด้วยแรงดัน อาคารโรงสูบน้ำแบบคอนกรีตเสริมเหล็กหรือแพสูบน้ำ และหอถังสูงหรือถังเก็บน้ำ หากเป็นระบบกระจายน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยตำแหน่งก่อสร้างอาคารโรงสูบน้ำ หอถังสูง และถังเก็บน้ำ เป็นพื้นที่ที่รองรับน้ำหนักจำนวนมาก จำเป็นต้องเจาะสำรวจและทดสอบธรณีวิทยาฐานราก เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักของชั้นดินชั้นหินสำหรับออกแบบฐานรากให้เหมาะสม คือ แบบฐานรากแผ่ หรือแบบเสาเข็ม โดยวิธีการเจาะสำรวจจะกล่าวในลำดับถัดไป



รูปที่ 4 ระบบสูบน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 3

การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา

การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- เพื่อสำรวจความเหมาะสมของพื้นที่โครงการ
- เพื่อตรวจสอบลักษณะทางวิศวกรรมของชั้นดิน ชั้นหิน สำหรับเป็นข้อมูลในการออกแบบ

ก่อสร้างฐานราก

- เพื่อตรวจสอบความหนาแน่นหรือความแข็งแรงของชั้นดินชั้นหิน
- เพื่อเก็บตัวอย่างดินหรือหินไปทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ
- เพื่อสำรวจหาแหล่งวัสดุก่อสร้างในพื้นที่โครงการ

การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยาเพื่อรองรับการออกแบบระบบกระจายน้ำ ขึ้นอยู่กับการออกแบบชนิดหรือรูปแบบการก่อสร้าง เช่น การก่อสร้างระบบคลองส่งน้ำหรือระบบท่อส่งน้ำ การเก็บน้ำในถังเก็บน้ำหรือหอถังสูง เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักออกแบบเป็นคลองเปลือยหรือคลองลาดคอนกรีต มีสถานีสูบน้ำ และอาคารบังคับน้ำ การสำรวจพื้นที่โครงการในภาคสนามชั้นออกแบบรายละเอียด จึงจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินและหินในภาคสนาม พร้อมเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของวัสดุในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะชั้นดินชั้นหิน ความหนา โครงสร้างใต้ผิวดิน การรับน้ำหนัก การรื้อซึมคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชั้นดินและชั้นหินฐานราก รวมถึงสำรวจปริมาณสำรองของวัสดุที่แน่นอนสำรวจความหนาและชนิดของวัสดุปกคลุม (Overburden) โดยในทางวิศวกรรม ดินจะถูกนำมาใช้ใน 2 ลักษณะ คือ

- วัสดุฐานราก (Foundation materials) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนดิน เช่น อาคาร สะพาน ถนน เป็นต้น โดยดินจะถูกใช้งานด้วยคุณสมบัติตามธรรมชาติ ดังนั้น ดินดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของสิ่งก่อสร้าง เช่น มีความแข็งแรงเพียงพอในการรับน้ำหนัก หรือมีความตึบน้ำเพียงพอไม่ให้น้ำซึมผ่าน ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยจำเป็นต้องมีการเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน สำหรับใช้ประกอบการออกแบบองค์ประกอบของสิ่งก่อสร้าง

- วัสดุก่อสร้าง (Construction materials) เช่น ดินสำหรับนำมาก่อสร้างถนน คันดิน เขื่อน หรือถมที่ เป็นต้น โดยดินจะถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นก่อนนำไปใช้ ดินดังกล่าวต้องผ่านการบดอัดให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ดีและอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เช่น การบดอัดเพื่อทำถนน หรือการบดอัดเพื่อป้องกันน้ำท่วม เป็นต้น ดังนั้น ในการออกแบบโครงการจึงจำเป็นต้องทราบประเภทและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

รายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากคู่มือการสำรวจออกแบบ โครงการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่แหล่งน้ำ (2557) และเอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรช่างสำรวจเพื่อการออกแบบโครงการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่แหล่งน้ำ (2560) ของกรมทรัพยากรน้ำ ทั้งนี้ อาจมีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ (Geophysical exploration) ร่วมกับการเจาะสำรวจ (Exploration drilling) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน รวมถึงประหยัดงบประมาณในการเจาะสำรวจ โดยการสำรวจในภาคสนามแบ่งออกเป็น การสำรวจพื้นผิว (Surface investigation) และการสำรวจใต้พื้นผิว (Subsurface investigation) โดยมีวิธีการสำรวจ ดังนี้

3.1 การสำรวจพื้นผิว (Surface investigation)

การสำรวจพื้นผิวเป็นการสำรวจลักษณะทางธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยาที่ปรากฏให้เห็นบนพื้นผิวหรือบริเวณผิวดิน เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดดิน ชนิดหิน รวมถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โครงการและบริเวณใกล้เคียง โดยทำการสำรวจธรณีวิทยา และสำรวจแหล่งวัสดุก่อสร้างเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบก่อสร้างและวางโครงการให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละพื้นที่ โดยมีวิธีการสำรวจ ดังนี้

3.1.1 การสำรวจธรณีวิทยา

การสำรวจธรณีวิทยาจากชั้นดินหรือหินโผล่ (Outcrop) เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและบันทึกข้อมูลรายละเอียดของขอบเขตชนิดดิน ชนิดหิน โครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ปรากฏให้เห็นบนพื้นผิวทั้งขนาดและทิศทาง เพื่อสรุปเป็นรายงานความเหมาะสมของพื้นที่โครงการ และจัดทำแผนที่ธรณีวิทยาขึ้นรายละเอียด มาตรฐานอย่างน้อย 1 : 5,000 ถึง 1 : 1,000 โดยเครื่องมือการสำรวจประกอบด้วย เข็มทิศธรณี ค้อนธรณี เครื่องวัดพิภคตำแหน่ง เครื่องวัดระดับความสูง เทปวัดระยะแผนที่ และเครื่องมืออื่น ๆ โดยสิ่งที่ต้องสำรวจ มีดังนี้

1) ชนิดดินและหิน เป็นการสังเกตและจำแนกลักษณะของดินหรือหินในพื้นที่สำรวจจากคุณสมบัติทางกายภาพที่มองเห็นด้วยตาเปล่า โดยระบุสี ประเภทของดินหรือหิน ตลอดจนลักษณะการเกิด ทั้งนี้ควรเก็บตัวอย่างดินหรือหินไปทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์ขนาดตะกอนและชนิดของดินหรือหินอย่างละเอียด

2) การลำดับชั้นหินและธรณีวิทยาโครงสร้าง (Stratigraphy and structural geology) เป็นการสำรวจข้อมูลทางธรณีวิทยา โครงสร้างทางธรณีวิทยา และลักษณะปรากฏที่เฉพาะเจาะจงของหินเพื่อประเมินความเหมาะสมก่อนการก่อสร้าง โดยจำเป็นต้องสำรวจข้อมูล ดังต่อไปนี้

2.1) การกระจายตัวของชั้นดินชั้นหิน โดยสำรวจขอบเขตความต่อเนื่องทั้งแนวราบและแนวดิ่ง ตลอดจนแนวสัมผัสของชั้นดินชั้นหิน

2.2) ทิศทางการวางตัวของชั้นหิน โดยการวัดค่าในแนวระดับ (Strike) และแนวมุมเท (Dip direction) ของหิน

2.3) สภาพและระบบรอยแยกของหิน (Joint system) โดยการวัดค่าความถี่ และทิศทางการตัด ขนาดความกว้าง ลักษณะของรอยแยก และวัสดุในรอยแยก

2.4) ลักษณะชั้นหินคดโค้ง (Folding) สำรวจทิศทางการโค้งงอของชั้นหินที่พบในพื้นที่

2.5) รอยเลื่อนและแนวรอยแตก (Fault and fracture zone) สำรวจข้อมูลโครงสร้างลายเส้น (Lineation) เช่น แนวรอยไถล (Slickenside striae) ทิศทางของระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) แนวการคดโค้ง (Fold as lineation) และแนวการเรียงตัวของแร่ (Foliation) เป็นต้น เพื่อประเมินผลกระทบต่อการออกแบบและก่อสร้าง

2.6) สภาพการผุพังอยู่กับที่ (State of weathering) สำรวจขอบเขตและระดับการผุพังและการสลายตัวของหิน

3) สภาพธรณีสัณฐานวิทยา (Geomorphology) เป็นการศึกษาสภาพธรณีสัณฐานวิทยาโดยรอบพื้นที่เพื่อพิจารณาความเชื่อมโยงระหว่างสภาพภูมิประเทศ ลักษณะทางธรณีสัณฐานและสภาพแวดล้อมทางกายภาพที่มีผลต่อการก่อสร้างและการออกแบบสิ่งก่อสร้าง โดยต้องสำรวจ ดังนี้

3.1) ดินถล่มและการยุบตัว (Landslide and collapse) สำรวจบริเวณพื้นที่หรือประเมินจากภาพถ่ายทางอากาศเพื่อกำหนดขอบเขต แบ่งแยกประเภทพื้นที่ โดยหากพบลักษณะภูมิประเทศที่คาดว่าจะเกิดดินถล่มหรือแผ่นดินยุบตัว ให้ทำการบันทึกข้อมูลตำแหน่ง ขนาด และขอบเขตที่พบ

3.2) น้ำซึม น้ำซับ น้ำพุ และน้ำไหลใต้ดิน (Spring water and underflow) สำรวจแหล่งน้ำในพื้นที่ เพื่อให้ทราบแหล่งที่มาการไหลของน้ำร่วมกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ โดยทำการบันทึกข้อมูลตำแหน่ง ชนิดและลักษณะ ปริมาณและแรงดัน คุณภาพน้ำ (สี ความขุ่น กลิ่น รส ฯลฯ) และอุณหภูมิ

3.3) ถ้ำ (Cave) ให้ทำการบันทึกข้อมูลตำแหน่ง ชนิดของถ้ำ (ถ้ำหินปูนหรือหินชนิดอื่น) ประมาณขนาด ความลาดเอียง และลักษณะภายในถ้ำ

3.4) แอ่ง (Depression) ให้ทำการบันทึกข้อมูลตำแหน่ง ขนาด ความลาดเอียง และลักษณะของแอ่ง

3.5) ร่องรอยแผ่นดินไหว (Earthquake) ให้ทำการบันทึกข้อมูลประเภทรอยเลื่อนที่ส่งผลให้เกิดแผ่นดินไหวทั้งปัจจุบันและอดีตจากลักษณะภูมิประเทศที่ปรากฏจากการออกภาคสนามเปรียบเทียบกับข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวในอดีต

3.1.2 การสำรวจแหล่งวัสดุก่อสร้าง

การสำรวจแหล่งวัสดุก่อสร้าง เป็นการสำรวจธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา และเก็บตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของวัสดุในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดและปริมาณของวัสดุ รวมถึงความหนาและชนิดของวัสดุปกคลุม (Overburden) เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณสำรองได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น รวมถึงสำรวจระยะทางในการขนส่งและวิธีการขนย้ายวัสดุสำหรับประเมินค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากการนำวัสดุมาใช้งาน โดยมีวิธีการสำรวจ ดังนี้

1) รวบรวมข้อมูลการสำรวจเบื้องต้น เพื่อจัดทำแผนที่ชั้นรายละเอียด เช่น แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่แหล่งวัสดุก่อสร้าง มาตราส่วน 1:5,000 หรือ 1:1,000 เป็นต้น สำหรับวางแผนการสำรวจและกำหนดขอบเขตที่แน่นอน รวมถึงกำหนดจุดเจาะสำรวจแหล่งวัสดุดินและแหล่งวัสดุหิน

2) สำรวจธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาชั้นรายละเอียดบริเวณผิวดินและสำรวจใต้ผิวดิน

2.1) สำหรับแหล่งดิน

2.1.1) เจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน (Hand auger) เพื่อสำรวจความหนาของชั้นวัสดุดิน พร้อมเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ

2.1.2) ขุดบ่อทดสอบ (Test pit) เพื่อสำรวจความหนาของชั้นวัสดุดิน เนื่องจากบางพื้นที่เป็นกรวดหรือเศษหิน ไม่สามารถเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุนได้ พร้อมเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ

2.2) สำหรับแหล่งหิน

2.2.1) สำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction method) เพื่อประเมินความหนาของชั้นวัสดุปิดทับชั้นวัสดุหิน และระดับความลึกของชั้นวัสดุหิน โดยอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติความหนาแน่นของวัสดุ ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นหักเหแตกต่างกัน

2.2.2) เจาะเก็บตัวอย่างแท่งหิน เพื่อตรวจสอบความหนาของวัสดุปิดทับชั้นวัสดุหินและคุณสมบัติของหินได้โดยตรง

3) เก็บตัวอย่างวัสดุจากกองวัสดุก่อสร้างดิน ทราย หรือหินโผล่ พร้อมบรรยายลักษณะดินและหินในภาคสนาม และทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับตัวอย่างวัสดุดิน ทราย ใช้การวิเคราะห์หาขนาดตะกอน (Sieve analysis) เพื่อจำแนกชนิดดินตามระบบ USCS สำหรับตัวอย่างวัสดุหิน เก็บจากหินโผล่หรือแท่งตัวอย่างหินจากการเจาะสำรวจ เพื่อนำมาทดสอบเกี่ยวกับกำลังรับน้ำหนัก ความแข็งแรง และความทนทานต่อการขัดสีของวัสดุหิน

4) การประเมินปริมาณสำรองของแหล่งวัสดุ สำหรับวัสดุดินและทราย ทำการประเมินจากข้อมูลความหนาของชั้นดินที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการในแต่ละพื้นที่ที่กำหนด โดยให้ได้อย่างน้อย 1.5 เท่าของปริมาณที่กำหนด

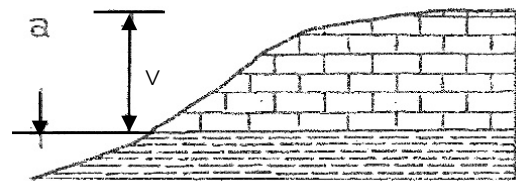
5) การประเมินปริมาณสำรองของแหล่งวัสดุ กรณีเป็นหินตะกอน จะถูกกำหนดโดยความหนาและการแผ่กระจายของชั้นหิน รวมถึงทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ดังนี้

5.1) กรณีชั้นหินวางตัวในแนวราบ การประเมินปริมาณสำรองค่อนข้างแน่นอน และให้ปริมาณสำรองมากกว่ากรณีชั้นหินวางตัวเอียงเท ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก)

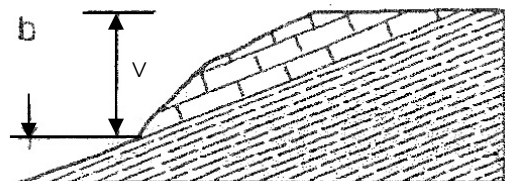
5.2) กรณีชั้นหินวางตัวเอียงเททำมุมออกจากเขา ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) การประเมินต้องคำนึงถึงความหนาของชั้นหินกับความหนาของวัสดุปิดทับ ซึ่งปริมาณหินจะลดลงเมื่อขุดเปิดลึกลงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก)

5.3) กรณีชั้นหินวางตัวเอียงเททำมุมเข้าหาเขา ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) ความหนาของวัสดุปกคลุมจะเพิ่มขึ้นเมื่อขุดลึกลงไป หากเปิดเหมืองโดยให้พื้นลาดเอียงลงตามมุมเอียงเทของชั้นหิน สัดส่วนระหว่างวัสดุปกคลุมต่อหินที่ขุดอาจดีขึ้น แต่ไม่ใช่ทางเลือกที่ดีนัก เพราะการขุดและการขนย้ายจะยากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข)

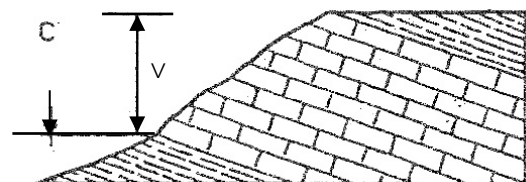
(ก) ชั้นหินวางตัวในแนวราบ



(ข) ชั้นหินวางตัวเอียงเททำมุมออกจากเขา

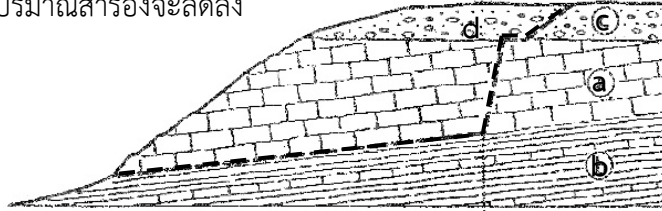


(ค) ชั้นหินวางตัวเอียงเททำมุมเข้าหาเขา



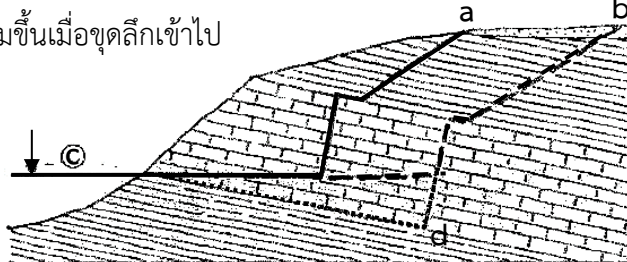
รูปที่ 5 ภาพตัดขวางแสดงผลการเอียงเทของชั้นหินต่อการคำนวณปริมาณสำรองของหิน
(สัมพันธ์ สิงหราชวรพันธุ์, 2545)

(ก) ชั้นหินวางตัวเอียงเททำมุมออกจากเขา เมื่อขุดลึกเข้าไป
ปริมาณสำรองจะลดลง



- a คือ หินปูน
- b คือ หินดินดาน
- c คือ วัสดุปกคลุม
- d คือ ขอบเขตคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

(ข) ชั้นหินวางตัวเอียงเททำมุมเข้าหาเขา ปริมาณวัสดุปกคลุม
เพิ่มขึ้นเมื่อขุดลึกเข้าไป



- a คือ สัดส่วนวัสดุปกคลุมร้อยละ 40
- b คือ สัดส่วนวัสดุปกคลุมร้อยละ 80
- c คือ ขุดในแนวราบ
- d คือ ขุดตามมุมเอียงของชั้นหิน

รูปที่ 6 การประเมินปริมาณสำรองของหินที่ชั้นหินวางตัวเอียงเทออกจากเขาและเอียงเทเข้าหาเขา
(สัมพันธ์ สิงหราชวรพันธุ์, 2545)

6) การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างในห้องปฏิบัติการ

6.1) วัสดุดิน

- 6.1.1) Sieve Analysis หรือ Gradation
- 6.1.2) Water Content
- 6.1.3) Atterberg's limits
- 6.1.4) Specific Gravity
- 6.1.5) Proctor Compaction
- 6.1.6) Relative Density

6.2) วัสดุหิน

- 6.2.1) Specific Gravity and Absorption
- 6.2.2) Abrasion Test
- 6.2.3) Uniaxial Compressive Strength

แหล่งวัสดุก่อสร้างมีหลายประเภท ได้แก่ แหล่งบ่อยืมดิน แหล่งกรวดและทราย แหล่งหิน
ย่อย แหล่งหินใหญ่ และแหล่งหินถม การนำมาใช้งานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และวัตถุประสงค์
ของการใช้วัสดุก่อสร้าง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) แหล่งบ่อยืมดิน

บ่อยืมดิน (Borrow area) ของดินถม (Clay fill) สำหรับงานก่อสร้างคันทางหรือทำนบกั้นดิน ต้องเป็นดินประเภทที่บดน้ำ (Impervious materials) มีส่วนผสมของดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายเป็นส่วนใหญ่ โดยดินเหล่านี้่นำมาจากแหล่งดินหรือบ่อยืมดิน ซึ่งต้องมีคุณภาพของดินตรงตามข้อกำหนด ปราศจากกิ่งไม้ รากไม้ และสารอินทรีย์ ไม่มีหินหรือกรวดขนาดใหญ่กว่า 75 มิลลิเมตร โดยปกติทำนบกั้นดินที่บดอัดแล้วเสร็จต้องมีดินอนุภาคละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 40 - 70 โดยน้ำหนัก และอนุโลมให้มีหินและกรวดไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งจำแนกดินตามวิธี Unified Soil Classification ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดดินที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุดินถม

สัญลักษณ์กลุ่มดิน	ชนิดดิน
GC	กรวดผสมดินเหนียว กรวดมีขนาดไม่คละกันผสมทรายและดินเหนียว
SC	ทรายผสมดินเหนียว ทรายมีขนาดไม่คละกันผสมดินเหนียว
CL	ดินเหนียวที่มีความเหนียวน้อยถึงปานกลาง อาจปนกรวด ทราย และตะกอน
CH	ดินเหนียวล้วนที่มีความเหนียวมาก ไม่มีอินทรีย์วัตถุ

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2556)

การสำรวจแหล่งยืมดิน ให้ทำการเจาะสำรวจดินแบบกริด ระยะห่างอย่างน้อย 5 เมตร โดยให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน ด้วยวิธีการเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน (Hand auger) หรือการขุดบ่อทดสอบ (Test pit) เพื่อจำแนกชนิดดินและประเมินความหนาของดินแต่ละชั้น จากนั้นคำนวณหาปริมาณสำรองของแหล่งยืมดิน

2) แหล่งกรวดและทราย

แหล่งกรวดและทราย (Gravel and Sand) ตามธรรมชาติ ได้แก่ ตะกอนทางน้ำรูปพัด (Alluvial fan deposits) ตะกอนลานตะพัก (Terrace deposits) ตะกอนที่ราบน้ำท่วม (Floodplain deposits) ตะกอนร่องน้ำ (Channel deposits) ตะกอนชายหาด (Beach deposits) ตะกอนลมหอบ (Wind-blown deposits) และตะกอนธารน้ำแข็ง (Glacial deposits) โดยแต่ละแหล่งมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกัน บางแหล่งไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นคอนกรีตแอกกรีเกต วัสดุรอง หรือวัสดุรองพื้น รายละเอียด ดังนี้

2.1) ตะกอนทางน้ำรูปพัด มักมีลักษณะเหลี่ยม มีวัสดุเนื้อละเอียดปนอยู่จำนวนมาก ไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นคอนกรีตแอกกรีเกต

2.2) ตะกอนลานตะพัก เป็นตะกอนอายุเก่าแก่ กรวดจากแหล่งนี้จึงมีความผูกมาก มีกำลังต่ำ และมักมีเหล็กออกไซด์หรือซิลิกาปนอยู่ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นคอนกรีต แอกริเกต

2.3) ตะกอนที่ราบน้ำท่วม มักมีวัสดุเนื้อละเอียดปนอยู่ ก่อนใช้จึงควรล้างให้สะอาด ก่อน ส่วนใหญ่เป็นตะกอนทรายมากกว่ากรวด

2.4) ตะกอนร่องน้ำ เป็นแหล่งที่ให้กรวดทรายสำหรับทำเป็นคอนกรีตแอกริเกตที่ดีที่สุด สามารถใช้เป็นวัสดุรองหรือวัสดุรองพื้นได้ แต่มีปริมาณน้อย และการดูดกรวดทราย อาจก่อให้เกิดปัญหาพังทลายของตลิ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงร่องน้ำและความเร็วของกระแสน้ำ จนมีผลกระทบต่อชุมชนในบริเวณริมฝั่งแม่น้ำ

การสำรวจแหล่งกรวดและทราย กรณีโครงการตั้งอยู่ใกล้แหล่งน้ำหรือทางน้ำธรรมชาติ ให้ทำการสำรวจว่าพื้นที่ดังกล่าวอยู่ในเขตรับผิดชอบที่ต้องทำการขออนุญาตหรือเป็นพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าดำเนินการได้หรือไม่ เช่น พื้นที่ป่า พื้นที่อุทยาน พื้นที่ประมง เป็นต้น หากได้รับการอนุญาตแล้ว ให้ทำการเจาะสำรวจดินด้วยวิธีการเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน (Hand auger) หรือการขุดบ่อทดสอบ (Test pit) บริเวณริมทางน้ำ หรือสำรวจรูปตัดทางน้ำตามแนวตลิ่ง ให้มีระยะห่างอย่างน้อย 50 เมตร เพื่อจำแนกชนิดดินและประเมินความหนาของชั้นดิน จากนั้นคำนวณหาปริมาณสำรองของแหล่งกรวดและทรายตลอดแนวทางน้ำที่จะดำเนินโครงการ กรณีโครงการตั้งอยู่ไกลแหล่งน้ำ ให้ทำการสำรวจหาแหล่งร้านค้าหรือท่าทรายที่อยู่บริเวณใกล้เคียงโครงการ จำนวน 3 ร้านค้า รวมถึงสำรวจระยะทางในการขนส่ง เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายในการนำวัสดุมาใช้

3) แหล่งหิน

หิน (Rock) ที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างต้องเป็นหินที่มีความแข็งแรง ทนทาน มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีส่วนแบนเรียบน้อย ไม่มีรอยแตกรอยร้าว ไม่มีการผุกร่อน หรือไม่ทนทานต่อการกัดเซาะ ปัจจุบันแหล่งหินส่วนใหญ่ในประเทศไทยได้มาจากโรงโม่หิน เนื่องจากไม่สามารถดำเนินการระเบิดหินและย่อยหินได้เอง จำเป็นต้องซื้อจากแหล่งร้านค้าหรือโรงโม่หินที่อยู่บริเวณใกล้เคียงโครงการ

การสำรวจแหล่งหินให้ทำการสำรวจหาแหล่งร้านค้าหรือโรงโม่หิน พิจารณาจากชนิดหินที่ต้องใช้งาน โดยต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่กำหนด และมีปริมาณสำรองเพียงพอต่อการก่อสร้าง รวมถึงสำรวจระยะทางในการขนส่ง จำนวน 3 ร้านค้า เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายในการนำวัสดุมาใช้ ทั้งนี้ หินสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างมีหลายประเภท ดังนี้

3.1) หินย่อย (Crushed stone)

หินย่อยได้จากการทำเหมืองหิน (Quarry) โดยทั่วไปใช้วิธีระเบิดภูเขาให้ได้ขนาดที่สามารถย่อยได้ หากก้อนหินมีขนาดใหญ่เกินไปจำเป็นต้องทำให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้เครื่องกระแทก

ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic breaker) หรือทำการระเบิดซ้ำ ก้อนหินที่มีขนาดเหมาะสมจะถูกส่งเข้าเครื่องย่อย (Crushed) และทำการคัดให้ได้ขนาดคละต่างกัน หินที่นำมาย่อยอาจเป็นหินอัคนี หินตะกอน หรือหินแปร แต่ส่วนใหญ่มักเป็นหินตะกอน จำพวกหินปูน เนื่องจากไม่แข็งมาก สามารถย่อยให้มีขนาดตามที่ต้องการได้ง่ายและประกอบด้วยแร่แคลไซต์เป็นส่วนใหญ่ จึงไม่มีปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์มากจนทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีต

3.2) หินถม (Rock-fill)

หินถมเป็นวัสดุถมเปลือกนอกของตัวเขื่อนดิน หรือส่วนประกอบหลักของเขื่อนหินถม ทำหน้าที่เสริมความมั่นคงไม่ให้เกิดการลื่นไถล มีคุณสมบัติน้ำซึมผ่านได้ วัสดุที่ใช้ถมเป็นหินหรือกรวด ผสมทรายและตะกอนที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง โดยหินจะมีขนาดต่าง ๆ วางเรียงกันเป็นชั้น ๆ ซึ่งจำแนกดินตามวิธี Unified Soil Classification ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชนิดดินที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุหินถม

สัญลักษณ์กลุ่มดิน	ชนิดดิน
GW	กรวดมีขนาดใหญ่คละกัน กรวดผสมทรายโดยมีตะกอนละเอียดเล็กน้อย
SP	กรวดมีขนาดสม่ำเสมอ กรวดผสมทรายโดยมีตะกอนละเอียดเล็กน้อย
SW (ถ้ามีกรวด)	ทรายมีขนาดใหญ่คละกัน ทรายผสมกรวดโดยมีตะกอนละเอียดเล็กน้อย
SP (ถ้ามีกรวด)	ทรายมีขนาดสม่ำเสมอ ทรายผสมกรวดโดยมีตะกอนละเอียดเล็กน้อย

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2556)

3.3) หินใหญ่ (Riprap)

หินใหญ่ใช้สำหรับป้องกันการกัดเซาะของกระแสน้ำที่กระทำกับตลิ่งของลำน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยถูกนำไปใช้ในหลายประเภท เช่น หินทิ้ง หินเรียง หินก่อ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้หินที่พบในบริเวณก่อสร้างหรือบริเวณใกล้เคียง ต้องกำหนดให้ระยะทางการขนส่งสั้นที่สุด เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง หินที่นำมาใช้ต้องมีรูปร่างค่อนข้างกลม มีส่วนแบนเรียวน้อย ไม่มีรอยแตกร้าว หรือมีความทนทานต่อการกัดเซาะของกระแสน้ำ และต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

3.3.1) ความทนทานต่อการสึกกร่อนหรือทนต่อการขัดสี (Abrasion) สูญหายไม่เกินร้อยละ 40 เมื่อทดสอบด้วยวิธี Los Angeles Abrasion test

3.3.2) ความคงทน (Soundness) สูญหายไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบด้วยวิธี Sodium Sulphate

3.3.3) ความถ่วงจำเพาะ ไม่น้อยกว่า 2.6

3.3.4) มีสัดส่วนคละที่ดี โดยขึ้นอยู่กับความหนาของหิน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดคละของวัสดุหินใหญ่

หินทิ้งหนา 0.90 เมตร มีขนาดของก้อนหินใหญ่ที่สุดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Ø) ไม่เกิน 0.40 เมตร		
น้ำหนักของหิน (กิโลกรัม)	ขนาด Ø ของหิน (เมตร)	% โดยน้ำหนัก
50 - 100	0.325 - 0.400	มากกว่า 40
10 - 50	0.200 - 0.325	50 - 60
ต่ำกว่า 5	ต่ำกว่า 0.150	น้อยกว่า 10
หินย่อยและหินฝุ่น	หินย่อยและหินฝุ่น	น้อยกว่า 5
หินทิ้งหนา 0.60 เมตร มีขนาดของก้อนหินใหญ่ที่สุดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Ø) ไม่เกิน 0.37 เมตร		
น้ำหนักของหิน (กิโลกรัม)	ขนาด Ø ของหิน (เมตร)	% โดยน้ำหนัก
25 - 75	0.270 - 0.370	มากกว่า 40
5 - 25	0.150 - 0.270	20 - 40
ต่ำกว่า 5	ต่ำกว่า 0.150	น้อยกว่า 20
หินย่อยและหินฝุ่น	หินย่อยและหินฝุ่น	น้อยกว่า 5
หินทิ้งหนา 0.45 เมตร มีขนาดของก้อนหินใหญ่ที่สุดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Ø) ไม่เกิน 0.27 เมตร		
น้ำหนักของหิน (กิโลกรัม)	ขนาด Ø ของหิน (เมตร)	% โดยน้ำหนัก
10 - 25	0.200 - 0.270	มากกว่า 55
5 - 10	0.150 - 0.200	35 - 45
ต่ำกว่า 5	ต่ำกว่า 0.150	น้อยกว่า 10
หินย่อยและหินฝุ่น	หินย่อยและหินฝุ่น	น้อยกว่า 5

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2556)



รูปที่ 7 หินใหญ่

3.2 การสำรวจใต้พื้นผิว (Subsurface investigation)

การสำรวจใต้พื้นผิวเป็นการสำรวจเพื่อตรวจสอบลักษณะทางธรณีวิทยาและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินและชั้นหินที่อยู่ใต้ผิวดิน รวมถึงสำรวจหาแหล่งวัสดุก่อสร้างภายในพื้นที่โครงการ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบก่อสร้างด้านวิศวกรรมฐานราก โดยอาศัยการสำรวจธรณีฟิสิกส์ (Geophysical exploration) ร่วมกับการเจาะสำรวจ (Exploration drilling) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและครบถ้วนเกี่ยวกับสภาพธรณีวิทยาใต้พื้นผิว โดยมีวิธีการสำรวจ ดังนี้

3.2.1 การสำรวจธรณีฟิสิกส์ (Geophysical exploration)

การสำรวจธรณีฟิสิกส์เป็นการสำรวจใต้ผิวดินที่ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างชั้นดินชั้นหิน หรือโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีอยู่เดิม จึงเป็นวิธีการสำรวจที่ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้เพื่อสำรวจลักษณะธรณีวิทยาใต้ผิวดิน รวมถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยา นอกจากนี้ การสำรวจธรณีฟิสิกส์ ยังช่วยให้สามารถกำหนดจุดเจาะสำรวจได้อย่างเหมาะสมและแม่นยำยิ่งขึ้น

การเลือกใช้วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ควรพิจารณาจากความเหมาะสมของสภาพพื้นที่ ข้อจำกัดของพื้นที่ และคุณสมบัติของชั้นดินและชั้นหินที่ต้องการสำรวจ โดยตำแหน่งที่ควรดำเนินการสำรวจธรณีฟิสิกส์ ได้แก่ บริเวณที่รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างของระบบกระจายน้ำ เช่น อาคารสูบน้ำ ถังเก็บน้ำ หรือหอถังสูง เป็นต้น

วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน (Seismic survey) และการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึก (Ground Penetration Radar, GPR) ทั้งนี้ สามารถเลือกใช้วิธีการสำรวจอย่างใดอย่างหนึ่งหรือใช้ร่วมกันหลายวิธี เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และสภาพพื้นที่ที่ต้องการสำรวจ โดยแต่ละการสำรวจมีวิธีการสำรวจ ดังนี้

1) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey)

การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเป็นการสำรวจที่อาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุ โดยเฉพาะค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัตถุ ปัจจุบันเครื่องมือสำรวจสามารถวัดและคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะออกมาได้ทันที โดยกรมทรัพยากรน้ำมีเครื่องมือ Geomative รุ่น GD-10 ดังแสดงในรูปที่ 8 พร้อมซอฟต์แวร์ Geomative studio ที่สามารถใช้ในการสำรวจเพื่อดูสภาพใต้ผิวดินและแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติม สามารถศึกษาได้จากคู่มือสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ด้วยเครื่องมือ Geomative

1.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

1.1.1) GD-10 mainframe เป็นอุปกรณ์หลักสำหรับตั้งค่าและประมวลผลการสำรวจ ภายในเครื่องประกอบด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณและอุปกรณ์รับสัญญาณ พร้อมหน้าจอแสดงผลแบบสี

1.1.2) Multi-electrode cable เป็นสายเคเบิลชนิดขั้วเดียว คือ ขั้ว CB10 ที่ออกแบบให้สามารถอ่านค่าได้พร้อมกันหลายขั้ว โดยสายเคเบิล 1 เส้น ประกอบด้วยขั้ว CB10 จำนวน 10 ขั้ว แต่ละขั้วมีระยะห่างเท่ากัน 5 เมตร

1.1.3) SR-10 switch relay เป็นอุปกรณ์สำหรับสลับวงจรและรับคำสั่งจากเครื่อง GD-10 mainframe

1.1.4) L Type cable เป็นอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อระหว่างเครื่อง GD-10 mainframe, SR-10 switch relay และ multi-electrode cable

1.1.5) ขั้วไฟฟ้าเหล็ก เป็นอุปกรณ์สำหรับปล่อยกระแสไฟฟ้าและวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยการสำรวจให้ปักขั้วไฟฟ้าเหล็กลงไปในดิน และใช้คลิปหนีบเชื่อมต่อกับขั้ว CB10 บนสายเคเบิล

1.1.6) อุปกรณ์จ่ายไฟ Geomative รุ่น BP-145 สำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

1.1.7) อุปกรณ์ชาร์จ

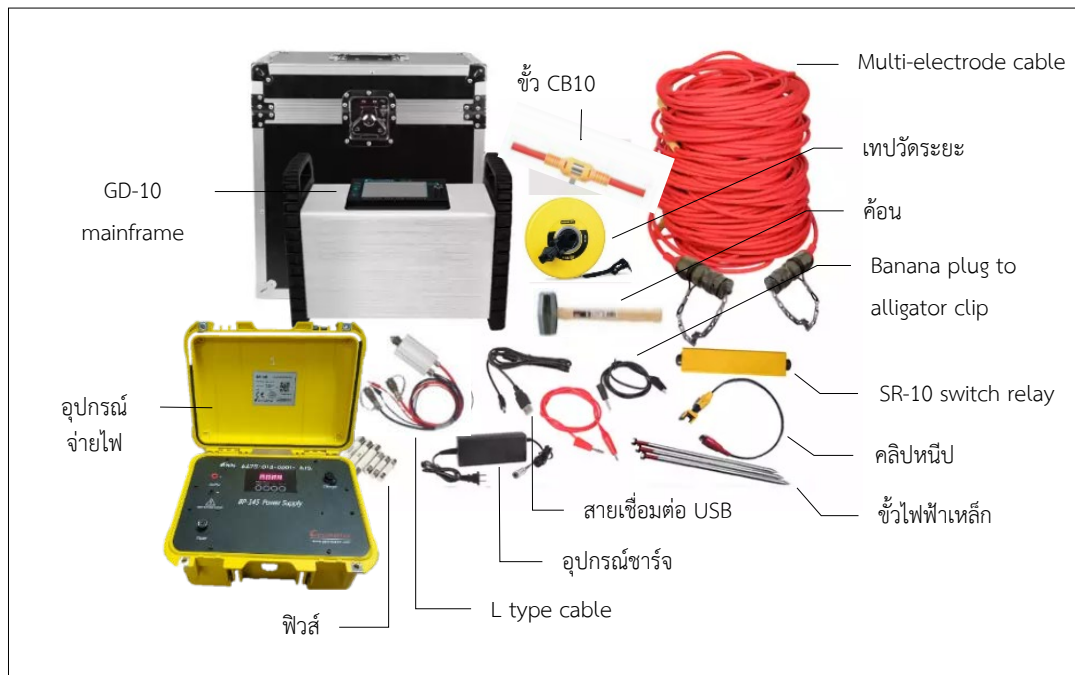
1.1.8) สายเชื่อมต่อ USB

1.1.9) สายบานาน่าปลั๊ก กับคลิปหนีบขั้วแบตเตอรี่ (Banana plug to alligator clip)

1.1.10) พิวส์

1.1.11) คอมพิวเตอร์พกพาที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ Geomative studio สำหรับตั้งค่าและประมวลผลการสำรวจ

1.1.12) อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ค้อน เทปวัดระยะ เครื่องจีพีเอส วิทยุสื่อสาร ร่มสนาม เป็นต้น

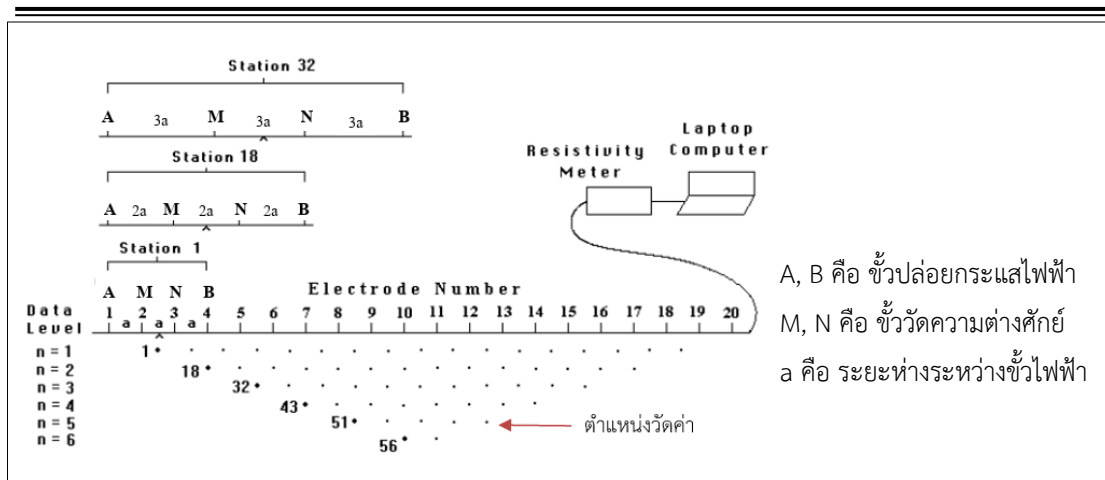


รูปที่ 8 เครื่องมือ Geomative และอุปกรณ์สำรวจ (ST Geomative Co., Ltd., 2019)

1.2) วิธีการสำรวจ

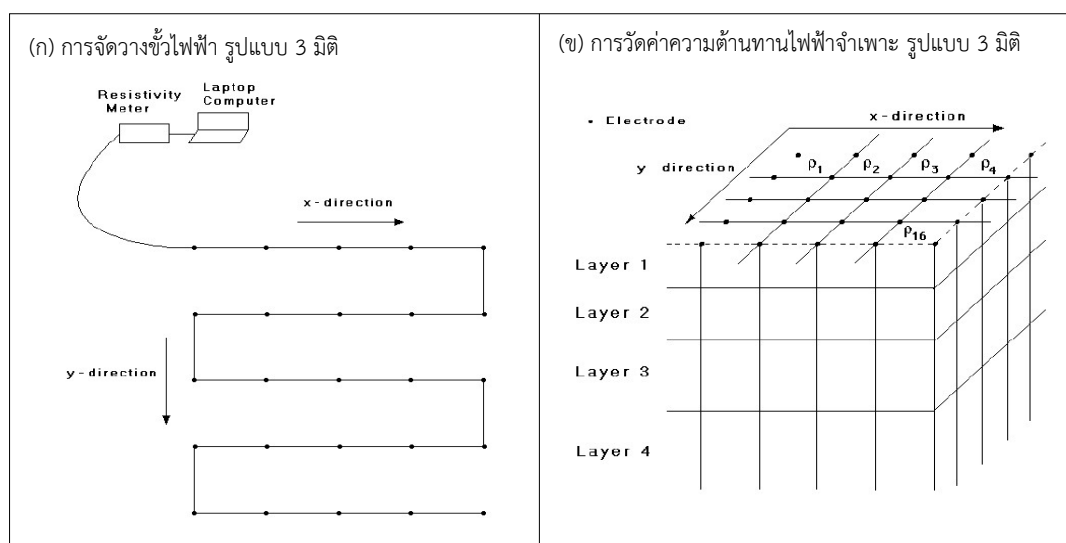
1.2.1) การเลือกวิธีการสำรวจ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการสำรวจ สภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน สภาพพื้นที่ รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการสำรวจ โดยเครื่องมือ Geomative รุ่น GD-10 สามารถสำรวจและแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

(1) การสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 2 มิติ เป็นการสำรวจสร้างภาพตัดขวางสภาพความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะใต้ผิวดิน (Electrical Resistivity Imaging, ERI) ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน โดยวิธีการสำรวจให้วางขั้วไฟฟ้ามีระยะห่างเท่ากันและคงที่ คือ ระยะ a เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การจัดวางขั้วไฟฟ้าและการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 2 มิติ
 (ดัดแปลงจาก M.H.Loke, 1999)

(2) การสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 3 มิติ
 เป็นการสำรวจสร้างสภาพใต้ผิวดินเสมือนเป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง ความยาว และความลึก
 จึงสามารถสร้างภาพตัดขวางได้ทุกแนว ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การจัดวางขั้วไฟฟ้าและการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 3 มิติ
 (M.H.Loke, 1999)

1.2.2) การออกแบบการสำรวจ เพื่อกำหนดรูปแบบการเก็บข้อมูล โดยพิจารณาจากความลึกที่ต้องการสำรวจข้อมูล เพื่อเลือกวิธีการจัดวางขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า จำนวนขั้วไฟฟ้า และความยาวแนวสำรวจ รวมถึงพิจารณาความละเอียดของข้อมูลที่ต้องการสำรวจ เพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างแนวสำรวจ จำนวนแนวสำรวจ และทิศทางของแนวสำรวจ ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การสำรวจ โดยความยาวแนวสำรวจสามารถคำนวณได้ ดังนี้

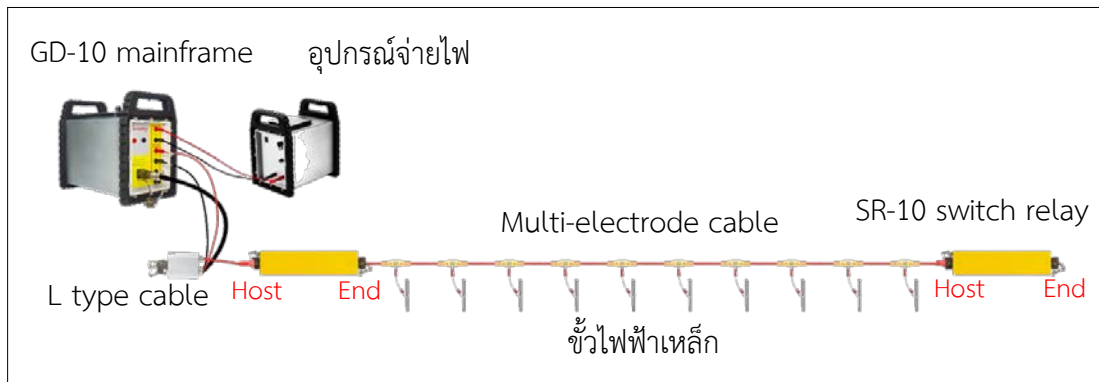
$$\text{ความยาวแนวสำรวจ} = (\text{จำนวนขั้วไฟฟ้า} - 1) \times \text{ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า}$$

ความลึกของการสำรวจ ขึ้นอยู่กับวิธีการจัดวางขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและจำนวนขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้ หากนำข้อมูลไปประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถคำนวณความลึกของการสำรวจได้เบื้องต้น โดยความลึกที่ได้จากการคำนวณเป็นความลึกโดยประมาณ ยกตัวอย่างเช่น การประมวลผลด้วยโปรแกรม RES2DINV ความลึกของการสำรวจสามารถคำนวณได้จากจำนวนเท่าของระยะแนวสำรวจ ตามวิธีการจัดวางขั้วไฟฟ้า ดังนี้ (M.H.Loke, 1999)

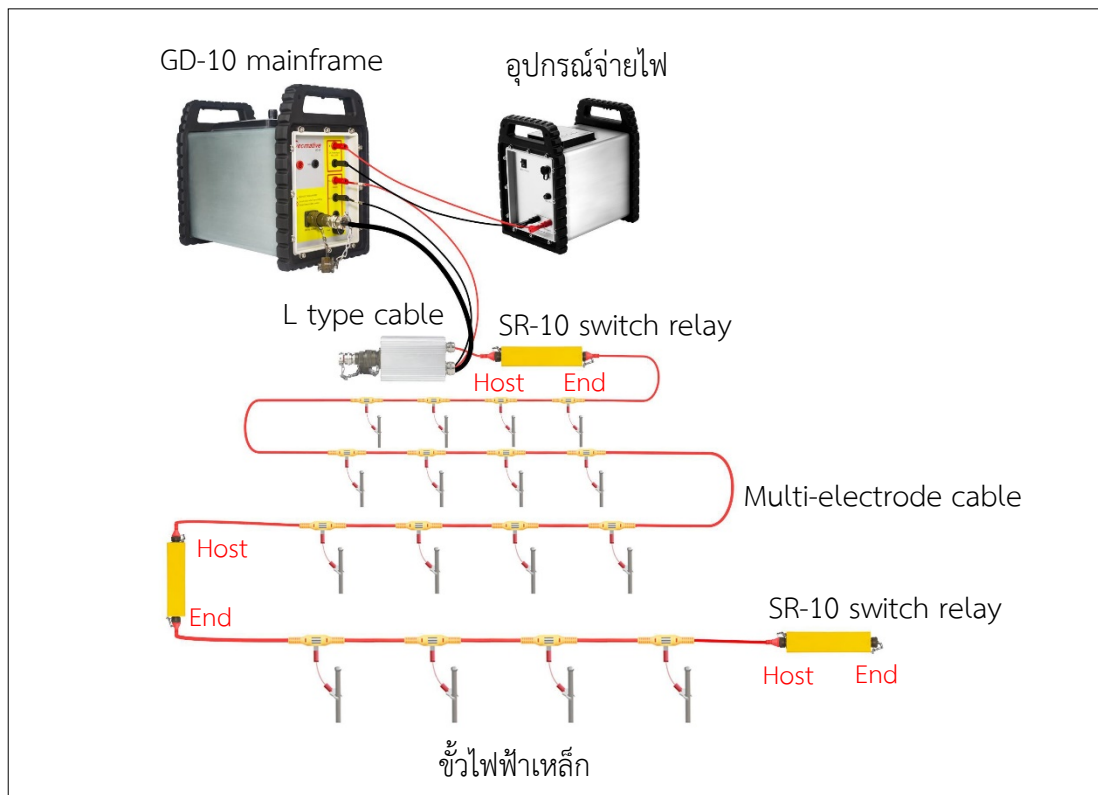
- Wenner-Schlumberger 0.5 เท่าของระยะแนวสำรวจ
- Dipole-Dipole 0.3 เท่าของระยะแนวสำรวจ
- Pole-Pole 0.9 เท่าของระยะแนวสำรวจ
- Pole-Dipole 0.6 เท่าของระยะแนวสำรวจ

1.2.3) ออกแบบการสำรวจด้วยซอฟต์แวร์ Geomative Studio เพื่อกำหนดวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ จากนั้นเชื่อมต่อเครื่อง GD-10 mainframe กับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเชื่อมต่อ USB เพื่อส่งข้อมูลการออกแบบไปยังเครื่อง GD-10 mainframe

1.2.4) จัดวางขั้วไฟฟ้า และติดตั้งอุปกรณ์ โดยเริ่มจากกำหนดตำแหน่งวางเครื่อง GD-10 mainframe และใช้เทปวัดระยะวางตามทิศทางของแนวสำรวจ จากนั้นจัดวางขั้วไฟฟ้าหลักตามระยะที่กำหนด และใช้ค้อนตอกขั้วไฟฟ้าลงไปในดินให้แน่น จากนั้นวางสายเคเบิลให้ขั้ว CB10 อยู่ตำแหน่งตรงกับขั้วไฟฟ้าหลัก และใช้คลิปหนีบขั้ว CB10 กับขั้วไฟฟ้าหลัก โดยเชื่อมต่อปลายสายเคเบิลเข้ากับ SR-10 switch relay และ L type cable ไปยังเครื่อง GD-10 mainframe โดยการสำรวจรูปแบบ 2 มิติ วิธีการจัดวางขั้วไฟฟ้าให้วางเป็นแนวเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 11 สำหรับการสำรวจรูปแบบ 3 มิติ ให้จัดวางขั้วไฟฟ้าครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการสำรวจ และวางแนวสำรวจขนานกัน จากนั้นเชื่อมต่อสายเคเบิลกับขั้วไฟฟ้าหลักในรูปแบบตัวเอส (S) ดังแสดงในรูปที่ 12



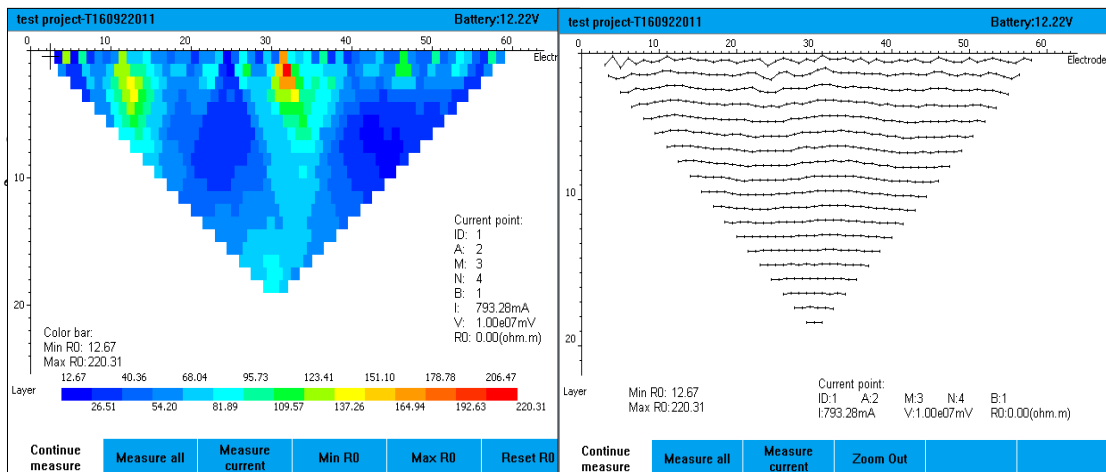
รูปที่ 11 การติดตั้งเครื่องมือสำรวจรูปแบบ 2 มิติ โดยวางเครื่อง GD-10 mainframe ไว้ด้านใดด้านหนึ่งของแนวสำรวจ (ST Geomatic Co., Ltd., 2019)



รูปที่ 12 การติดตั้งเครื่องมือสำรวจรูปแบบ 3 มิติ (ST Geomatic Co., Ltd., 2019)

1.2.5) วัดพิกัดตำแหน่งวางเครื่อง GD-10 mainframe และขั้วไฟฟ้าเหล็กทุกขั้ว เพื่อจัดทำแผนที่แสดงตำแหน่งจุดสำรวจและแนวการสำรวจ นอกจากนี้ หากสามารถวัดระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล (Elevation) ได้ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการประมวลผล เพื่อแสดงภาพตัดขวางสภาพใต้ผิวดินที่แสดงระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล และใช้อ้างอิงสำหรับการออกแบบได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น

1.2.6) ตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิล ขั้วไฟฟ้า และชั้นดินบริเวณที่ปักขั้วไฟฟ้า เมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มวัดค่า โดยผลการสำรวจจะแสดงบนหน้าจอเครื่อง GD-10 mainframe ในรูปแบบภาพตัดขวางของสภาพใต้ผิวดิน (Pseudo-section) และภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Profile graph) ดังแสดงในรูปที่ 13



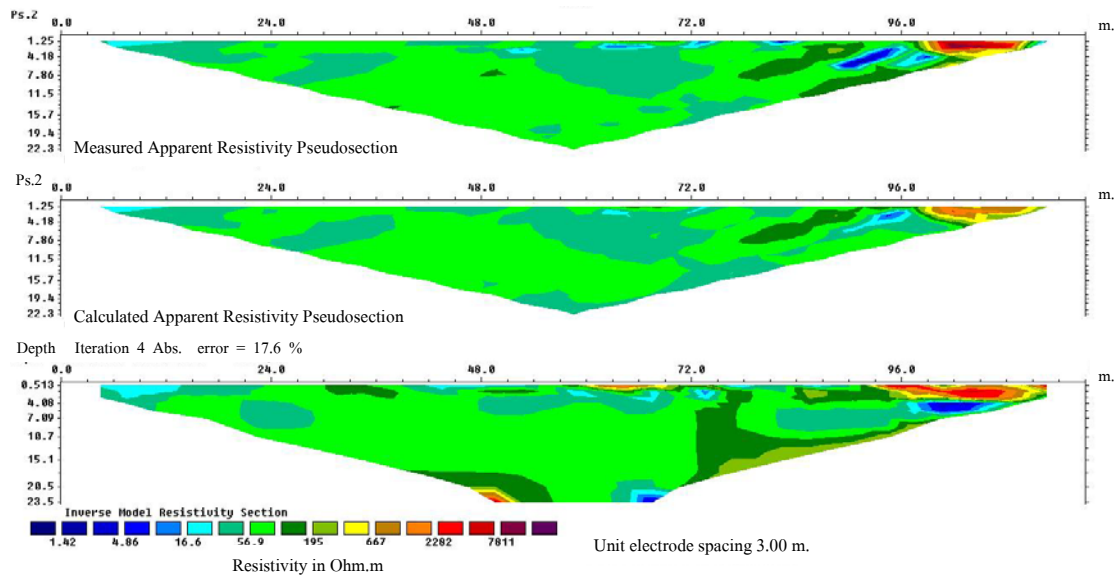
รูปที่ 13 ภาพตัดขวางของสภาพใต้ผิวดิน และภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งวัดค่า

1.3) การประมวลผลและแปลความหมาย

1.3.1) วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่ผิดปกติออก หรือปรับแก้ค่าให้เหมาะสมและสอดคล้องกับข้อมูลข้างเคียง

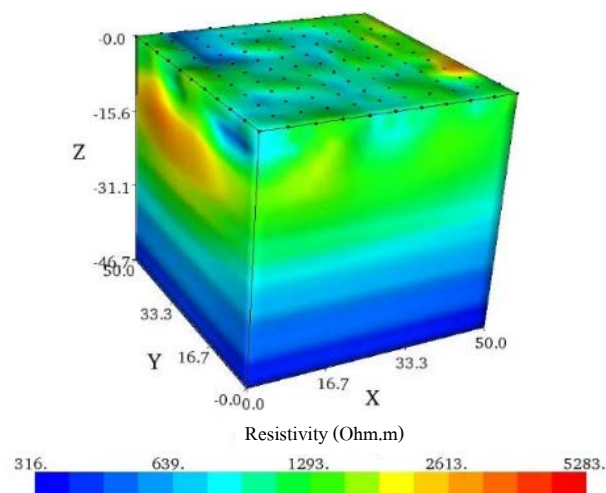
1.3.2) จัดทำแผนที่แสดงตำแหน่งจุดสำรวจและแนวการสำรวจ ในมาตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถเห็นภาพรวมของข้อมูลทำการสำรวจได้อย่างชัดเจน

1.3.3) ประมวลผลข้อมูล กรณีการสำรวจรูปแบบ 2 มิติ ใช้โปรแกรม RES2DINV ในการประมวลผล จะแสดงภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity profile) $\rho_{s,2}$ สภาพใต้ผิวดิน จำนวน 3 ภาพ ได้แก่ ภาพตัดขวางเทียบของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏที่วัดได้จากภาคสนาม ภาพตัดขวางเทียบของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏที่ได้จากการคำนวณ และภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบย้อนกลับที่จำลองสภาพใต้ผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 14 กรณีการสำรวจรูปแบบ 3 มิติ ใช้โปรแกรม RES3DINV ในการประมวลผล จะแสดงสภาพใต้ผิวดินเสมือนแท่งสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง ความยาว และความลึก ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 ภาพตัดขวางเทียมของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏที่วัดได้จากภาคสนาม (บน)
 ภาพตัดขวางเทียมของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏที่ได้จากการคำนวณ (กลาง)
 ภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบย้อนกลับของสภาพใต้ผิวดิน (ล่าง)

Inverted Resistivity Image



รูปที่ 15 ผลการสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะรูปแบบ 3 มิติ (Markus, 2017)

1.3.4) การแปลความหมายผลการสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ เป็นการแปลความหมายเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สามารถบ่งบอกได้เฉพาะลักษณะทางธรณีวิทยา และโครงสร้างใต้ผิวดินที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ความลึกที่ได้จากการสำรวจเป็นความลึกโดยประมาณ การแปลความหมายจึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลหลายด้านประกอบกัน เช่น ข้อมูล

ธรณีวิทยา ข้อมูลอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลหลุมเจาะ และแบบแปลนการก่อสร้าง เป็นต้น เพื่อให้การแปลความหมายมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ สามารถตรวจสอบความถูกต้องของผลการสำรวจได้โดยการเจาะสำรวจ โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหิน และน้ำ ไม่สามารถกำหนดค่าที่แน่นอนได้ แต่จะกำหนดเป็นช่วงของค่า ดังแสดงในรูปที่ 16 และรูปที่ 17

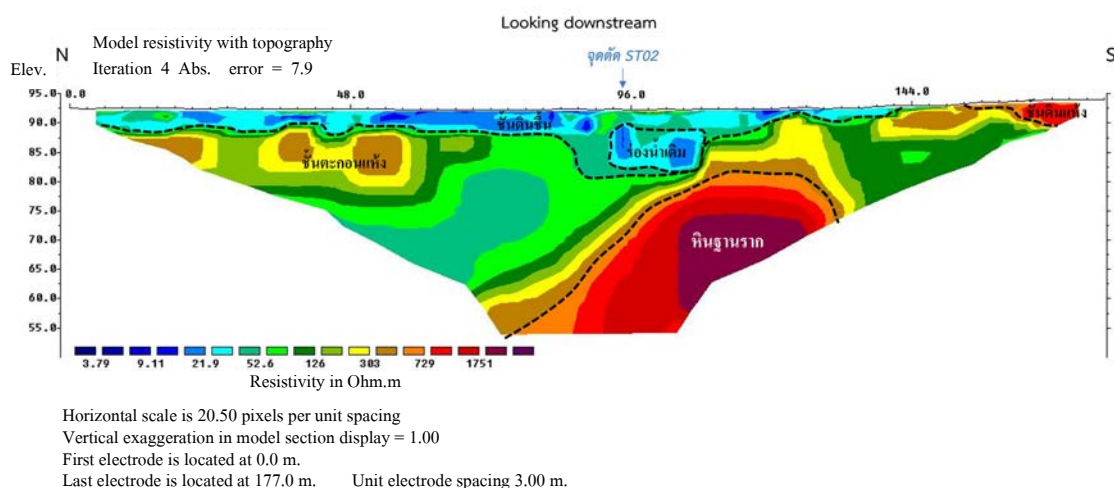
1.3.5) แสดงรายละเอียดการสำรวจและการแปลความหมายภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบย้อนกลับที่จำลองสภาพใต้ผิวดิน ประกอบด้วย จำนวนและความหนาของชั้นดินชั้นหินที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแตกต่างกัน ระดับความลึกของชั้นดินชั้นหิน และชั้นหินฐาน ระบุบริเวณที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะผิดปกติจากบริเวณข้างเคียงหรือบริเวณที่อาจมีโพรง รอยแตก หรือมีการรั่วซึมของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 18

หินอัคนี	ค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)
แกรนิต (granite)	$3 \times 10^2 - 10^6$
แกรนิตเนื้อดอก (granite porphyry)	4.5×10^3 (เปียก) – 1.3×10^6 (แห้ง)
อัลไบต์ (albite)	3×10^2 (เปียก) – 3.3×10^3 (แห้ง)
ไซยีนิต (syenite)	$10^2 - 10^6$
ไดออไรต์ (diorite)	$10^4 - 10^5$
ไดออไรต์เนื้อดอก (diorite porphyry)	1.9×10^3 (เปียก) – 2.8×10^4 (แห้ง)
ควอตซ์ไดออไรต์ (quartz diorite)	2×10^4 (เปียก) – 10.8×10^5 (แห้ง)
แอนดีไซต์ (andesite)	4.5×10^4 (เปียก) – 1.7×10^2 (แห้ง)
แกบโบร (gabbro)	$10^3 - 10^6$
บะซอลต์ (basalt)	$10 - 1.3 \times 10^7$ (แห้ง)
เพอริโดไทต์ (peridotite)	3×10^3 (เปียก) – 6.5×10^3 (แห้ง)
หินแปร	ค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)
ฮอร์นเฟลส์ (hornfels)	8×10^3 (เปียก) – 6×10^7 (แห้ง)
ชีสต์ (schists)	20×10^4
ชนวน (slate)	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
ไนส์ (gneiss)	6.8×10^4 (เปียก) – 3×10^6 (แห้ง)
หินอ่อน (marble)	$10^2 - 2.5 \times 10^8$ (แห้ง)
ควอตซ์ไซต์ (quartzite)	$10 - 2 \times 10^8$

รูปที่ 16 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินอัคนี และหินแปร
(เพียงตา สাত্রักษ์, 2549)

หินตะกอน	ค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)
หินดินดาน (shale)	$20 - 2 \times 10^3$
หินกรวดมน (conglomerate)	$10 - 8 \times 10^2$
หินทราย (sandstone)	$1 - 6.4 \times 10^8$
หินปูน (limestone)	$50 - 16^7$
หินโดโลไมต์ (dolomite)	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
ตะกอนที่ยังไม่แข็งตัว	20-20000
ดินเหนียว (clays)	1- 100
ทรายแม่น้ำ (alluvium sands)	10 - 800
ดินทรายปนดินเหนียวมีน้ำเค็มแทรกแอ่งสกลนคร	1.3-7.8

รูปที่ 17 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินตะกอน
(เพียตาสาตรักซ์, 2549)

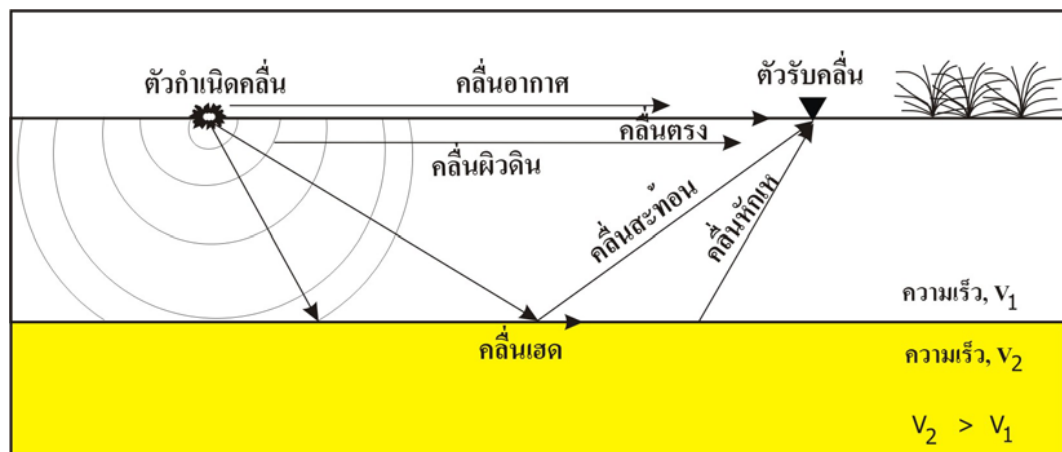


รูปที่ 18 ภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบของสภาพใต้ผิวดิน
แสดงรายละเอียดการสำรวจและการแปลความหมาย

2) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน (Seismic survey)

การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน เป็นการสำรวจโดยอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elasticity) และความหนาแน่น (Density) ของชั้นดินชั้นหิน โดยการวัดค่าเวลาที่คลื่นไหวสะเทือนเคลื่อนที่สะท้อนหรือหักเหกลับมายังผิวดิน การสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนจำแนกตามคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic refraction method) และการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน (Seismic Reflection method) ดังแสดงในรูปที่ 19 นอกจากนี้ มีการสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนอีกประเภทที่ใช้ประโยชน์

จากคลื่นผิวดิน (Surface Wave) ชนิดคลื่นเรลีย์ (Rayleigh wave) มาใช้ในการวิเคราะห์ เรียกว่า การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multichannel Analysis Of Surface Wave, MASW) (เพียตาสา สตรักซ์, 2550) โดยในคู่มือจะกล่าวถึงการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห และการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ เนื่องจากมีความเหมาะสมและสะดวกสำหรับการสำรวจฐานรากระดับตื้นของโครงสร้างทางวิศวกรรม



รูปที่ 19 การเคลื่อนที่ของคลื่นไหวสะเทือน (เพียตาสา สตรักซ์, 2550)

2.1) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction method)

การสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห เริ่มต้นด้วยการให้กำเนิดคลื่นไหวสะเทือน จากนั้นคลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างชั้นดินชั้นหิน ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่งผลให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป โดยคลื่นส่วนหนึ่งจะเกิดการหักเหและเคลื่อนที่ไปยังตัวกลางที่สอง ในขณะที่คลื่นอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ขนานไปกับรอยต่อของชั้นดินและเดินทางกลับสู่ผิวดิน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางของคลื่นกับระยะทางจากจุดกำเนิดคลื่นถึงตัวรับสัญญาณ และสามารถนำมาคำนวณหาความลึกของรอยต่อระหว่างที่ทำให้คลื่นเกิดการหักเห (เพียตาสา สตรักซ์, 2550 และอัมพรค์ วรรณโณม, 2551)

2.1.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

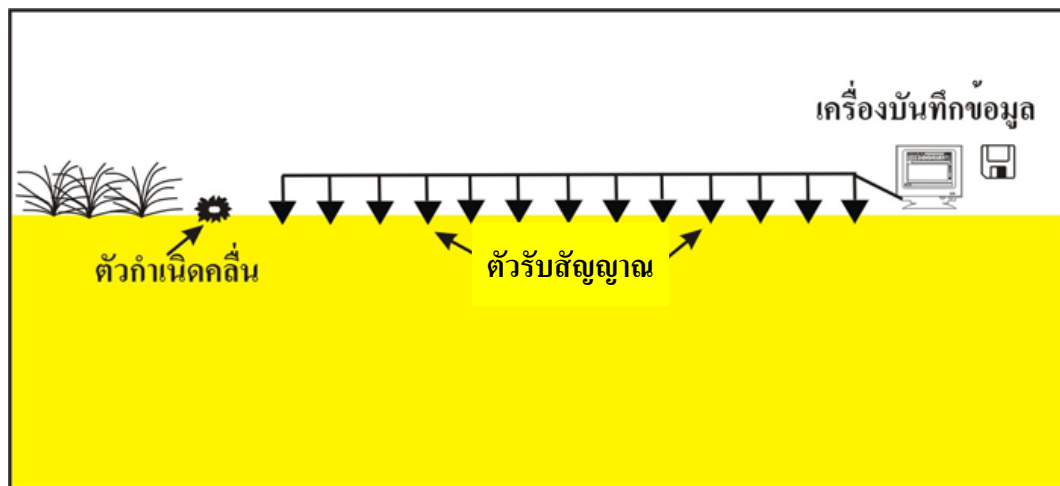
- (1) ตัวกำเนิดคลื่น (Seismic source) เช่น ค้อน ระเบิด เป็นต้น
- (2) ตัวรับสัญญาณ (Receiver) หรือจีโอโฟน (Geophone)
- (3) เครื่องบันทึกข้อมูล (Recorder) หรือเครื่องบันทึกสัญญาณ (Seismograph) เป็นเครื่องมือที่ต่อกับตัวรับสัญญาณทุกตัวที่ใช้ในการสำรวจด้วยสายเคเบิล

2.1.2) วิธีการสำรวจ

การวางแผนสำรวจในภาคสนามต้องครอบคลุมความยาว 1.2 เท่าของความยาวเขื่อนและอาคารประกอบ ครอบคลุมความลึก 1 เท่าของความสูงเขื่อนและอาคารประกอบ (กรมชลประทาน, 2553) มีวิธีการสำรวจ ดังนี้

(1) วางตัวรับสัญญาณให้มีระยะห่างเท่ากัน และเชื่อมต่อตัวรับสัญญาณกับสายเคเบิลไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 20

(2) ให้กำเนิดคลื่นไหวสะเทือนจากตัวกำเนิดคลื่น เมื่อตัวรับสัญญาณตรวจจับคลื่นที่หักเหขึ้นมาได้ จะส่งคลื่นสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล พร้อมตรวจวัดเวลาที่คลื่นไหวสะเทือนใช้ในการเดินทางจากตัวกำเนิดคลื่นไปถึงตัวรับสัญญาณ แล้วส่งไปจัดเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ พร้อมประมวลผล



รูปที่ 20 วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน

(ดัดแปลงจาก เพียงตา สาทรักษ์, 2550)

2.1.3) การประมวลผลและการแปลความหมาย

(1) การประมวลผลและแปลความหมายการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห ใช้ได้ในกรณีความเร็วคลื่นของชั้นดินชั้นหนึ่งที่ลึกลงไปมีค่าสูงกว่าชั้นที่อยู่ตื้นกว่าเท่านั้น

(2) การประมวลผลใช้วิธีการคำนวณความเร็วคลื่นไหวสะเทือนแบบ Reciprocal-time method (กรมชลประทาน, 2553)

(3) กรณีชั้นดินชั้นหีนวางตัวเป็นแนวระนาบ จะประมวลผลด้วยวิธีเวลาอินเตอร์เซพ (Intercept-time method) (เพียงตา สาทรักษ์, 2550)

(4) กรณีชั้นดินชั้นหีนมีผิวขรุขระ จะแปลความหมายด้วยวิธีแบบผิวขรุขระ หากพบเป็นเส้นตรง สามารถแปลความหมายแบบระนาบ แต่ถ้าพบแบบโค้งไปมา ให้พิจารณา

ลักษณะความสูง-ต่ำของภูมิประเทศก่อน เพื่อทำการปรับแก้ค่าความสูง-ต่ำของภูมิประเทศ หากยังพบว่าเส้นโค้งไปมา แสดงว่ารอยต่อระหว่างชั้นดินชั้นหินมีลักษณะเป็นผิวขรุขระ

(5) แปลความหมายข้อมูลสภาพใต้ผิวดินร่วมกับข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลหลุมเจาะ และแบบแปลนการก่อสร้าง ทั้งนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ด้วยวิธีการเจาะสำรวจ

(6) แสดงความหนา ระดับความลึกของชั้นหินฐานราก และบริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นที่ผิดปกติในภาพตัดขวาง โดยมีค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือนกำกับ ในมาตราส่วน 1 : 500 (ตั้ง : ราบ = 1 : 1) พร้อมแสดงข้อมูลด้านเวลาที่คลื่นแรกเดินทางมาถึง (กรมชลประทาน, 2553)

2.2) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multichannel Analysis Of Surface Wave, MASW)

การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ เป็นการสำรวจโดยนำคลื่นผิวดินชนิดคลื่นเรย์ลี ที่มีคุณสมบัติการกระจายตัว (Dispersion property) มาวิเคราะห์และแปลงคลื่นผิวดินให้เป็นความเร็วคลื่นเฉือน (Park et al., 1999)

2.2.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

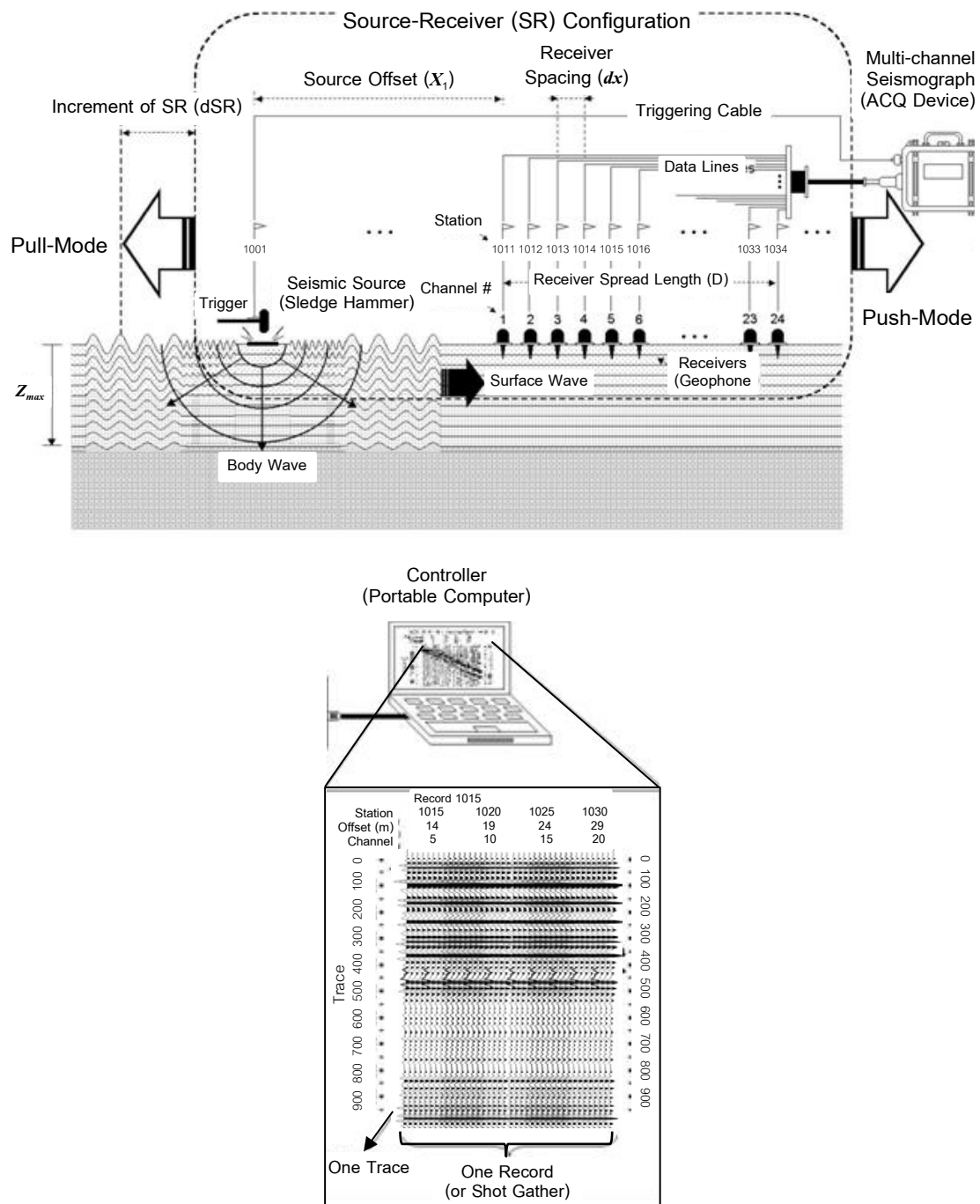
เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจเหมือนกับการสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหและแบบสะท้อน ประกอบด้วย ตัวกำเนิดคลื่น ตัวรับสัญญาณ และเครื่องบันทึกข้อมูล แตกต่างกันที่วิธีนี้ใช้ตัวรับสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ อยู่ในช่วง 4 ถึง 8 เฮิรตซ์

2.2.2) วิธีการสำรวจ

การวางแผนสำรวจในภาคสนามต้องครอบคลุมความยาว 1.2 เท่าของแนวสำรวจ ครอบคลุมความลึก 2 เท่าของความสูงเขื่อนและอาคารประกอบ (กรมชลประทาน, 2553) มีวิธีการสำรวจ ดังนี้

(1) วางตัวรับสัญญาณ (Receiver) ให้มีระยะห่างเท่ากัน และเชื่อมต่อตัวรับสัญญาณกับสายเคเบิลไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล (Seismograph)

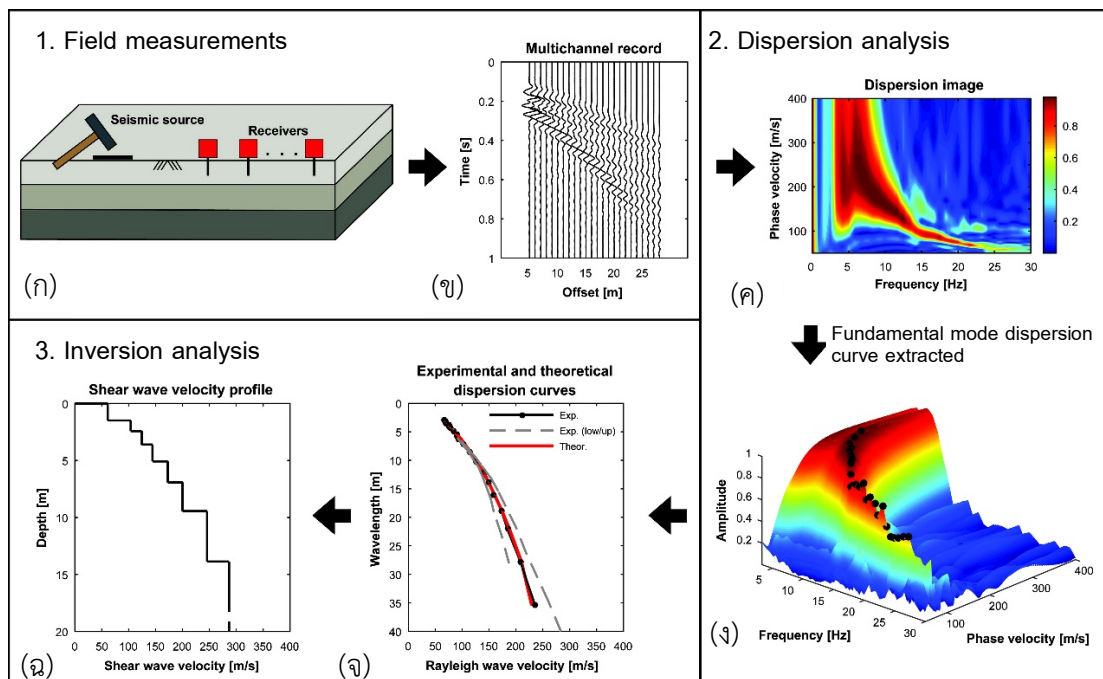
(2) ให้กำเนิดคลื่นผิวดินจากตัวกำเนิดคลื่น (Seismic source) เมื่อตัวรับสัญญาณตรวจจับสัญญาณได้ จะส่งคลื่นสัญญาณมายังเครื่องบันทึกข้อมูล แล้วส่งไปจัดเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ พร้อมประมวลผลออกมาเป็นกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 วิธีการสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ
(Park Seismic, n.d.)

2.2.3) การประมวลผลและการแปลความหมาย

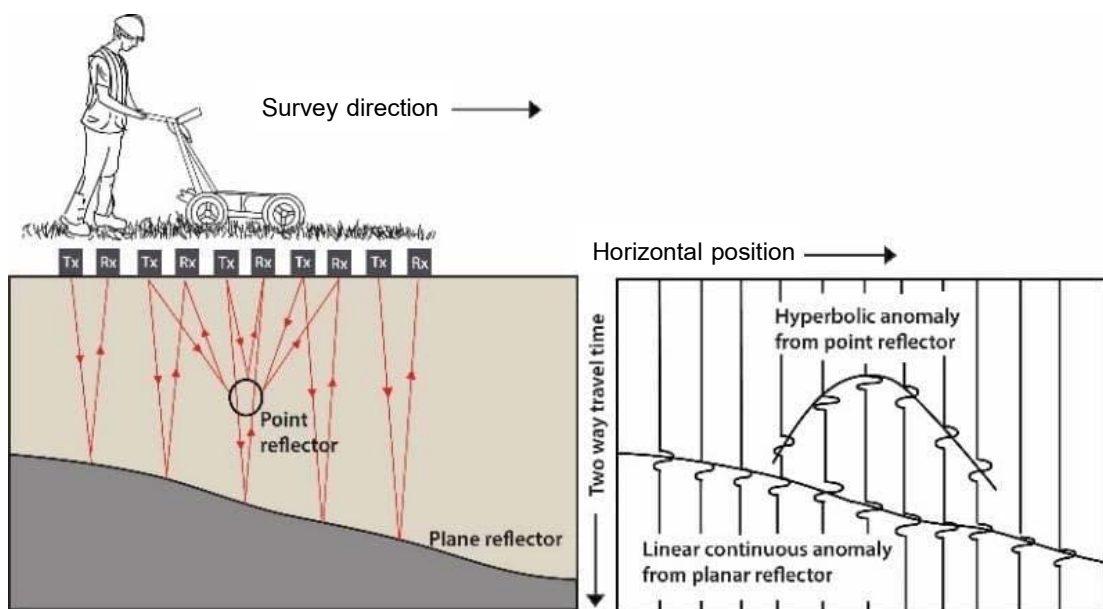
- (1) นำข้อมูลการสำรวจเบื้องต้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับตำแหน่งของตัวรับสัญญาณ มากำหนดค่าตัวแปรให้เหมาะสมกับข้อมูลแต่ละชุด (Park et al., 1999) ดังแสดงในรูปที่ 22 (ก) และ (ข)
- (2) วิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นผิวดิน โดยการเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในกราฟระหว่างความถี่และความเร็วคลื่นผิวดิน ด้วยกระบวนการ Fourier Transform เรียกว่า กราฟการกระจายตัว (Dispersion curve) โดยการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณจะพิจารณา Fundamental mode ของคลื่นผิวดินเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 22 (ค) และ (ง)
- (3) แปลงคลื่นผิวดินให้เป็นความเร็วคลื่นเฉือนจากกราฟการกระจายตัว จะได้กราฟระหว่างความเร็วคลื่นเรลีย์กับความยาวคลื่น ที่แสดงเส้นโค้งการกระจายตัวตามทฤษฎีที่สอดคล้องกับเส้นโค้งที่วัดได้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 22 (จ) จากนั้นคำนวณย้อนกลับ (Inversion) จะได้กราฟแสดงความเร็วคลื่นเฉือนกับความลึก (Shear wave velocity profile) ดังแสดงในรูปที่ 22 (ฉ)
- (4) แปลความหมายข้อมูลสภาพใต้ผิวดินร่วมกับข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลหลุมเจาะ และแบบแปลนการก่อสร้าง ทั้งนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ด้วยวิธีการเจาะสำรวจ
- (5) แสดงความหนา ระดับความลึกของชั้นหินฐานราก โครงสร้างทางธรณีวิทยาในภาพตัดขวาง โดยมีค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือนกำกับ ในมาตราส่วนที่เหมาะสม



รูปที่ 22 การประมวลผลการสำรวจโดยวิธีคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ
 (Olafsdottir, 2017)

3) การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึก (Ground Penetration Radar, GPR)

การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึกเป็นการสำรวจโดยการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics, EM) ความถี่สูงลงไปใต้ผิวดินด้วยความถี่ที่ผ่านเสาอากาศ (Antenna) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่และกระทบกับชั้นดินชั้นหินที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน คลื่นจะสะท้อนกลับมายังผิวดิน และตรวจวัดโดยอุปกรณ์รับสัญญาณ โดยวัตถุที่เป็นฉนวนหรือไม่นำไฟฟ้า เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดจะมีค่าคงตัวทางไฟฟ้า เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสามารถในการทะลุทะลวงเข้าสู่ตัวกลางได้น้อย จึงเหมาะสำหรับการสำรวจในระดับตื้น ที่ต้องการความละเอียดในการสำรวจสูง ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 การสำรวจและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึก

(Asia Testing Equipment, n.d.)

3.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

3.1.1) ตัวส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Transmitting antenna) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเสาอากาศในรูปแบบสัญญาณเรดาร์ชนิดคลื่นความถี่ หน่วยเมกะเฮิรตซ์ (MHz) ด้วยความถี่สูงที่ ลงสู่ใต้ผิวดิน

3.1.2) ตัวรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Receiving antenna) ทำหน้าที่รับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากผิวดิน

3.1.3) เครื่องบันทึกข้อมูล (Recorder)

3.1.4) แบตเตอรี่

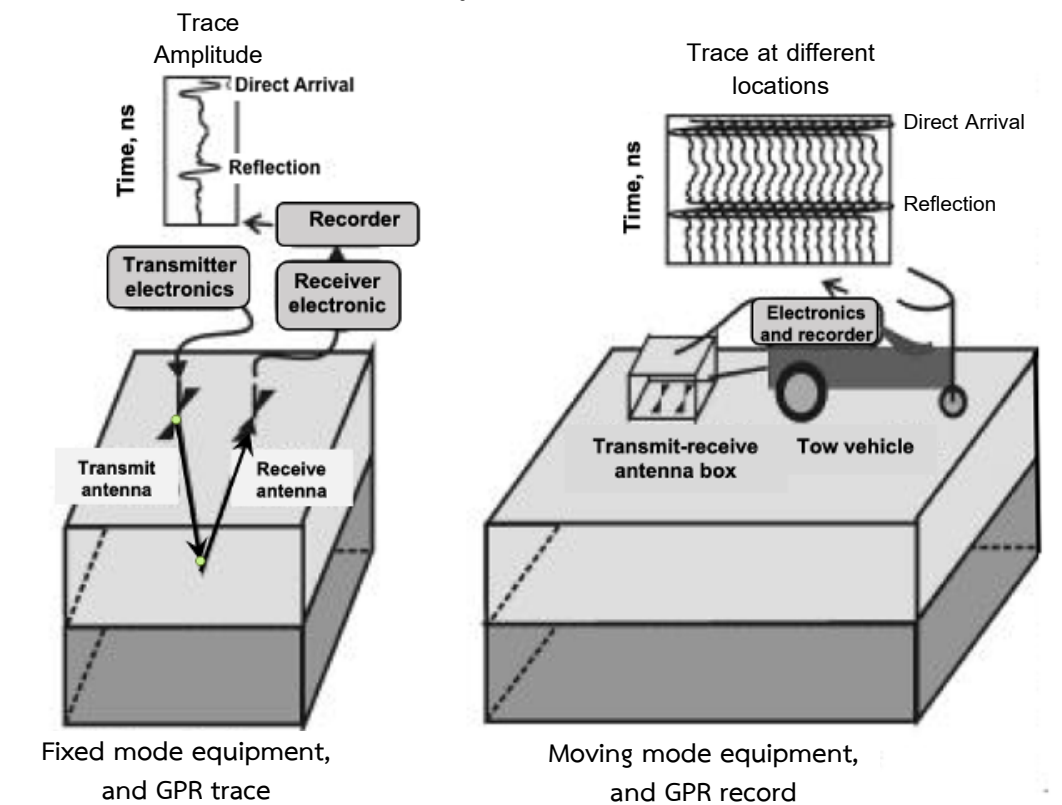
3.2) วิธีการสำรวจ

3.2.1) ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปได้ผิวดินด้วยความถี่คงที่

3.2.2) ตัวรับสัญญาณจะรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากผิวดิน และประมวลผลที่เครื่องบันทึกข้อมูล พร้อมแสดงผลการสำรวจ

เครื่องมือสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึกสามารถทำการสำรวจได้ 2 รูปแบบ คือ แบบติดตั้งอยู่กับที่ ซึ่งผลการสำรวจจะแสดง ณ ตำแหน่งที่สำรวจเพียงจุดเดียว และแบบเคลื่อนที่ ที่สามารถแสดงผลการสำรวจได้ทันที (Real-time monitoring) สามารถสำรวจได้ทั้งรูปแบบลากหรือติดล้อ ดังแสดงในรูปที่ 24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

(ก) วิธีการสำรวจและผลการสำรวจแบบอยู่กับที่ (ข) วิธีการสำรวจและผลการสำรวจแบบเคลื่อนที่



รูปที่ 24 วิธีการสำรวจและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีเรดาร์หยั่งลึกแบบอยู่กับที่และแบบเคลื่อนที่
 (Jeffrey J. Daniels, 2000)

3.3) การประมวลผลและการแปลความหมาย

การประมวลผลควรปรับแก้ค่าความสูง-ต่ำของภูมิประเทศ และกำจัดคลื่นรบกวน ด้วยวิธีการกรองแบบความถี่และจำนวนลูกคลื่น จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล และแปลความหมายข้อมูลสภาพใต้ผิวดินร่วมกับข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลหลุมเจาะ และแบบแปลนการก่อสร้าง ทั้งนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ด้วยการเจาะสำรวจ

3.2.2 การสำรวจธรณีวิทยาและปฐพีกลศาสตร์ใต้ผิวดิน (Subsurface geological exploration)

การสำรวจธรณีวิทยาและปฐพีกลศาสตร์ใต้ผิวดินเป็นการสำรวจข้อมูลทางธรณีวิทยาและปฐพีวิทยาจากปฐพีกลศาสตร์ใต้ผิวดินที่ไม่ปรากฏจากการสำรวจธรณีวิทยาพื้นผิว ด้วยวิธีการเจาะสำรวจหรือขุดบ่อสำรวจ เพื่อประเมินลักษณะชั้นดินชั้นหิน ความหนา โครงสร้างใต้ผิวดิน การรับน้ำหนัก การรื้อซึม รวมถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชั้นดินและชั้นหินฐานราก เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบวิศวกรรมฐานราก ประกอบด้วย การเจาะสำรวจธรณีวิทยาฐานราก และการเจาะสำรวจแหล่งวัสดุก่อสร้าง รายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากคู่มือการสำรวจและทดสอบด้านวิศวกรรมธรณีวิทยา (2546) และเอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรช่างสำรวจเพื่อการออกแบบโครงการพัฒนาและอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำ (2560) ของกรมทรัพยากรน้ำ

การเจาะสำรวจเพื่อรองรับการออกแบบระบบกระจายน้ำขึ้นอยู่กับการออกแบบชนิดหรือรูปแบบระบบกระจายน้ำที่จะก่อสร้าง เช่น ระบบคลอง คลองลาดคอนกรีต หรือระบบท่อ เป็นต้น จากนั้นกำหนดวิธีการเจาะสำรวจ จำนวนหลุมเจาะ และความลึกการเจาะสำรวจให้เหมาะสม

การเจาะสำรวจธรณีวิทยาฐานราก ประกอบด้วย การตอกทดสอบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) และการทดสอบอัตราการรื้อซึม (Permeability test) โดยจะกล่าวในลำดับถัดไปในบทที่ 4 การทดสอบในภาคสนาม

การเจาะสำรวจแหล่งวัสดุก่อสร้าง ประกอบด้วย การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน (Hand auger) การเจาะแบบฉีดล้าง (Wash boring) และการขุดบ่อทดสอบ (Test pit) โดยมีรายละเอียดการเจาะสำรวจ ดังนี้

1) การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน (Hand auger)

การเจาะด้วยสว่านมือหมุนเป็นวิธีการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินที่ง่ายที่สุด ความลึกของการเจาะขึ้นอยู่กับขนาดของดินก้อนที่ใหญ่ที่สุด ระดับน้ำใต้ดิน และขนาดของสว่านมือหมุน เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดดิน ความหนา และการกระจายตัวของชั้นดิน โดยอาศัยแรงคนในการกดและหมุน พร้อมเก็บตัวอย่างดินไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed sample) ทำให้ไม่สามารถหาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงหรือการทรุดตัวของดินได้ เนื่องจากโครงสร้างดินถูกทำลายด้วยสว่านมือหมุน โดยการออกแบบระบบกระจายน้ำควรทำการเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุนตามแนวคลอง ลำน้ำธรรมชาติ แนวท่อส่งน้ำ และแนวถนน โดยแต่ละหลุมควรมีระยะห่างประมาณ 300 - 500 เมตร ความลึกประมาณ 3 - 5 เมตร นอกจากนี้ บริเวณหอดึงสูง และอาคารสถานีสูบน้ำ ความลึกของการเจาะควรเท่ากับความสูงของอาคาร หรือไม่น้อยกว่า 4 เมตร หรือความลึกถึงชั้นหิน จำนวนหลุมเจาะไม่น้อยกว่า 3 หลุม ทั้งนี้ ควรเก็บตัวอย่างดินทุก ๆ 1 เมตร อย่างน้อย 2 กิโลกรัม เพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

1.1.1) กระบอกรั่วเจาะ (Auger) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 3 - 4 นิ้ว ความยาวประมาณ 45 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 25

1.1.2) ก้านเจาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 1 นิ้ว ความยาวท่อนละ 1 เมตร มีเกลียวและข้อต่อหัว-ท้าย

1.1.3) กำนันหมื่นพร้อมข้อต่อ

1.1.4) ประแจคอกม้า

1.1.5) อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง เช่น ถังพลาสติก กระสอบ ยางรัด เชือก ปากกา ฯลฯ



รูปที่ 25 อุปกรณ์สำหรับเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน

(<https://www.enviroequipment.com/product/stainless-steel-325-hand-auger-rental>, Retrieved September 15, 2023)

1.2) วิธีการเจาะสำรวจ

1.2.1) ประกอบกระบอกหัวเจาะเข้ากับก้านเจาะและก้านหมุน โดยใช้ประแจค้อน
 ไม้ช่วยหมุนให้แน่น

1.2.2) ใช้แรงงานคน 2 - 3 คน ออกแรงกดและหมุนให้กระบอกหัวเจาะผ่านเข้าไปในชั้นดิน เมื่อดินเต็มกระบอกจึงถอนก้านเจาะขึ้นมา และเทดินออกมากองเรียงไว้ตามลำดับความลึก ในขณะที่เดียวกันนักธรณีวิทยาจะตรวจสอบดิน ดังแสดงในรูปที่ 26 พร้อมบันทึกความลึกเจาะและบรรยายลักษณะดินแต่ละชั้นจำแนกตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS)

1.2.3) การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุนเหมาะสำหรับการเจาะสำรวจดิน
ละเอียด ร่วน หลวม หรือดินเหนียวที่เปื่อย โดยทั่วไปไม่ควรใส่น้ำลงในหลุม แต่กรณีดินแห้งหรือแข็ง
มาก ๆ หรือดินทราย อาจใส่น้ำลงไปได้เล็กน้อย เพื่อช่วยให้เจาะง่ายขึ้น สำหรับดินที่มีก้อนกรวด
มักเจาะลำบาก ต้องใช้สว่านมือหมุนขนาดใหญ่

1.2.4) ปฏิบัติงานจนถึงความลึกที่กำหนด หรือถึงชั้นดินแน่น ชั้นหิน หรือถึงระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อาจทำให้หลุมพังจนไม่สามารถเจาะต่อไปได้

1.2.5) หากต้องเก็บตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติ ให้รวมกองดินชนิดและชั้นเดียวกันเข้าด้วยกัน จากนั้นผสมให้เข้ากัน แล้วแบ่งตัวอย่างให้ได้ปริมาณตามต้องการ โดยวิธีแบ่งสี่ (Quartering) และบันทึกชื่อโครงการ ตำแหน่งที่ตั้ง ชื่อหลุม ระดับความลึกที่เก็บ สี และชนิดดิน ติดไว้กับถุงใส่ตัวอย่างให้แน่นหนา และมองเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 26 การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน

1.3) การรายงานผล

บรรยายลักษณะชนิดดิน สีของดิน ขนาดเม็ดดิน ความเหนียว ความชื้นในดิน (Moisture) ความชื้นเหลว (Consistency) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ตลอดจนความลึกของชั้นดินในช่วงต่าง ๆ จนถึงก้นหลุม โดยบันทึกข้อมูลตามแบบฟอร์มในภาคผนวก Geologic log of test pit or auger hole

2) การเจาะดินแบบฉีดล้าง (Wash boring)

การเจาะดินแบบฉีดล้างเป็นการเจาะโดยใช้แรงดันของน้ำฉีดอัดผ่านก้านเจาะลงไป ที่ก้นหลุมด้วยปั้มน้ำดันแรงสูง พร้อมกับการกระแทกหรือปั่น เพื่อทำลายโครงสร้างของดิน ทำให้ดิน หลวมและหลุดแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นน้ำจะพัดพาเอาดินขึ้นมาตามผนังหลุมเจาะ พร้อมตอก ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของชั้นดิน ด้วยวิธี Standard Penetration Test, SPT เพื่อประเมินกำลังรับ น้ำหนักของชั้นดินบริเวณจุดก่อสร้างอาคารบังคับน้ำ จำนวนหลุมเจาะต้องไม่น้อยกว่า 1 หลุมต่อ 1 โครงสร้าง วิธีนี้ต้องอาศัยสามขา (Tripod) เครื่องก๊ว (Winch) และปั้มน้ำ กรณีชั้นดินเหนียวอ่อน จำเป็นต้องใส่ท่อกรูหรือท่อกันพัง (Casing) ป้องกันผนังหลุมเจาะพัง และกรณีเป็นชั้นทราย จำเป็นต้องผสมเบนทอนาइट (Bentonite) ลงไปในน้ำ ป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะ การเจาะ แบบฉีดล้างเป็นหนึ่งในวิธีการเจาะสำรวจดินที่ได้รับความนิยม เพราะสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว

2.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

2.1.1) เครื่องเจาะสำรวจแบบฉีดล้าง ดังแสดงในรูปที่ 27

2.1.2) เครื่องก๊ว (Winch) พร้อมโครงสามขา (Tripod)

2.1.3) เครื่องสูบน้ำหรือปั้มน้ำ (Pump) พร้อมอุปกรณ์ ได้แก่ แกนหมุน (Swivel)

สายส่งน้ำ (Water hose) และข้อต่อสามทาง

2.1.4) ก้านเจาะ (Rod)

2.1.5) หัวเจาะ (Drilling bits)

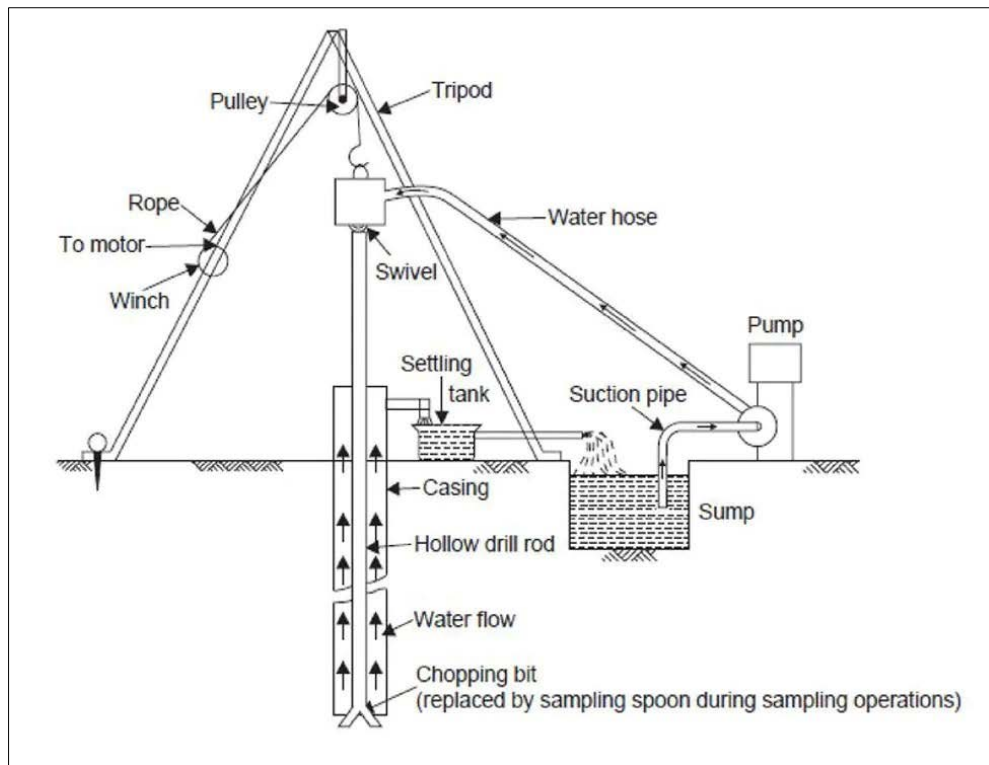
2.1.6) ถังตกตะกอน (Setting tank)

2.1.7) ท่อกรูหรือท่อกันพัง (Casing)

2.1.8) ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่ ประแจค้อนม้า ขนาด 18 นิ้ว หรือ 24 นิ้ว

ชุดประแจปากตาย ไชควง ฯลฯ

2.1.9) วัสดุที่ใช้ในงานเจาะ ได้แก่ เบนทอนาइटชนิดผง เชือกมะนิลา ลวดสลิงชนิด อ่อน น้ำสะอาด น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันหล่อลื่น ถุงพลาสติกสำหรับเก็บรักษาตัวอย่างดิน ขวดพลาสติกสำหรับเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ



รูปที่ 27 กระบวนการเจาะแบบฉีดล้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะ (EXE., n.d.)

2.2) วิธีการเจาะสำรวจ

2.2.1) การเจาะวิธีนี้จำเป็นต้องมีการป้องกันผนังหลุมเจาะพังด้วยการตอกปลอกเหล็กลงไปในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน และในกรณีที่เจาะผ่านชั้นทราย จำเป็นต้องอาศัยเบนทอนไนด์ช่วยป้องกันการพังทลายของหลุม

2.2.2) ทำการฉีดอัดน้ำผ่านก้านเจาะลงไปที่ก้นหลุมเจาะด้วยปั้มน้ำแรงดันสูงและเป่าออกมาที่หัวเจาะกระแทกบดดินให้แตกย่อยออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

2.2.3) เมื่อกระแทกดินเป็นชิ้นเล็ก ๆ น้ำจะสามารถพัดพาเอาดินชิ้นเล็ก ๆ ขึ้นมาตามผนังหลุมเจาะ ดินเหล่านั้นจะไหลไปลงบ่อตกตะกอนข้างหลุมเจาะ เพื่อเป็นการกรองเม็ดดินหยาบ (Coarse grain soil)

2.2.4) น้ำจะถูกสูบกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเจาะสำรวจ ผู้สำรวจสามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของชั้นดินได้จากความแตกต่างของเศษหิน ทราย และสีของน้ำที่ล้นปากหลุมขึ้นมา พร้อมสังเกตการจับยึดของชั้นดินก้นหลุมด้วยสัมผัสจากการกระทุ้งดินก้นหลุมแต่ละครั้ง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน ส่วนการสังเกตเศษหิน ทราย และสีของน้ำที่ล้นขึ้นมา จะช่วยในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินได้อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น โดยเฉพาะกรณีที่ใช้น้ำโคลนผสมเบนทอนไนด์จะทำให้การจำแนกชั้นดิน โดยดูจากสีน้ำทำได้ยากขึ้น

2.3) การรายงานผล

บรรยายลักษณะชนิดดิน สีของดิน ขนาดเม็ดดิน ความเหนียว ความชื้นในดิน (Moisture) ความชื้นเหลว (Consistency) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ตลอดจนความลึกของชั้นดินในช่วงต่าง ๆ จนถึงกันหลุม โดยบันทึกข้อมูลตามแบบฟอร์มในภาคผนวก **Geologic log of test pit or auger hole**

3) การขุดบ่อดทดสอบ (Test pit)

การขุดบ่อดทดสอบเป็นการสำรวจข้อมูลชั้นดินระดับตื้น เพื่อพิจารณาแหล่งวัสดุสำหรับงานดินถม งานเขื่อนดิน และงานคันทาง เป็นวิธีการสำรวจที่ง่ายและได้รายละเอียดของข้อมูลที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสามารถมองเห็นลักษณะของชั้นดินในสภาพธรรมชาติ เหมาะสำหรับการสำรวจชั้นดินที่มีก้อนหินขนาดใหญ่ มีกรวดปนหรือหินผุ และสามารถเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) ได้ เพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

3.1.1) เครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจ

- (1) อุปกรณ์ขุดดินและตักดิน ได้แก่ จอบ เสียม อีเตอร์ บั้งก็่ ถังตักดิน เป็นต้น
- (2) เชือก
- (3) อุปกรณ์ใส่ตัวอย่าง

3.1.2) วิธีการเจาะสำรวจ

- (1) ขุดดินให้เป็นหลุมรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดประมาณ 1.5 X 1.5 เมตร
- (2) นำดินขึ้นมากองเรียงไว้ตามลำดับความลึก และในขณะเดียวกันนักธรณีวิทยาจะตรวจสอบและบันทึก พร้อมจำแนกลักษณะและชนิดของดินโดยวิธีตาเปล่า
- (3) ปฏิบัติงานตามขั้นตอนที่ (1) ถึง (2) จนกว่าจะถึงความลึกที่กำหนด หรือดินแน่นมาก หรือถึงชั้นหิน หรือถึงระดับน้ำใต้ดินที่อาจทำให้หลุมพัง จนไม่สามารถเจาะต่อไปได้
- (4) หากต้องเก็บตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ให้เลือกชั้นดินที่ต้องการ แล้วใช้จอบเปิดผิวหน้าดินของผนังบ่อดทุกด้าน แล้วจึงขุดเก็บตัวอย่างตามจำนวนที่ต้องการ โดยเก็บเฉลี่ยให้เท่ากันทุกด้าน จากนั้นบันทึกชื่อโครงการ ตำแหน่งที่ตั้ง ชื่อหลุม ระดับความลึกที่เก็บ สี และชนิดดิน ติดไว้กับถุงใส่ตัวอย่างให้แน่นหนาและมองเห็นได้ชัดเจน

การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ เมื่อขุดบ่อดถึงระยะความลึกที่จะเก็บตัวอย่างแล้วให้ขุดต่อไปโดยเจาะเป็นร่องโดยรอบ เหลือเนื้อดินบริเวณกลางหลุมไว้ขนาดเท่าที่ต้องการ จากนั้นใช้ผ้าขาวบางพันหุ้มโดยรอบแท่งดิน เคลือบด้วยซีเมนต์หรือพาราฟิน ครอบด้วยลึงไม้ แล้วจึงตัดฐานของแท่งดิน จากนั้นนำตัวอย่างดินขึ้นมาเคลือบปิดหน้าและโดยรอบแท่งตัวอย่างด้วยผ้าขาวบาง และซีเมนต์หรือพาราฟินอีกชั้นหนึ่ง

3.1.3) การรายงานผล

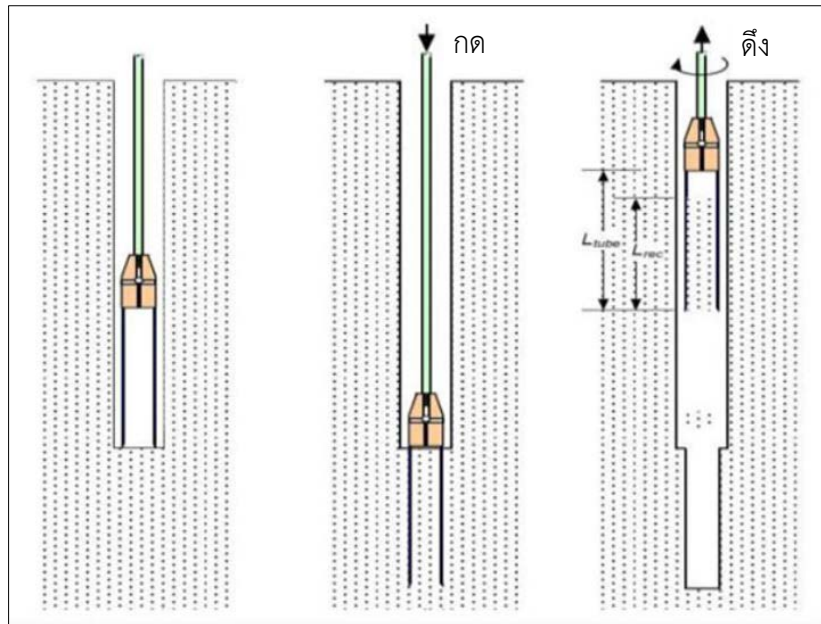
บรรยายลักษณะชนิดดิน สีของดิน ขนาดเม็ดดิน ความเหนียว ความชื้นในดิน (Moisture) ความชื้นเหลว (Consistency) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ตลอดจนความลึกของชั้นดินในช่วงต่าง ๆ จนถึงก้นหลุม โดยบันทึกข้อมูลตามแบบฟอร์มในภาคผนวก
Geologic log of test pit or auger hole

3.2.3 การเก็บตัวอย่างดิน (Soil sampling)

การเก็บตัวอย่างดิน สามารถจำแนกตามลักษณะของตัวอย่างดินที่เก็บได้ มี 2 ลักษณะ คือ การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sampling) และการเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed sampling) มีรายละเอียด ดังนี้

1) การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sampling)

การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D-1587 ตัวอย่างดินที่ถูกเก็บจะมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพตามธรรมชาติมากที่สุด เหมาะสำหรับการเก็บตัวอย่างชั้นดินอ่อน วิธีการเก็บตัวอย่างใช้กระบอกบาง (Thin wall tube sampler) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาวท่อนละ 29.5 นิ้ว ต่อเข้ากับปลายก้านเจาะ และกดกระบอกลงไปถึงระดับความลึกที่ต้องการ ตัวอย่างดินที่ได้จะคงสภาพโครงสร้างภายในไว้ จากนั้นบรรยายลักษณะดินด้วยสายตาโดยจำแนกตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS) และปิดปลายกระบอกทั้งสองด้านด้วยเทียไนหรือพาราฟิน (Paraffin) หลอมละลาย เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น พร้อมเขียนรายละเอียดโครงการ ชื่อหลุมเจาะ ระดับความลึกที่เก็บตัวอย่าง วันที่เจาะ เป็นต้น การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพเป็นการเก็บตัวอย่างดินที่มีคุณภาพที่สุด และสามารถนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการต่อไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพโดยใช้กระบอบอกบาง (EXE., 2019)

2) การเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed sampling)

การเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพ เป็นการเก็บตัวอย่างดินขณะที่ทำการตอกทดสอบมาตรฐาน (SPT) ทุก ๆ ระยะ 1.5 เมตร วิธีนี้เหมาะสำหรับชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทราย วิธีการเก็บตัวอย่างใช้กระบอบอกผ่า (Split spoon sampler) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว ภายใน 1 นิ้ว ความยาวท่อนละ 0.76 เมตร ตัวอย่างดินที่ได้จะเปลี่ยนสภาพเนื่องจากแรงกระแทกจากการตอก ทำให้โครงสร้างภายในของดินไม่คงสภาพและเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 29 จากนั้นบรรยายลักษณะดินด้วยสายตาโดยจำแนกตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS) ก่อนเก็บตัวอย่างใส่ภาชนะป้องกันการสูญเสียความชื้น พร้อมเขียนรายละเอียดโครงการ ชื่อหลุมเจาะ ระดับความลึกที่เก็บตัวอย่าง วันที่เจาะ เป็นต้น เพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป



รูปที่ 29 การเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพโดยใช้กระบอบอกผ่า (EXE., 2019)

บทที่ 4

การทดสอบในภาคสนาม

การทดสอบในภาคสนามเป็นวิธีการตรวจสอบและประเมินคุณสมบัติของชั้นดินชั้นหินในพื้นที่โครงการระหว่างกระบวนการเจาะสำรวจ เช่น การประเมินกำลังรับน้ำหนักของดิน การหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น ข้อดีของการทดสอบในภาคสนาม คือ ชั้นดินยังคงสภาพตามธรรมชาติ และได้รับการรบกวนน้อยที่สุด รวมถึงตรวจสอบลักษณะตัวอย่างดินและหินด้วยสายตา การสัมผัสด้วยมือ บางครั้งอาจใช้ลิ่มสัมผัสหรือน้ำ หรือใช้พินกดเพื่อจำแนกเนื้อของดินละเอียด ซึ่งการทดสอบในภาคสนามโดยใช้เครื่องมืออย่างละเอียดเหมือนในห้องปฏิบัติการทำได้ยาก ดังนั้น ผลการทดสอบอาจมีความคลาดเคลื่อน จึงควรพิจารณาประกอบการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อความแม่นยำที่มากขึ้น โดยการทดสอบคุณสมบัติของดินในภาคสนาม มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของดินในภาคสนาม

ลำดับ	การทดสอบ	มาตรฐาน	ผลจากการทดสอบ	การประยุกต์ใช้ผลการทดสอบ
1	Soil classification	Unified Soil Classification System (USCS)	- ชนิดดิน - สัญลักษณ์กลุ่มดิน	
2	Standard Penetration Test, SPT	ASTM D1586-11	ค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N)	- Undrained shear strength (S_u) - Unconfined compressive strength (q_u) - Relative density - Angle of internal friction, ϕ - Bearing capacity - Ultimate pile capacity
3	Permeability test	USBR designation E-18	สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (K)	- คุณสมบัติของฐานราก - ออกแบบวัสดุกรอง (Filter)
4	Plate bearing test	AASHTO T 222-81	กำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน	การทรุดตัวของฐานรากคันดิน
5	Sand cone method	ASTM D 1556-00	ร้อยละการบดอัด (p_c)	ตรวจสอบคุณภาพการบดอัด

4.1 การจำแนกดินทางวิศวกรรม (Soil classification)

การจำแนกดินทางวิศวกรรมมีด้วยกันหลายวิธีและมีผู้เกี่ยวข้องกับดินอยู่หลากหลายสาขา จึงทำให้ระบบการจัดจำแนกประเภทของดินมีความแตกต่างกัน โดยคู่มือฉบับนี้ จะกล่าวถึงการจำแนกดินเบื้องต้นในภาคสนามด้วยตาเปล่า และการจำแนกดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่สามารถระบุชื่อและลักษณะของดินได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยจะกล่าวถึงการจำแนกประเภทของดินด้วยระบบยูนิไฟด์ (Unified Soil Classification System, USCS) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานวิศวกรรมฐานรากและงานดินถม

4.1.1 การจำแนกดินในภาคสนาม

การจำแนกดินในภาคสนามเป็นการจำแนกชนิดและส่วนประกอบของชั้นดิน (Soil type and material comprising soil bed) เบื้องต้นด้วยตาเปล่า มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อต้องการทราบชนิดของดินอย่างคร่าว ๆ โดยการดูผ่านตา การดมกลิ่น การสัมผัสด้วยมือหรือใช้อุปกรณ์อย่างง่าย เช่น ตะแกรง เป็นต้น พร้อมจดบันทึกรายละเอียดในภาคสนาม การบรรยายลักษณะดินด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการสังเกตสีของดิน จากสีหลักที่ปรากฏเพียง 1 ถึง 2 สี โดยสีของดินจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้น การตรวจสอบสีจึงต้องทำขณะที่ดินยังมีความชื้นตามธรรมชาติ สามารถเทียบสีได้จากสมุดเทียบสีดิน ดังแสดงในรูปที่ 30 จากนั้นจำแนกและบรรยายตัวอย่างดิน ตามขนาดเม็ดดินหยาบหรือละเอียด โดยสังเกตจากชนิดดินจำพวกหลัก (กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว) ดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 จากนั้นสังเกตส่วนผสมในดินและสิ่งเจือปนที่ติดมากับตัวอย่างดิน เช่น เหล็กออกไซด์ รากไม้ เปลือกหอย เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 7 และตารางที่ 8 การบรรยายลักษณะดิน ให้ระบุชนิดดิน สี ขนาด และสิ่งเจือปน เช่น Calcareous sand, white, fine to medium sand เป็นต้น ทั้งนี้ การบรรยายลักษณะดินด้วยตาเปล่าอาจมีข้อผิดพลาดได้ จึงต้องจำแนกดิน โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นข้อมูลที่สำคัญในการจำแนกดินอย่างละเอียดอีกขั้นตอนหนึ่ง



รูปที่ 30 สมุดเทียบสีดิน

(<https://www.tcg-plus.com/product/soil-color-book/>, Retrieved September 15, 2023)

ตารางที่ 5 การจำแนกประเภทดินเบื้องต้นด้วยตาเปล่าและการสัมผัส

ประเภทเม็ดทราย	รายละเอียดการจัดจำแนก
ดินเหนียว	นำตัวอย่างดินเปียกมาบีบ และปั้นเป็นก้อนกลมวางลงบนฝ่ามือซ้าย ใช้กำปั้นของมือขวา กระแทกข้อมือซ้ายเป็นการเขย่าตัวอย่างดิน ซึ่งกลิ้งอยู่ในฝ่ามือชั่วระยะเวลาหนึ่ง ก่อนตัวอย่างดินยังคงสภาพไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ผิว
ดินแป้ง (ทรายแป้ง)	ปฏิบัติเช่นเดียวกับดินเหนียว แต่ดินแป้งจะไม่มี ความเหนียวเมื่อปั้นเป็นก้อนกลมไว้ในฝ่ามือ เขย่าก้อนดินจะเปื่อยขึ้น มีน้ำเกิดที่ผิวก่อนตัวอย่างดิน
ทราย	ตัวอย่างทรายจะไม่จับกันเป็นก้อน สัมผัสจะมีความหยาบ จะมีความรู้สึกได้ว่าทรายละเอียดหรือทรายหยาบ

(ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2559)

ตารางที่ 6 ขนาดของเม็ดดินแต่ละชนิด ตามมาตรฐาน ASTM 422-63

ชนิดของดิน	ขนาดของเม็ดดิน (มิลลิเมตร)
กรวดมนใหญ่ (Boulder)	> 300
กรวดมนเล็ก (Cobble)	75 - 300
กรวด (Gravel)	4.75 - 75
ทรายหยาบ (Coarse sand)	2.00 - 4.75
ทรายหยาบปานกลาง (Medium sand)	0.425 - 2.00
ทรายละเอียด (Fine sand)	0.075 - 0.425
ทรายแป้ง (Silt)	0.002 - 0.075
ดินเหนียว (Clay)	< 0.002

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1969, และกรมโยธาธิการและผังเมือง, 2559)

ตารางที่ 7 ตัวอย่างระหว่างความหมายของสีกับส่วนผสมในดิน

สีของดิน	ส่วนผสมในดิน
สีดำ หรือน้ำตาลเข้ม	ดินที่มีอินทรีย์สารผสมอยู่
สีอมสีแดง	มีเหล็กออกไซด์ และมีคุณสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย
สีเหลือง หรือน้ำตาลอมเหลือง	มีธาตุเหล็ก และน้ำซึมผ่านได้ยาก
สีขาว	มีซิลิกา ปูน หรือสารประกอบอะลูมิเนียมผสมอยู่
สีน้ำเงินอมเทา และเทาปนเหลือง	ลักษณะของดินที่น้ำซึมผ่านได้ยาก

(ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2559)

ตารางที่ 8 ตัวอย่างสิ่งที่ปะปนมากับดิน

Decomposed Rock	หินผุ	Conglomerate	กรวดมน
Laterite	ลูกรัง	Pea Gravel	กรวดขนาดเมล็ดถั่ว
Calcareous	หินผุสีขาว	Decayed Wood	ไม้ผุ
Construction Debris	เศษวัสดุก่อสร้าง	Shell bits	เศษเปลือกหอย
Root	รากไม้	Mica sheet	แผ่นไมก้า
Bed rock	ชั้นหินพิศ	Hard pan	ชั้นดินดาน

(ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2559)

4.1.2 การจำแนกดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การจำแนกดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการทดสอบหาการกระจายขนาด
คละของเม็ดดินโดยวิธีตะแกรงร่อน (Sieve analysis) เพื่อจำแนกประเภทของดินด้วยระบบยูนิไฟด์
(USCS) จะใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษเป็นสัญลักษณ์แทนการเรียกชื่อกลุ่มดิน โดยแบ่งตามขนาดของ
เม็ดดินและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน แทนด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษ 2 ตัว ซึ่งตัวอักษรแต่
ละตัวมีความหมายดังแสดงใน**ตารางที่ 9** โดยพิจารณาจากรายละเอียด ดังนี้

1) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวแรกเป็นกลุ่มหลัก บอกลักษณะขนาดของเม็ดดิน ได้แก่ ดิน
เม็ดหยาบ เช่น กรวด (Gravel) และทราย (Sand) ดินเม็ดละเอียด เช่น ทรายแป้ง (Silt) ดินเหนียว
(Clay) เป็นต้น

2) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวที่ 2 เป็นกลุ่มย่อย สำหรับดินเม็ดหยาบแบ่งย่อยตามลักษณะ
การกระจายตัวของเม็ดดิน ดินเม็ดหยาบที่มีเม็ดคละหลายขนาด (Well graded) และเม็ดไม่คละ
เนื่องจากมีเม็ดขนาดเดียวกันมาก (Poorly graded) นอกจากนี้ ดินเม็ดละเอียดแบ่งย่อยตามการ
ทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบอร์ก (Atterberg's limits) เพื่อนำค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.)

ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) และดรรชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, P.I.) ของมวลดินมาเกี่ยวข้องในการจัดจำแนก เช่น ดินที่มีค่า L.L. และ P.I. สูง คือ High plasticity

ในขั้นตอนสุดท้ายจะมีตัวอักษรภาษาอังกฤษแทนการจำแนกประเภทของดิน 2 ตัว เช่น SW, CL, GP เป็นต้น หรือมีตัวอักษรภาษาอังกฤษ 4 ตัว กรณีที่มีความกำกวม เช่น ML-CL เป็นต้น โดยการจำแนกประเภทของดินเม็ดหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 10 และดินเม็ดละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 9 สัญลักษณ์ในการจำแนกประเภทของดิน ด้วยระบบยูนิไฟด์ (USCS)

ประเภท	สัญลักษณ์	ย่อมาจาก	ลักษณะดิน
ขนาดดินเม็ดหยาบ	G	Gravel	กรวด
	S	Sand	ทราย
ขนาดดินเม็ดละเอียด	M	Silt	ทรายแป้ง
	C	Clay	ดินเหนียว
	O	Organic	สารอินทรีย์
	Pt	Peat	สารอินทรีย์สูง
ลักษณะการกระจายตัวของดินเม็ดหยาบ	W	Well graded	มีขนาด คละกันดี
	P	Poorly graded	มีขนาด คละกันไม่ดี
ค่า Atterberg's limits ของดินเม็ดละเอียด	L	Low plasticity	Liquid Limit (L.L.) น้อยกว่า 50%
	H	High plasticity	Liquid Limit (L.L.) มากกว่า 50%

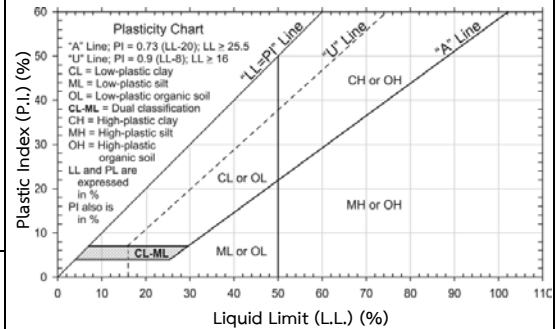
(ที่มา : ดัดแปลงจาก พรพจน์ ต้นแสง, 2554)

ตารางที่ 10 การจำแนกประเภทของดินเม็ดหยาบ ด้วยระบบยูนิไฟด์ (USCS)

การจำแนกทั่วไป		สัญลักษณ์ กลุ่มดิน	ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท	
ดินเม็ดหยาบ ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า หรือเท่ากับ 50%	กรวด ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่า หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของ ส่วนที่เป็นเม็ดหยาบ	GW	กรวดมีขนาดคละกันดี กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 12% คือ GM GC SM SC การจำแนกของดินโดยอาศัยร้อยละของดินพวกเม็ดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5% - 12% คาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว	C_u มากกว่า 4 C_c อยู่ระหว่าง 1 - 3
			กรวดมีขนาดคละกันไม่ดี กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี		ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท GW
		GP	กรวดมีขนาดคละกันดี กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี		Atterberg limits อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. < 4
			กรวดมีขนาดคละกันไม่ดี กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี		
		GM	กรวดมีทรายแป้งปน กรวด-ทราย-ทรายแป้งผสมกัน		Atterberg limits อยู่เหนือเส้น A หรือ P.I. > 7
			กรวดมีดินเหนียวปน กรวด-ทราย-ดินเหนียวผสมกัน		
	ทราย ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่า หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของ ส่วนที่เป็นเม็ดหยาบ	SW	ทรายมีขนาดคละกันดี ทรายนกรวดมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5% คือ GW GP SW SP การจำแนกของดินโดยอาศัยร้อยละของดินพวกเม็ดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5% - 12% คาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว	C_u มากกว่า 6 C_c อยู่ระหว่าง 1 - 3
			ทรายนกรวดมีขนาดคละกันดี ทรายนกรวดมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี		ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท SW
		SP	ทรายมีขนาดคละกันดี ทรายนกรวดมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี		Atterberg limits อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. < 4
			ทรายนกรวดมีขนาดคละกันไม่ดี ทรายนกรวดมีเม็ดละเอียดปน บ้าง หรือไม่มี		
		SM	ทรายมีทรายแป้งปน ทราย-ทรายแป้งผสมกัน		Atterberg limits อยู่เหนือเส้น A หรือ P.I. > 7
			ทรายมีดินเหนียวปน ทราย-ดินเหนียวผสมกัน		
	ทราย ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่า หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของ ส่วนที่เป็นเม็ดหยาบ	SC	ทรายมีทรายแป้งปน ทราย-ทรายแป้งผสมกัน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5% คือ GW GP SW SP การจำแนกของดินโดยอาศัยร้อยละของดินพวกเม็ดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5% - 12% คาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว	C_u มากกว่า 6 C_c อยู่ระหว่าง 1 - 3
			ทรายมีดินเหนียวปน ทราย-ดินเหนียวผสมกัน		ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท SW
		SM	ทรายมีทรายแป้งปน ทราย-ทรายแป้งผสมกัน		Atterberg limits อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. < 4
			ทรายมีดินเหนียวปน ทราย-ดินเหนียวผสมกัน		
		SC	ทรายมีทรายแป้งปน ทราย-ทรายแป้งผสมกัน		Atterberg limits อยู่เหนือเส้น A หรือ P.I. > 7
			ทรายมีดินเหนียวปน ทราย-ดินเหนียวผสมกัน		

ตารางที่ 11 การจำแนกประเภทของดินเม็ดละเอียด ด้วยระบบยูนิไฟด์ (USCS)

การจำแนก ทั่วไป	สัญลักษณ์ กลุ่มดิน	ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท
ดินเม็ดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 50%	ตะกอนทรายและดินเหนียว L.L. น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50	ML	ทรายแป้งอินทรีย์ ทรายละเอียดมาก หินฝุ่น ทราย ละเอียดปนทรายแป้ง หรือทราย ละเอียดปนดินเหนียว
		CL	ทรายแป้งอินทรีย์ มีความ เหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวปนกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทรายแป้ง ดินเหนียวล้วน
		OL	ทรายแป้งอินทรีย์ และ ดินเหนียวปนทรายอินทรีย์ มีความเหนียวต่ำ
	ตะกอนทรายและดินเหนียว L.L. มากกว่า 50	MH	ทรายแป้งอินทรีย์ ทรายละเอียดปนไม่ก้ำหรือทราย แป้งปนไม่ก้ำ ดินเบา ทรายแป้ง ที่มีความยืดหยุ่น
		CH	ดินเหนียวอินทรีย์มีความ เหนียวสูง ดินเหนียวมีความหนืด สูง
		OH	ดินเหนียวอินทรีย์ มีความเหนียว ปานกลางถึงสูง
		PT	ฟิต โคลนสีดำ และ ดินอินทรีย์สูงอื่น ๆ



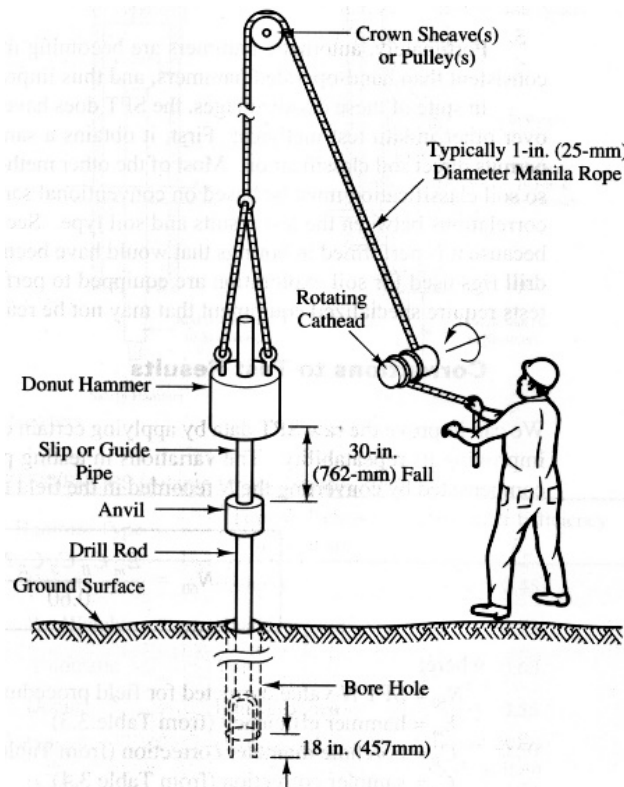
4.2 การตอกทดสอบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

การตอกทดสอบมาตรฐานเป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินที่นิยมมากที่สุดตามมาตรฐาน ASTM D1586-11 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split - Barrel Sampling of Soils นิยมทดสอบในดินทรายและดินที่มีกรวดปนเล็กน้อย เพื่อทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน (Bearing capacity of soil) โดยประมาณ พร้อมเก็บตัวอย่างดินโดยใช้กระบอกผ่า โดยระหว่างการตอกทดสอบจะนับจำนวนครั้งการตอก (Blow count) ทุกกระยะ 15 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่วง โดยผลรวมจำนวนครั้งการตอกระยะ 30 เซนติเมตร (1 ฟุต) สุดท้าย คือ ค่าการตอกทดสอบมาตรฐาน (SPT N-value หรือค่า N) ซึ่งสามารถนำไปหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้ทั้งดินชนิดที่ไม่มี cohesion (Cohesionless soil) ได้แก่ กรวด และทราย รวมถึงดินชนิดมีความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesive Soil) ได้แก่ ดินเหนียว และดินเหนียวปนทราย เพื่อใช้ในการพิจารณาออกแบบฐานรากของโครงสร้างทางวิศวกรรม

การตอกทดสอบมาตรฐานควรทดสอบบริเวณจุดก่อสร้างอาคารบังคับน้ำ อาคารสถานีสูบน้ำ หรือบริเวณที่รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างของระบบกระจายน้ำ โดยจำนวนหลุมเจาะต้องไม่น้อยกว่า 1 - 2 หลุมต่อ 1 โครงสร้าง และความลึกของหลุมทดสอบพิจารณาจากจำนวนครั้งการตอกทดสอบ หรืออาจสำรวจถึงชั้นหิน

4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ตั้มตอกโดนัท (Donut Hammer) น้ำหนัก 63.5 (140 ปอนด์) มีระยะยกสูง 76 เซนติเมตร (30 นิ้ว)
- 2) ท่อนำ (Guide rod)
- 3) แป้นรองรับแรงกระแทก (Anvil)
- 4) กระบอกผ่าเก็บตัวอย่าง (Split spoon sampler)
- 5) ก้านเจาะ (Drill rod)
- 6) เครื่องกว้าน
- 7) อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น เชือกป่านหรือเชือกมนิลา ดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 31 เครื่องมือและอุปกรณ์การตอกทดสอบมาตรฐาน (Johnssss, 2015)

4.2.2 วิธีการทดสอบ

1) เมื่อเจาะถึงระดับความลึกที่ต้องการตอกทดสอบมาตรฐาน ให้ทำการประกอบชุดอุปกรณ์ โดยต่อกระบอกผ่าเข้ากับก้านเจาะ ประกอบแป้นรองกระแทกเข้ากับหัวก้านเจาะ และวางตุ้มน้ำหนักบนแป้นรองรับแรงกระแทก

2) ชีตเส้นแสดงตำแหน่งความลึกของก้านเจาะ ออกเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 15 เซนติเมตร รวมเป็น 45 เซนติเมตร

3) เริ่มตอกทดสอบ โดยยกตุ้มน้ำหนักให้สูงเหนือแป้นรับแรงกระแทก 76 เซนติเมตรและปล่อยให้ตุ้มตกกระแทกแป้นรับแรงกระแทกอย่างอิสระ นับเป็น 1 ครั้ง แล้วทำซ้ำจนกระทั่งก้านเจาะจมลงไปถึง 15 เซนติเมตร และบันทึกจำนวนครั้งการตอก (Blow on sample, N) ตามแบบฟอร์มในภาคผนวก การตอกทดสอบมาตรฐาน Standard Penetration Test (SPT) จากนั้นทำซ้ำจนกระทั่งก้านเจาะจมลงไปถึง 30 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร แล้วจดบันทึกจำนวนครั้งการตอกในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ตามลำดับ โดยผลรวมของจำนวนครั้งการตอก 2 ช่วงสุดท้าย คือ ค่า N (SPT N-value) ให้บันทึกเป็นจำนวนครั้งการตอกทดสอบมาตรฐาน (Blow on sample, N') โดยจำนวนครั้งการตอกช่วง 15 เซนติเมตร ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากดินถูกรบกวนจากขั้นตอนการเจาะหลุม

4) ทำการเจาะและทดสอบต่อไปจนถึงความลึกที่ต้องการ พร้อมจดบันทึกและบรรยายลักษณะชนิดดินหรือหินด้วยตาเปล่าเบื้องต้น

5) กรณีดินทรายมีความละเอียดมากและได้รับผลกระทบจากแรงดันน้ำ ต้องทำการปรับค่า N เมื่อค่า N มากกว่า 15 ครั้ง ดังสมการต่อไปนี้

$$N' = 15 + 0.5 \times (N - 15) \quad \dots \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ N' คือ จำนวนครั้งการทดสอบมาตรฐานปรับแก้

N คือ จำนวนครั้งการทดสอบมาตรฐาน

6) การหยุดทดสอบในแต่ละระดับความลึกมีดังนี้

- จำนวนครั้งการตอกถึง 50 ครั้ง หรือ 100 ครั้ง ในช่วง 15 เซนติเมตร ช่วงใดช่วงหนึ่ง
- จำนวนครั้งการตอกรวม 100 ครั้ง เนื่องจากดินในช่วงความลึกนั้นมีความแข็งแรง

มากหรืออาจเป็นชั้นหินผุ

- ตอกไปแล้ว 10 ครั้งติดต่อกัน แต่ก้านเจาะไม่ขยับจมลง

โดยการหยุดทดสอบขึ้นอยู่กับประเภทของงานฐานราก คือ งานฐานรากตื้นหรือฐานรากเสาเข็มตอก มักหยุดที่ค่า N เท่ากับ 50 กรณีงานฐานรากเสาเข็มเจาะ มักหยุดที่ค่า N เท่ากับ 100

4.2.3 การรายงานผล

บรรยายชื่อจุดทดสอบ ชื่อหลุมเจาะ ตำแหน่ง พิกัด ความลึกเจาะรวม (เมตร) ระดับความลึกที่ทำการทดสอบในช่วงต่าง ๆ จนถึงก้นหลุม (เมตร) ชนิดดิน สีของดิน ขนาดเม็ดดิน สภาพของชั้นดิน จำนวนครั้งการตอกทดสอบมาตรฐาน (Blow count, N) ทุก ๆ 15 เซนติเมตร และผลรวมจำนวนครั้งการตอกของระยะการจม 30 เซนติเมตรสุดท้ายหรือจำนวนครั้งการตอกต่อฟุต (N') พร้อมระบุเหตุผลการหยุดทดสอบ เช่น จำนวนครั้งการตอกรวมครบ 100 ครั้ง เป็นต้น พร้อมแสดงรูปภาพขณะทำการทดสอบ และตัวอย่างดินที่เก็บขณะทำการทดสอบ โดยระบุระดับความลึกที่เก็บตัวอย่างกำกับไว้ได้อย่างชัดเจน และบันทึกข้อมูลตามแบบฟอร์มในภาคผนวก การตอกทดสอบมาตรฐาน Standard Penetration Test (SPT)

4.2.4 การประยุกต์ใช้ค่าการตอกทดสอบมาตรฐาน (SPT)

ค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (Blow count หรือค่า N) ที่ได้จากการนับผลรวมเฉพาะส่วนที่ระยะการจม 30 เซนติเมตรสุดท้าย สามารถนำไปประยุกต์หาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้ประกอบด้วย การจำแนกประเภทดิน ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) ของดิน

เหนียว ซึ่งสามารถบอกสภาพของดินเหนียวได้ แสดงในตารางที่ 12 และตารางที่ 13 ตามลำดับ นอกจากนี้สามารถอธิบายลักษณะความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density, D_r) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, ϕ) ของดินทราย ซึ่งสามารถบอกสภาพของดินทรายได้ ดังตารางที่ 14 และตารางที่ 15 ตามลำดับ

ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)

SPT N-value (blows/ft, blows/30 cm.)	Undrained shear strength, S_u (t/m ²)	Consistency
0 - 2	< 1.5	Very soft
2 - 4	1.5 - 2.50	Soft
4 - 8	2.50 - 5.00	Medium
8 - 15	5.00 - 10.00	Stiff
15 - 30	10.00 - 20.00	Very stiff
> 30	> 20.00	Hard

(ที่มา : Peck et al., 1974)

ตารางที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)

SPT N-value (blows/ft, blows/30 cm.)	Unconfined compressive strength, q_u (t/m ²)	Consistency
0 - 2	< 2.5	Very soft
2 - 4	2.5 - 5.0	Soft
4 - 8	5.0 - 10.0	Medium
8 - 15	10.0 - 20.0	Stiff
15 - 30	20.0 - 40.0	Very stiff
> 30	> 40.0	Hard

(ที่มา : Terzaghi and Peck, 1967)

ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) และความหนาแน่นของดินทราย (Density)

SPT N-value (blows/ft, blows/30 cm.)	Relative density, D_r (%)	Density
0 - 4	0 - 15	Very loose
4 - 10	15 - 35	Loose
10 - 30	35 - 65	Medium dense
30 - 50	65 - 85	Dense
> 50	85 - 100	Very dense

(ที่มา : Peck et al., 1974)

ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอกทดสอบมาตรฐาน (N), ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) และความหนาแน่นของดินทราย (Density)

SPT N-value (blows/ft, blows/30 cm.)	Angle of internal friction, ϕ (degree)		Density
	Peck et al., 1974	Meyerhof, 1956	
0 - 4	< 28.5	< 30	Very loose
4 - 10	28.5 - 30	30 - 35	Loose
10 - 30	30 - 36	35 - 40	Medium
30 - 50	36 - 41	40 - 45	Dense
>50	> 41	> 45	Very dense

(ที่มา : Meyerhof, 1956 and Peck et al., 1974)

จากผลการตอกทดสอบมาตรฐานและวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน สามารถออกแบบฐานรากได้โดยใช้ค่าตอกทดสอบมาตรฐาน เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกของฐานราก ทั้งนี้ ฐานรากคือ โครงสร้างที่มีหน้าที่ถ่ายแรงลงสู่ดินที่รองรับ และฐานรากตื้น (Shallow Foundation) คือ ฐานรากที่มีระยะฝังในดิน (Embedment depth) ไม่เกิน 2.5 เท่าของความกว้างฐานรากโดยประมาณ โดยทั่วไปฐานรากตื้นรับน้ำหนักไม่มากและวางอยู่บนดินที่มีค่า SPT-N value ไม่ต่ำกว่า 10 - 15 เป็นชั้นดินสม่ำเสมอและดินใต้ฐานรากไม่เสี่ยงต่อการถูกกัดเซาะ การออกแบบต้องคำนึงถึงกำลังรับแรงแบกทานของดินและการทรุดตัวของฐานรากเนื่องจากหน่วยแรงใช้งาน ไม่เกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ (พัลลภ, 2558)

โดยเบื้องต้นหากพบว่าคุณสมบัติของชั้นดินระดับต้นมีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้โดยไม่เกิดการทรุดตัวเกินกำหนด มักออกแบบฐานรากแผ่ (Spread footing) เนื่องจากก่อสร้างได้ง่ายและประหยัดงบประมาณ กรณีฐานรากแผ่ไม่เหมาะสมจึงจะพิจารณาออกแบบฐานรากเสาเข็ม (Pile foundation)

(1) การออกแบบฐานรากแผ่

(1.1) กรณีฐานรากแผ่ในดิน

การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity) ของดิน คือ การหาค่ากำลังรับแรงแบกทานประลัย (Ultimate bearing capacity, q_u) โดย Terzaghi (1943) ถือเป็นคนแรกที่เสนอสมการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานประลัยของฐานรากแผ่ ดังนี้

$$q_u = cN_c + qN_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \quad \text{กรณีฐานรากต่อเนื่อง} \quad \dots \text{สมการที่ 2}$$

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4 \gamma B N_\gamma \quad \text{กรณีฐานรากจัตุรัส} \quad \dots \text{สมการที่ 3}$$

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3 \gamma B N_\gamma \quad \text{กรณีฐานรากวงกลม} \quad \dots \text{สมการที่ 4}$$

$$q_u = (1+0.3 \frac{B}{L})cN_c + qN_q + 0.5(1-0.2 \frac{B}{L}) \gamma B N_\gamma \quad \text{กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า} \quad \dots \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ q_u คือ กำลังรับแรงแบกทานประลัย หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)

c คือ ความเชื่อมแน่นของดิน หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)

q คือ หน่วยแรงจากน้ำหนักดินเหนือฐานราก โดย $q = \gamma D_f$ หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)

γ คือ หน่วยน้ำหนักของดิน (Total unit weight) หน่วย ตันต่อลูกบาศก์เมตร (t/m^3)

D_f คือ ระยะฝังของฐานราก หน่วย เมตร (m)

B คือ ความกว้างของฐานราก หน่วย เมตร (m)

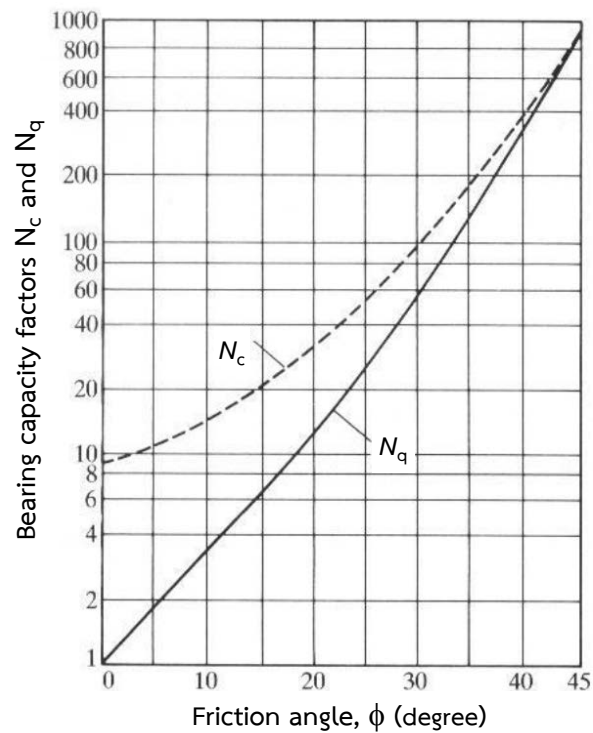
กรณีฐานรากจัตุรัส B เท่ากับขนาดแต่ละด้าน

กรณีฐานรากวงกลม B เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง

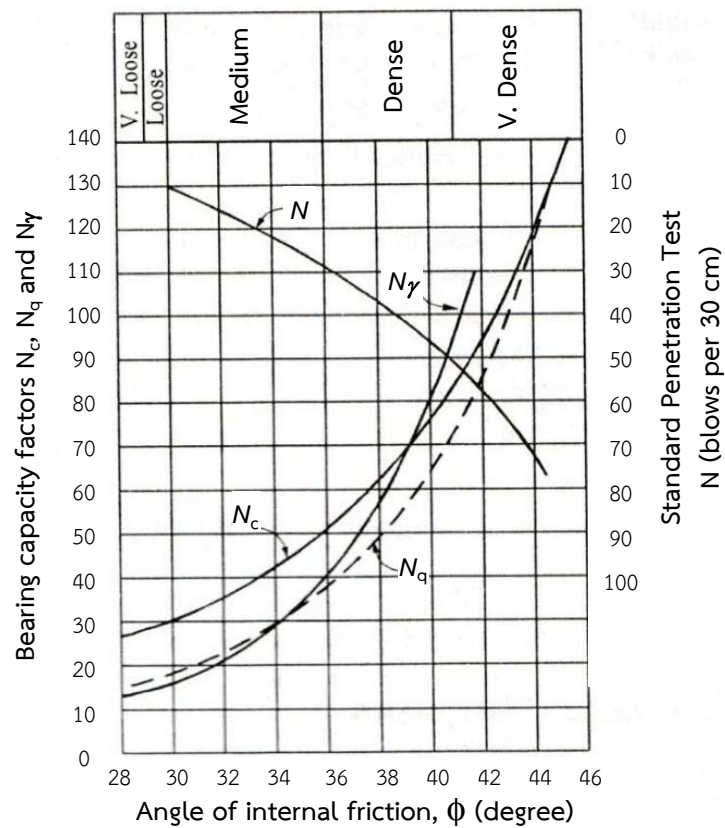
L คือ ความยาวของฐานราก หน่วย เมตร (m) กรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า

N_c, N_q, N_γ คือ ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity factor) จากกราฟรูปที่ 32

กรณีทราบค่า ϕ และรูปที่ 33 กรณีทราบค่า ϕ หรือ SPT-N value



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_c , N_q และ ϕ (Meyerhof, 1956)



รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_c , N_q , N_y , ϕ และ ค่า SPT-N value
(Peck, Hanson and Thornburn, 1974)

โดยกำลังรับแรงแบกทานประลัยสุทธิ (Ultimate bearing capacity, $q_{u(net)}$) คือ หน่วยแรงสูงสุดที่ดินสามารถรับไว้ได้เกินจากน้ำหนักดินกดทับ ซึ่งนิยมใช้ในการออกแบบ คำนวณได้จากสมการที่ 6

นอกจากนี้ กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ (Allowable bearing capacity, q_a) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ดังสมการที่ 7 โดยค่า FS ถูกใช้เพื่อชดเชยสมมุติฐานที่ใช้ในการสร้างสมการกำลังรับแรงแบกทานประลัย ความไม่แน่นอนของชั้นดิน รวมถึงความไม่แน่นอนของแรงที่ถ่ายจากโครงสร้างเหนือฐานราก โดยค่า FS มีพื้นฐานจากหน่วยแรงต้านทานหารด้วยหน่วยแรงกระทำ กรณีผู้ออกแบบใช้มุมเสียดทานที่สภาวะวิกฤต ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินและเป็นค่าที่ค่อนข้างปลอดภัย ค่า FS อาจอยู่ในช่วง 1.5 – 2.5 หากผู้ออกแบบใช้มุมเสียดทานสูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างเสี่ยง ค่า FS ควรมีค่าสูงอยู่ในช่วง 3 – 5 (พัลลภ, 2558)

$$q_{u(net)} = q_u - q \quad \dots \text{สมการที่ 6}$$

$$q_a = \frac{q_{u(net)}}{FS} + q \quad \dots \text{สมการที่ 7}$$

$$\text{หรือ} \quad q_{a(net)} = \frac{q_{u(net)}}{FS} \quad \dots \text{สมการที่ 8}$$

- เมื่อ $q_{u(net)}$ คือ กำลังรับแรงแบกทานประลัยสุทธิ หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)
 q_u คือ กำลังรับแรงแบกทานประลัย หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)
 q คือ หน่วยแรงจากน้ำหนักดินเหนือฐานราก โดย $q = \gamma D_f$ หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)
 q_a คือ กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)
 $q_{a(net)}$ คือ กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้สุทธิ (Net allowable bearing capacity)
 หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)
 FS คือ อัตราส่วนความปลอดภัย

(1.2) กรณีฐานรากแผ่ในดินประเภท Cohesionless soil

ดินประเภท Cohesionless soil เช่น กรวด ทราย ทรายปนดินเหนียว เป็นดินที่มีค่า Permeability สูง น้ำซึมผ่านได้ง่าย เมื่อมีน้ำหนักกดทับน้ำจะซึมผ่านได้อย่างรวดเร็วทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วเช่นกัน การวิเคราะห์หาลำกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity) ของดินประเภทนี้ขึ้นอยู่กับทรุดตัว โดย Meyerhof (1956) และ Bowles (1977) เสนอสมการกำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้สุทธิ (Net allowable bearing pressure, $q_{a(net)}$) สำหรับฐานรากบนทรายสัมพันธ์กับผลการทดสอบ SPT และการทรุดตัวสูงสุดของฐานรากไม่เกิน 25 มิลลิเมตร (พัลลภ, 2558) ดังนี้

$$q_{a(net)} = 20N_{60} \left(1 + 0.33 \frac{D_f}{B}\right) \left(\frac{S_i}{25}\right) \quad B \leq 1.22 \text{ เมตร} \quad \dots \text{สมการที่ 9}$$

$$q_{a(net)} = 12.5N_{60} \left(\frac{B+0.3}{B}\right)^2 \left(1 + 0.33 \frac{D_f}{B}\right) \left(\frac{S_i}{25}\right) \quad B > 1.22 \text{ เมตร} \quad \dots \text{สมการที่ 10}$$

- เมื่อ $q_{a(net)}$ คือ กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้สุทธิ หน่วย ตันต่อตารางเมตร (t/m^2)
 N_{60} คือ ค่าเฉลี่ยผลการตอกทดสอบมาตรฐาน (SPT-N value) ได้ระดับฐานรากไม่เกิน 2B
 D_f คือ ระยะฝังของฐานราก หน่วย เมตร (m)
 B คือ ความกว้างฐานราก หน่วย เมตร (m)
 S_i คือ การทรุดตัวทันทีของทราย หน่วย มิลลิเมตร (mm)
 $\left(1 + 0.33 \frac{D_f}{B}\right)$ คือ ตัวประกอบความลึก มีค่าไม่เกิน 1.33

(2) การออกแบบฐานรากเสาเข็ม

การประเมินกำลังรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็ม (Ultimate bearing capacity) จากการเจาะเก็บตัวอย่างจำเป็นต้องพิจารณากำลังต้านทานของเสาเข็มจาก 2 ส่วน คือ แรงเสียดทานที่เกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มกับดิน และแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

(2.1) กรณีฐานรากแผ่ในดินประเภท Cohesive soil

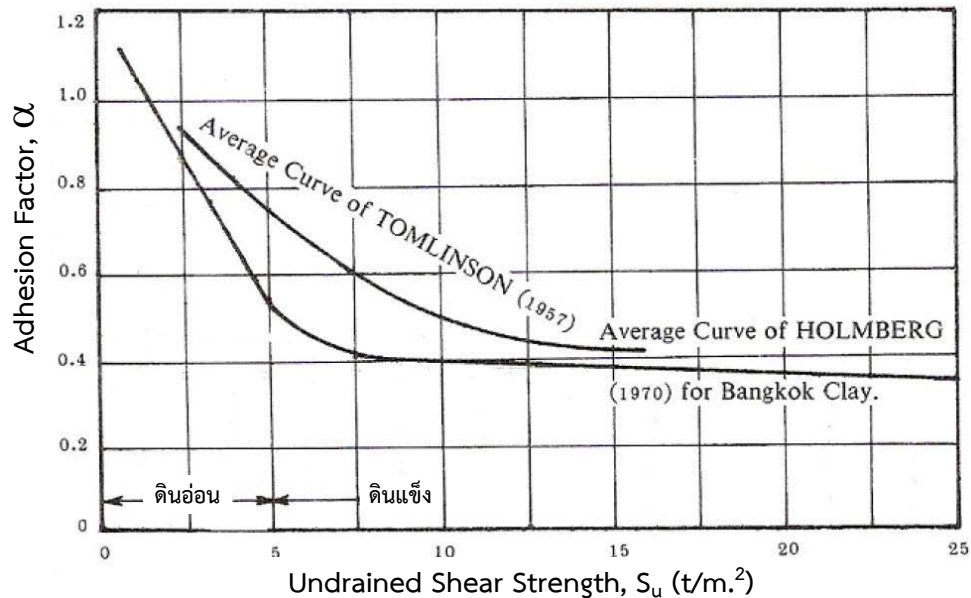
(2.1.1) แรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม (Ultimate skin friction, Q_f)

$$Q_f = f_s L P \quad \dots \text{สมการที่ 11}$$

- เมื่อ Q_f คือ แรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)
 f_s คือ หน่วยแรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม (Ultimate unit skin friction)
 หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

$$\text{สำหรับดินเหนียว} \quad f_s = \alpha S_u \quad \dots \text{สมการที่ 12}$$

- L คือ ความยาวของเสาเข็มส่วนที่ฝังอยู่ในดิน หน่วย เมตร (m)
 P คือ ความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัดเสาเข็ม หน่วย เมตร (m)
 α คือ แฟกเตอร์ยึดเกาะ (Adhesion factor) หาได้จากรูปที่ 34
 S_u คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength)
 หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)



รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์ยึดเกาะ (α) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ของดินเหนียว (Holmberg, 1970)

(2.1.2) แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม (Ultimate end bearing, Q_b)

$$Q_b = q_b A_b \quad \dots \text{สมการที่ 13}$$

เมื่อ Q_b คือ แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)

q_b คือ หน่วยแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม (Ultimate unit end bearing)
หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

$$\text{สำหรับดินเหนียว} \quad q_b = S_u N_c \quad \dots \text{สมการที่ 14}$$

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม หน่วย ตารางเมตร (m^2)

S_u คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

N_c คือ ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทาน จากกราฟรูปที่ 32 กรณีทราบค่า ϕ และรูปที่ 33
กรณีทราบค่า ϕ หรือ SPT-N value

(2.2) กรณีฐานรากแผ่ในดินประเภท Cohesionless soil

(2.2.1) แรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม (Ultimate skin friction, Q_f)

$$Q_f = f_s L P \quad \dots \text{สมการที่ 15}$$

เมื่อ Q_f คือ แรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)

f_s คือ หน่วยแรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

$$\text{สำหรับดินทราย} \quad f_s = K_s \sigma'_{vo} (\tan \delta) \quad \dots \text{สมการที่ 16}$$

L คือ ความยาวส่วนที่ฝังอยู่ในดินของเสาเข็ม หน่วย เมตร (m)

P คือ ความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัดเสาเข็ม หน่วย เมตร (m)

σ'_v คือ หน่วยแรงกดทับประสิทธิผลที่ปลายเสาเข็ม เนื่องจากน้ำหนักมวลดิน (Effective overburden pressure) โดยพิจารณาที่จุดกึ่งกลางชั้น หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

K_s คือ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง หาได้จากตารางที่ 16

δ คือ มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน หาได้จากตารางที่ 17

ตารางที่ 16 ค่าของสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (K_s) ขึ้นอยู่กับวิธีการก่อสร้าง

วิธีการก่อสร้าง	K_s / K_0
เสาเข็มตอก ดินถูกแทนที่มาก	1.00 - 2.00
เสาเข็มตอก ดินถูกแทนที่น้อย	0.75 - 1.75
เสาเข็มเจาะและหล่อคอนกรีตในที่	0.7 - 1.00

(ที่มา : Tomlinson, 1995)

ตารางที่ 17 ค่าของมุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน (δ) ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิว

ลักษณะพื้นผิวระหว่างเสาเข็มกับดิน	δ
ผิวเรียบ - ผิวเหล็กเรียบกับทราย	$0.5 \phi' - 0.7 \phi'$
ผิวขรุขระ - ผิวเหล็กลอนลูกฟูกกับทราย	$0.7 \phi' - 0.9 \phi'$
ผิวเสาเข็ม คสล. สำเร็จรูปกับทราย	$0.8 \phi' - 1.0 \phi'$
ผิวเสาเข็มเจาะและหล่อคอนกรีตในที่กับทราย	$1.0 \phi'$
ผิวเสาเข็มไม้กับทราย	$0.8 \phi' - 0.9 \phi'$

(ที่มา : Kulhawy, 1990)

(2.2.2) แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม (Ultimate end bearing, Q_b)

$$Q_b = q_b A_b \quad \dots \text{สมการที่ 17}$$

เมื่อ Q_b คือ แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)

q_b คือ หน่วยแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

$$\text{สำหรับดินทราย} \quad q_b = N_q \sigma'_{vo} \quad \dots \text{สมการที่ 18}$$

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม หน่วย ตารางเมตร (m^2)

N_q คือ ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทาน จากกราฟรูปที่ 32 กรณีทราบค่า ϕ และรูปที่ 33
กรณีทราบค่า ϕ หรือ SPT-N value

σ'_v คือ หน่วยแรงกดทับประสิทธิผลที่ปลายเสาเข็ม เนื่องจากน้ำหนักมวลดิน
หน่วย ตัน/ตารางเมตร (t/m^2)

โดยกำลังรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็ม (Ultimate pile capacity, Q_{ult}) คือ ผลรวมของ
แรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็มและแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{ult} = Q_f + Q_b \quad \dots \text{สมการที่ 19}$$

เมื่อ Q_{ult} คือ กำลังรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)

Q_f คือ แรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)

Q_b คือ แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม หน่วย ตัน (t)

นอกจากนี้ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม (Allowable pile capacity, Q_{all}) คำนวณได้
โดยใช้อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) จากสมการต่อไปนี้

$$Q_{all} = \frac{Q_{ult}}{FS} \quad \text{โดย } FS = 2 \text{ ถึง } 3 \quad \dots \text{สมการที่ 20}$$

4.3 การทดสอบอัตราการรั่วซึม (Permeability test)

การทดสอบอัตราการรั่วซึมมีความสำคัญต่อการประเมินอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินหรือหินฐานราก แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดิน ด้วยวิธี Gravity test โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งทดสอบได้ทั้งแบบเป็นช่วง (Range test) และทดสอบที่ระดับก้นหลุม (Open end test) ตามมาตรฐาน USBR designation E-18 ของ Earth Manual โดยค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, K) หน่วย เซนติเมตร/วินาที และการทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหิน ด้วยวิธี Lugeon test ที่ทดสอบทุกระยะ 3 เมตร โดยอาศัยแรงดันจากเครื่องสูบน้ำอัดน้ำลงไปหลุมเจาะ ตามแบบของ A.C. Houlby ค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ ค่าอัตราการรั่วซึม หน่วย ลูยอง (Lugeon) และหากจัดแบ่งช่วงระดับอัตราการรั่วซึม จะบ่งชี้ถึงคุณภาพของชั้นหินฐานราก ซึ่งเป็นตัวแปรในการออกแบบฐานราก เชื้อเพลิง คั่นกันน้ำ และการออกแบบระบบระบายน้ำใต้ดิน เพื่อป้องกันการรั่วซึม และการเพิ่มความแข็งแรงภายในตัวโครงสร้าง

4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ชุดอุปกรณ์การทดสอบ Packer test (Hydraulic packer หรือ Mechanical packer)
- 2) สายท่อน้ำ (Water line)
- 3) มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
- 4) มาตรวัดน้ำ (Water meter)
- 5) ปั๊มน้ำ (Water pump)
- 6) Bypass control
- 7) แหล่งน้ำสำรอง (Water storage)

4.3.2 วิธีการทดสอบและการคำนวณ

การทดสอบจะดำเนินการหลังจากเจาะถึงระดับความลึกที่ต้องการทดสอบหาค่าการรั่วซึมแล้วเสร็จ โดยวิธีการทดสอบขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดินหรือชั้นหิน รายละเอียด ดังนี้

1) การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดิน

การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดิน ด้วยวิธี Gravity test เป็นการทดสอบการรั่วซึมในชั้นดินปิดทับ (Overburden) และในชั้นหินที่มีความผุพังและแตกหักสูง สามารถทดสอบแบบเป็นช่วง (Range test) และทดสอบที่ระดับก้นหลุม (Open end test) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมทดสอบที่ระดับก้นหลุมทุกระยะ 1 เมตร โดยการเจาะหลุมลงไปถึงระดับความลึกที่ต้องการทดสอบ จากนั้นฝังท่อกรลงไปในหลุม และเติมน้ำที่ปากหลุมเจาะเพื่อรักษาระดับน้ำที่ปากหลุมเจาะให้คงที่ (Constant head) ซึ่งสามารถทดสอบการรั่วซึมของชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Water table) และต่ำกว่า

ระดับน้ำใต้ดิน ดังรูปที่ 35 ซึ่งโดยทั่วไปนิยมทดสอบที่ระดับต่ำกว่าน้ำใต้ดิน โดยให้จับเวลาและวัดปริมาณน้ำที่รั่วซึมหายไปในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ พร้อมวัดความลึกของการทดสอบ และบันทึกข้อมูลตามแบบฟอร์มในภาคผนวก การทดสอบอัตราการรั่วซึม Permeability test แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ตามสมการ ดังนี้

1.1) การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินที่ระดับก้นหลุม (Open-end test)

$$K = \frac{Q}{5.5rH} \quad \dots\text{สมการที่ 21}$$

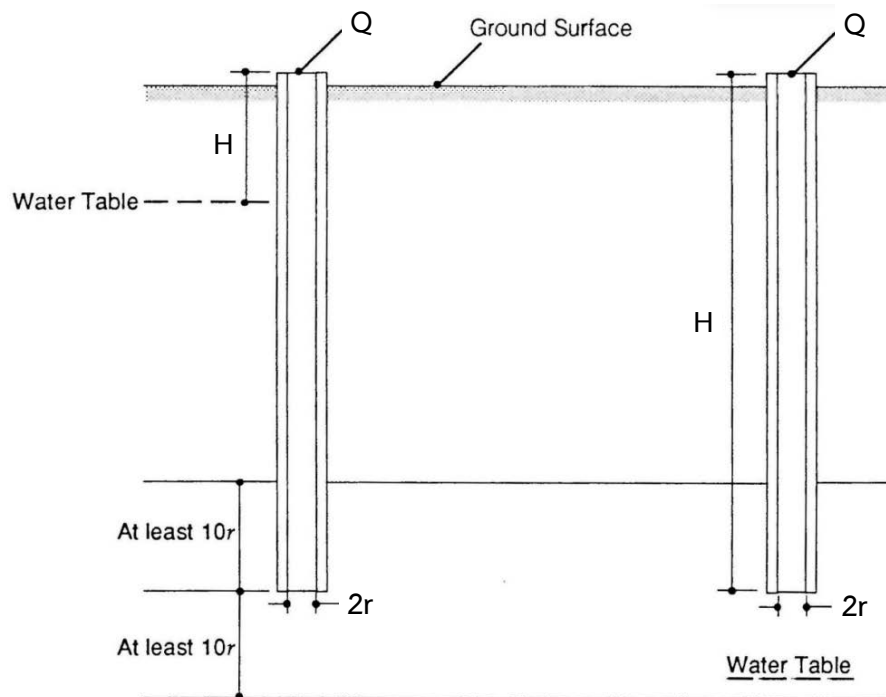
- เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient)
หน่วย เซนติเมตร/วินาที (cm/sec)
- Q คือ อัตราการไหลของน้ำลงไปในหลุมเจาะเพื่อที่จะรักษาระดับความดันให้คงที่
เหนือระดับน้ำใต้ดิน หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที (cm³/sec)
- R คือ รัศมีภายในของกระบอกเจาะ หน่วย เซนติเมตร (cm)
- H คือ ระดับน้ำที่รักษาไว้เหนือระดับน้ำใต้ดิน หน่วย เซนติเมตร (cm)

1.2) การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินแบบเป็นช่วง (Range test)

$$K = \frac{Q}{2\pi LH} \log_e \frac{L}{r} \quad \text{เมื่อ } L \geq 10r \quad \dots\text{สมการที่ 22}$$

$$K = \frac{Q}{2\pi LH} \sinh^{-1} \frac{L}{r} \quad \text{เมื่อ } 10r > L > r \quad \dots\text{สมการที่ 23}$$

- เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน หน่วย เซนติเมตร/วินาที (cm/sec)
- Q คือ อัตราการไหลของน้ำลงไปในหลุมเจาะเพื่อที่จะรักษาระดับความดันให้คงที่
เหนือระดับน้ำใต้ดิน หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที (cm³/sec)
- r คือ รัศมีภายในของกระบอกเจาะ หน่วย เซนติเมตร (cm)
- L คือ ระยะทดสอบ หน่วย เซนติเมตร (cm)
- H คือ ระดับน้ำที่รักษาไว้เหนือระดับน้ำใต้ดิน หน่วย เซนติเมตร (cm)
- log_e คือ ลอการิทึมธรรมชาติ มีค่าประมาณ 2.71828
- sinh⁻¹ คือ Arc hyperbolic sine
- π คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $\frac{22}{7}$



รูปที่ 35 การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินที่ระดับก้นหลุม (Open end test)
(SunCam., n.d)

2) การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหิน

การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหิน ด้วยวิธี Lugeon test เป็นการทดสอบในชั้นหินฐานราก การทดสอบสามารถทำได้ทั้งในระหว่างการเจาะจนกว่าจะถึงความลึกสุดท้าย โดยทั่วไปทำการทดสอบทุกระยะ 3 เมตร เป็นการทดสอบการรั่วซึมของหินในแต่ละช่วงความดันตามระดับความลึก โดยอาศัยแรงดันจากเครื่องปั้มน้ำอัดลงไปหลุมเจาะ และอาศัยลูกยางปิดกั้นน้ำไม่ให้รั่วไหลขึ้นมาปากหลุมเจาะ โดยทั่วไปนิยมทดสอบการรั่วซึมของชั้นหินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถทดสอบได้ 2 ลักษณะตามลักษณะของลูกยาง (Packer) คือ Singer packer เป็นการอัดน้ำเข้าไปในชั้นหินระหว่างก้นหลุมถึงตำแหน่ง Packer ดังรูปที่ 36 และ Double packer เป็นการอัดน้ำเข้าไประหว่างลูกยาง Packer ตัวล่าง กับลูกยาง Packer ตัวบน ดังรูปที่ 37 ดังนั้น น้ำจะถูกบังคับให้ไหลไปตามรอยแตก รอยแยก และรูพรุนของหินเท่านั้น จากนั้นวัดปริมาณน้ำที่รั่วไหลหายไปในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ วัดช่วงความลึกที่ทำการทดสอบและอ่านค่าความดันที่ใช้ ซึ่งค่าความดันพิจารณาจากระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 เมตร โดยความดันจะเพิ่มขึ้น 0.23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าต่างกัน 3 ค่า โดยทำการทดสอบช่วงความลึกละ 5 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที ทั้งนี้ ความดันในการทดสอบครั้งที่ 3 เป็นค่าความดันสูงสุดที่ใช้ในแต่ละช่วง ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะที่จะทดสอบมีค่าเท่ากับ a ตัวอย่างการคำนวณความดันดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ตัวอย่างการคำนวณความดันที่ใช้ในการทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหิน

ครั้งที่	1	2	3	4	5
ความดันที่ใช้ (Kg/cm ²)	0.4a	0.7a	1.0a	0.7a	0.4a

ความดันครั้งที่ 3 (Kg/cm²) = ความลึกก้นหลุม (เมตร) × 0.23 ...สมการที่ 24

ความดันครั้งอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละของความดันสูงสุด คือ 40 และ 70 ตามลำดับ
จากนั้นคำนวณหาอัตราการรั่วซึม หน่วย ลูยอง (Lugeon) จากสมการ ดังนี้

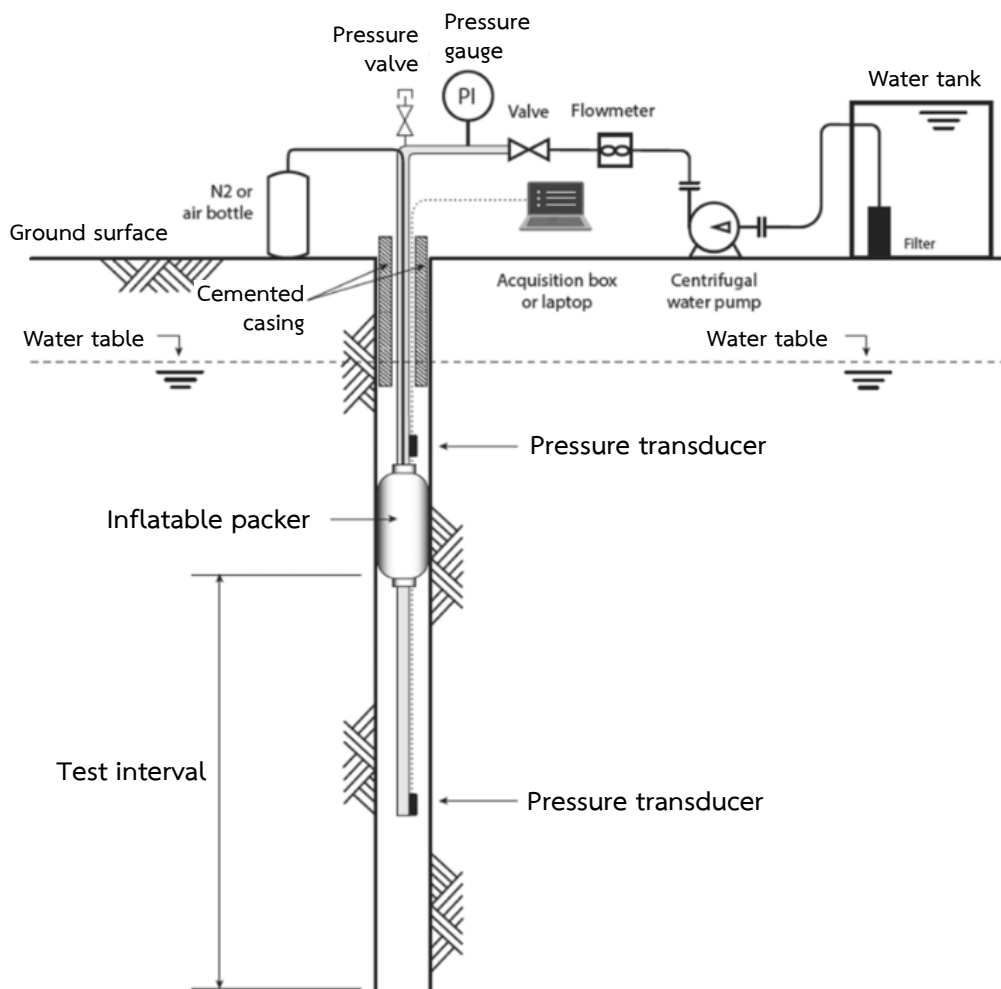
$$Lu = \frac{10Q}{mp} \quad \dots \text{สมการที่ 25}$$

เมื่อ Lu คือ อัตราการรั่วซึม หน่วย ลูยอง (Lugeon)

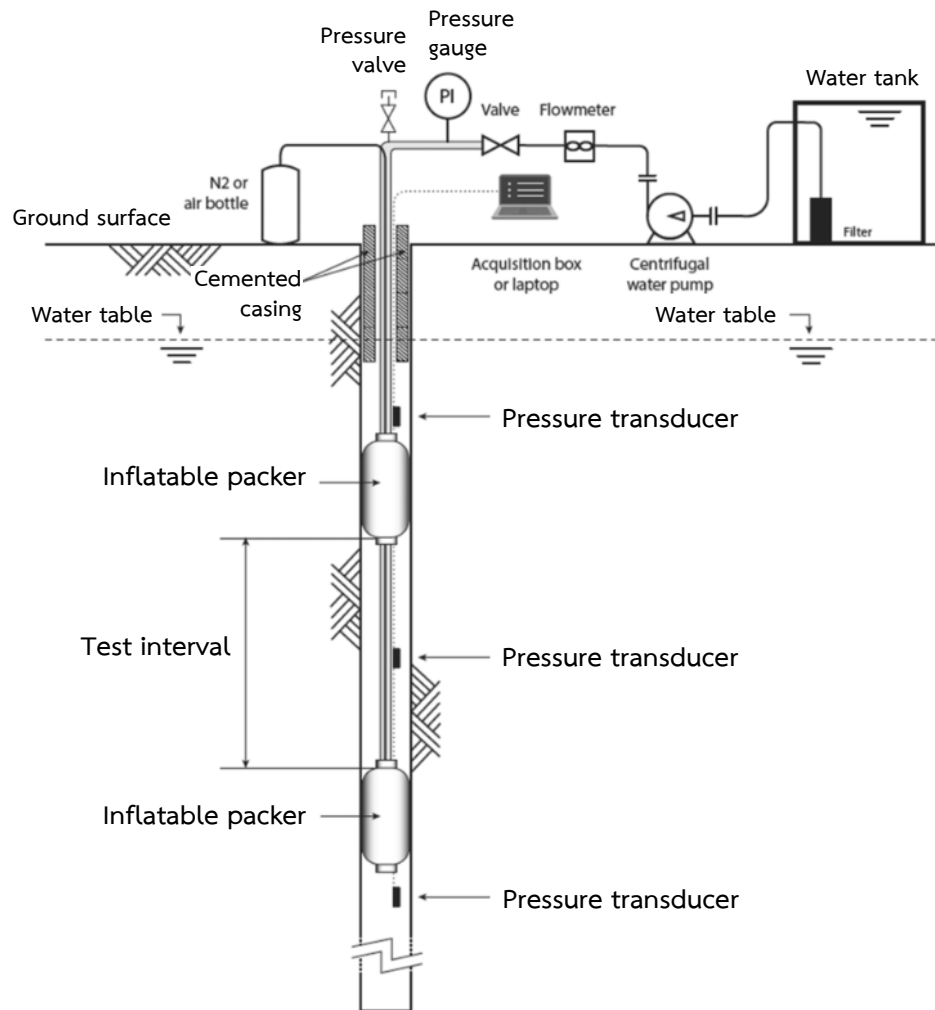
Q คือ อัตราการไหลของน้ำ หน่วย ลิตร/นาที (liter/min)

m คือ ระยะทดสอบ หน่วย เมตร (m) โดยทั่วไปเท่ากับ 3 เมตร

P คือ ความดันที่ใช้ในการทดสอบ หน่วย กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (Kg/cm²)
โดยที่ความดันของน้ำที่ความลึก 10.0 เมตร มีค่าเท่ากับ 1.0 Kg/cm²

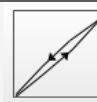
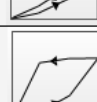


รูปที่ 36 การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินแบบ Singer packer (Vaskou, 2019)



รูปที่ 37 การทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินแบบ Double packer (Vaskou, 2019)

เมื่อได้ค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินทั้ง 5 ค่า สามารถพิจารณาหาค่าตัวแทน (Representative lugeon value) เพียงหนึ่งค่า จากรูปแบบการไหลของน้ำ (Lugeon pattern) ดังแสดงในรูปที่ 38

Behaviour	Lugeon Pattern	Flow vs. Pressure Pattern	Representative Lugeon Value
Laminar Flow			Average of Lugeon values for all steps
Turbulent Flow			Lugeon value corresponding to the highest water pressure (3rd step)
Dilation			Lowest Lugeon value recorded, corresponding either to low or medium water pressures (1st, 2nd, 4th, 5th step)
Wash-out			Highest Lugeon value recorded (5th step)
Void Filling			Final Lugeon value (5th step)

รูปที่ 38 รูปแบบการไหลของน้ำ (Lugeon Pattern) (A.C. HOULSBY, 1976)

โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) เป็นค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำในดิน คิดเป็นระยะทางต่อเวลา และค่าลูยอง (Lugeon) เป็นค่าการรั่วซึม โดย 1 Lugeon มีค่าเท่ากับปริมาณน้ำไหลหนึ่งลิตรต่อหนึ่งนาที ที่ความยาวหนึ่งเมตร ในสภาวะความดัน 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) และค่าลูยอง (Lugeon) ได้ดังนี้

$$1 \text{ Lugeon} = \frac{(\text{Loss of water 1 liter/ minute})}{\text{Meter of borehole}} \text{ at 10 atmosphere} \quad \dots \text{สมการที่ 26}$$

$$1 \text{ Lugeon} = \text{สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K)} = 1 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร/วินาที} \quad \dots \text{สมการที่ 27}$$

เมื่อได้อัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินและชั้นหินแล้ว สามารถนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของฐานรากได้ จากตารางที่ 19

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินหรือชั้นหิน และคุณสมบัติของฐานราก

Degree	Permeability		Property
	Lugeon range, Lu	Hydraulic conductivity range, K (cm/sec)	
K1	< 1	$< 1.0 \times 10^{-5}$	Impervious
K2	1 - 5	$1.0 \times 10^{-5} - 5.0 \times 10^{-5}$	Semi - impervious
K3	5 - 10	$5.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-4}$	Semi - pervious
K4	10 - 50	$1.0 \times 10^{-4} - 5.0 \times 10^{-4}$	Rather - pervious
K5	> 50	$> 5.0 \times 10^{-4}$	Pervious

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Quiñones-Rozo, 2010)

4.3.3 การรายงานผล

ภายหลังจากขั้นตอนการเจาะถึงระดับความลึกที่ต้องการหาค่าอัตราการรั่วซึม จะบันทึกรายละเอียดการทดสอบตามแบบฟอร์มในภาคผนวก การทดสอบอัตราการรั่วซึม Permeability test โดยจดบันทึกชื่อโครงการ ที่ตั้งโครงการ ชื่อตัวอย่างดิน วันที่ทดสอบ ผู้ทดสอบ ผู้ตรวจสอบ เวลาขณะเจาะ ความลึกของการกรูหลุมเจาะ ช่วงระดับความลึก วิธีการทดสอบ ระดับความดันมาตรวัด เวลาที่ใช้ในการทดสอบ ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลง ระดับน้ำใต้ดินในหลุมเจาะทั้งก่อนและหลัง และหมายเหตุ แสดงรายละเอียดการเจาะหรือปัญหาที่พบ

4.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน (Plate bearing test)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างฐานรากที่รองรับด้วยพื้นดิน โดยที่ดินไม่เกิดการทรุดตัวหรือการบีบอัด หรือการทรุดตัวดังกล่าวต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบนี้จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณออกแบบฐานรากสำหรับสิ่งก่อสร้าง และใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินในพื้นที่ก่อสร้างเมื่อน้ำหนักมากขึ้นที่สัมพันธ์กับเวลา (Time dependent settlement) ตามมาตรฐานการทดสอบ AASHTO T 222-81 ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับกับการทรุดตัว

4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

1) แผ่นเหล็กทดสอบ (Steel bearing plate) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 300 มิลลิเมตร, 450 มิลลิเมตร หรือ 600 มิลลิเมตร และมีความหนาไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือแผ่นเหล็กกลมที่มีความหนาและพื้นที่เท่ากัน

2) ชุดเพิ่มน้ำหนัก ประกอบด้วยแม่แรงไฮดรอลิกและมาตรวัดแรงกด (Hydraulic jack with pressure gauge) ต้องมีความสามารถให้ค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 15,000 กิโลกรัม มีมาตรวัดแรงกด (Pressure gauge) วัดแรงกดที่เกิดขึ้น โดยยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกินร้อยละ 2 ของน้ำหนักที่เพิ่มในแต่ละช่วง พร้อมทั้งมีใบรับรองแสดงผลการสอบเทียบ (Calibrated and tested report) อายุไม่เกิน 1 ปี โดยมีจุดสอบเทียบในช่วง 15,000 กิโลกรัม อย่างน้อย 5 ค่า มาแสดงก่อนใช้ชุดเพิ่มน้ำหนักดังกล่าว

3) แคร่บรรทุกน้ำหนัก (Loading platform) ทำจากเหล็ก โดยต้องแข็งแรงและรับน้ำหนักบรรทุกได้มากพอที่จะให้แรงกดได้ตลอดการทดสอบ หากเป็นไปได้ จุตรองรับของแคร่บรรทุกน้ำหนักควรห่างจากตำแหน่งทดสอบอย่างน้อย 2.40 เมตร

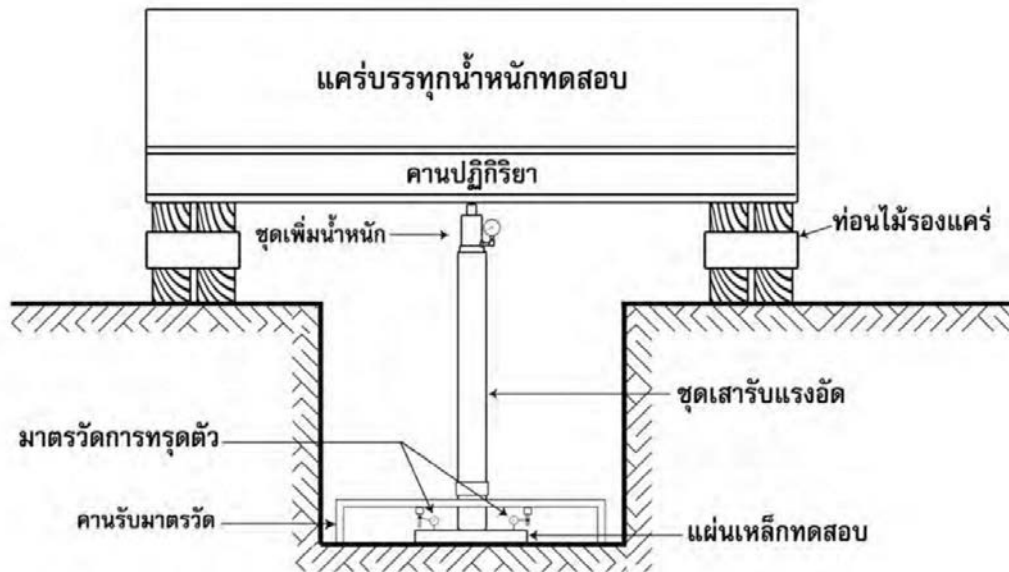
4) มาตรวัดการทรุดตัว (Dial gauge) ให้ใช้อย่างน้อย 2 ตัว ติดตั้งไว้ในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อวัดการทรุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบ และมาตรวัดทุกตัวที่ใช้ต้องมีความละเอียดในการอ่านมาตรวัดได้ไม่น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร

5) คานรับมาตรวัด (Reference beam) ทำจากเหล็ก โดยต้องมีความแข็งแรงและติดตั้งแยกอิสระ จุตรองรับต้องมีการยึดแน่น หากเป็นไปได้ จุตรองรับของคานควรห่างจากจุดทดสอบอย่างน้อย 2.40 เมตร

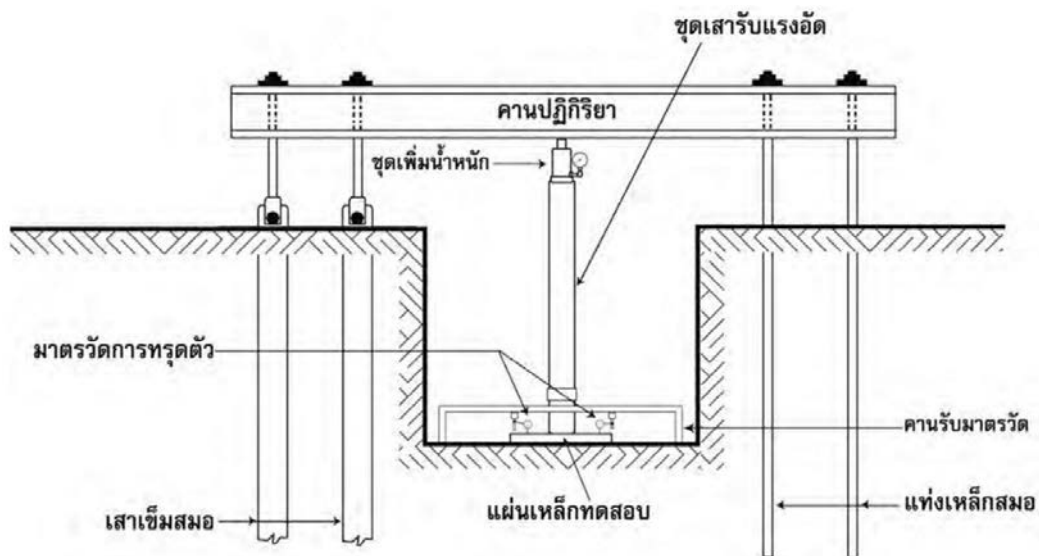
6) คานปฏิกิริยา (Reaction beam) ทำจากเหล็กที่มีความมั่นคงแข็งแรง สามารถรองรับแรงกระทำได้

7) ชุดเสารับแรงอัด (Compression post) ให้ใช้เสาเหล็กท่อนเดียว (Single member) ปิดปลายเรียบสองด้าน ใช้หนุนเสริมช่องว่างเพื่อรองรับแรงอัดจากแคร่บรรทุกน้ำหนักถ่ายลงแผ่นเหล็กทดสอบเสารับแรงอัดจะต้องมีความแข็งแรงและสามารถรับแรงอัดได้โดยไม่บิดหรือโก่งงอ และที่ปลายเสาจะต้องมีแป้นป้องกันการหนีศูนย์เพื่อให้การถ่ายแรงในแนวตั้งเป็นไปอย่างสมบูรณ์

8) การประกอบเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามสภาพสถานที่ก่อสร้าง โดยให้อยู่ในการพิจารณาของผู้ควบคุมการทดสอบ ทั้งนี้ต้องดำเนินการให้มีความมั่นคงแข็งแรงปลอดภัย และมีประสิทธิภาพตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ตัวอย่างการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบบนแผ่นเหล็กทดสอบโดยแม่แรงไฮดรอลิกร่วมกับแคร่บรรทุกน้ำหนัก และร่วมกับเสาเข็มสมอหรือแท่งเหล็กสมอ ดังแสดงในรูปที่ 39 และรูปที่ 40 ตามลำดับ



รูปที่ 39 ตัวอย่างการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบบนแผ่นเหล็กทดสอบโดยแม่แรงไฮดรอลิกร่วมกับน้ำหนักบรรทุกวางอยู่บนแคร่บรรทุกน้ำหนัก



รูปที่ 40 ตัวอย่างการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบบนแผ่นเหล็กทดสอบโดยแม่แรงไฮดรอลิกร่วมกับเสาเข็มสมอหรือแท่งเหล็กสมอ

4.4.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมก่อนการทดสอบ

- 1) สำรวจบริเวณสถานที่ก่อสร้าง เพื่อกำหนดตำแหน่งทดสอบอย่างน้อย 3 จุด โดยแต่ละจุดต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 5 เท่าของความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็กทดสอบแผ่นที่มีขนาดใหญ่ที่สุดและควรเป็นตำแหน่งที่วางฐานรากจริง
- 2) ระดับความลึกของหลุมทดสอบต้องเป็นระดับเดียวกับระดับที่จะก่อสร้างฐานรากแผ่ และต้องราบเรียบ เพื่อให้หน้าสัมผัสของแผ่นเหล็กทดสอบและผิวดินแนบติดกัน
- 3) การขุดหลุมทดสอบต้องให้ความกว้างไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดแผ่นเหล็กทดสอบที่เตรียมไว้และให้รีบดำเนินการทดสอบก่อนเกิดการสูญเสียความชื้นบริเวณกันหลุม
- 4) กรณีสถานที่ก่อสร้างเป็นพื้นที่ลุ่ม กันหลุมมีน้ำขัง ให้ทำการสูบน้ำออกหรือขุดหลุมตักน้ำไว้มุมหนึ่ง แล้วจึงดำเนินการทดสอบ
- 5) กรณีต้องการทดสอบกับดินที่ชุ่มน้ำหรือพื้นดินของโครงสร้างทางชลศาสตร์ต้องทำให้ดินบริเวณรอบ ๆ จุดทดสอบชุ่มน้ำที่ความลึกลงไปไม่น้อยกว่า 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็กทดสอบแผ่นที่มีขนาดใหญ่ที่สุด
- 6) จัดให้มีการทดสอบด้วยวิธีการตอกหยั่ง (Sounding test) เพื่อตรวจสอบสภาพชั้นดินใต้ฐานรากอย่างน้อย 2 ตำแหน่งต่อจุดทดสอบ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดินในเบื้องต้นจนถึงความลึกเท่ากับหรือมากกว่าสองเท่าของความกว้างของฐานรากที่มีขนาดใหญ่ที่สุด โดยให้ทำการบันทึกค่าการตอกหยั่งตลอดช่วงความลึกของการทดสอบเพื่อใช้ประกอบการใช้งานร่วมกับผลการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของพื้นดิน
- 7) การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ต้องได้รับการตรวจสอบและเห็นชอบจากผู้ควบคุมการทดสอบก่อน จึงจะเริ่มการทดสอบได้

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) พิจารณาน้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุดสำหรับใช้ในการทดสอบ โดยให้ใช้กำลังแบกทานของดินหรือน้ำหนักที่ออกแบบที่มีค่าไม่น้อยกว่า 3 เท่าหรือตามที่ระบุไว้ในแบบ
- 2) ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ให้เริ่มการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกประมาณ 1 ใน 10 ของน้ำหนักสูงสุด และให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบแต่ละช่วงประมาณ 1 ใน 10 ของน้ำหนักสูงสุดที่กำหนดไว้ บันทึกรายละเอียดการทดสอบตามแบบฟอร์มในภาคผนวก การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน Plate bearing test
- 3) เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบแต่ละช่วง ให้เริ่มบันทึกค่าการทรุดตัวไม่น้อยกว่า 6 ค่า เช่น ณ เวลาที่ 30 วินาที, 1 นาที, 2 นาที, 4 นาที, 8 นาที, 15 นาที เป็นต้น และนาทีต่อ ๆ ไป (ถ้ามี) ทั้งนี้ต้องคณน้ำหนักบรรทุกทดสอบไว้ไม่น้อยกว่า 15 นาที ในแต่ละช่วงของการทดสอบโดยหลังจาก

15 นาทีไปแล้วให้หาค่าเฉลี่ยในเวลา 3 นาทีที่ต่อเนื่องกัน ต้องมีอัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร ต่อนาที จึงจะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบช่วงต่อไปได้ (AASHTO T 222-81)

4) กรณีที่ต้องคั่งน้ำหนักบรรทุกทดสอบไว้จนครบ 1 ชั่วโมง แล้วอัตราการทรุดตัวยังมีค่าเกินกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเฉลี่ยจากเวลา 3 นาทีที่ต่อเนื่องกัน ให้คั่งน้ำหนักบรรทุกทดสอบนั้นไว้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง หากปรากฏว่าอัตราการทรุดตัวยังมีค่าเกินกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที หรือสภาพดินฐานรากแสดงลักษณะการวิบัติ ให้ยกเลิกการทดสอบ และให้ถือน้ำหนักบรรทุกทดสอบนั้นเป็นน้ำหนักสูงสุด

5) ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุดหรือน้ำหนักที่ออกแบบไว้และให้คั่งน้ำหนักบรรทุกทดสอบไว้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง ก่อนทำการลดน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

6) ทำการลดน้ำหนักบรรทุกทดสอบลงช่วงละร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกทดสอบ โดยต้องคั่งน้ำหนักบรรทุกทดสอบไว้ให้คงที่ช่วงละไม่น้อยกว่า 15 นาที และให้บันทึกค่าการคืนตัวจากการลดน้ำหนักบรรทุกทดสอบอย่างน้อย 3 ค่า เช่น ณ เวลาที่ 1 นาที, 8 นาที และ 15 นาที เป็นต้น

7) ทำการเก็บตัวอย่างดินฐานรากกันหลุมทดสอบเพื่อนำไปหาคุณสมบัติพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) และการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve analysis) เป็นต้น

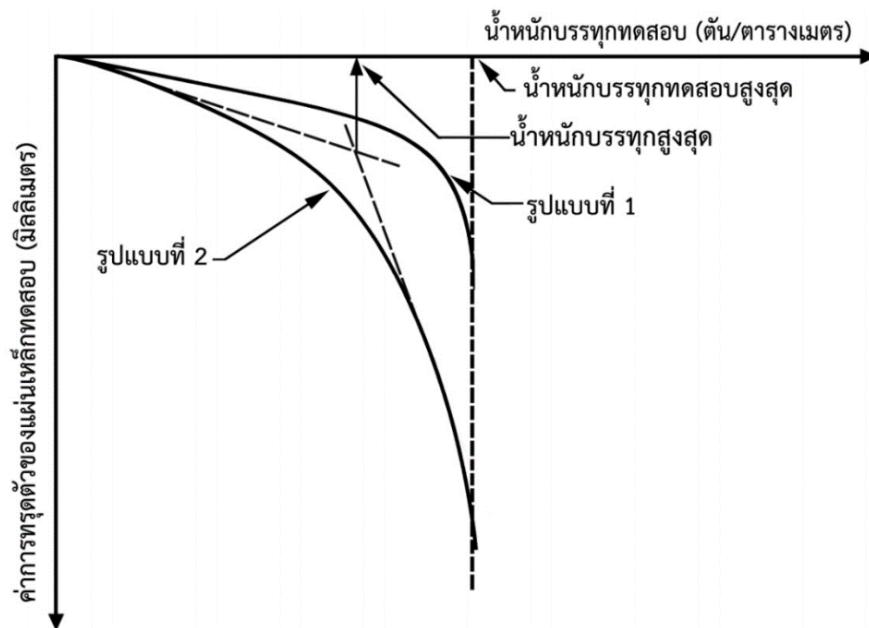
4.4.3 การคำนวณ

1) การหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

น้ำหนักบรรทุกสูงสุดประเมินได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทดสอบกับค่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบ กราฟความสัมพันธ์จำแนกได้ 2 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 เส้นกราฟความสัมพันธ์แสดงจุดวิบัติของดินฐานรากที่ชัดเจน ประเมินได้ว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด คือ น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด

รูปแบบที่ 2 เส้นกราฟความสัมพันธ์แสดงจุดวิบัติของดินฐานรากไม่ชัดเจน ประเมินหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้จากน้ำหนักบรรทุก ณ จุดตัดระหว่างเส้นตรงสองเส้นที่ลากสัมผัสเส้นกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 41



รูปที่ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกทดสอบกับค่าการหลุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบ
(กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562)

2) การหาหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของดิน

หน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของดิน พิจารณาจากน้ำหนักรรทุกสูงสุดหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย โดยอัตราส่วนความปลอดภัยไม่ควรน้อยกว่า 2

3) การหาค่าการหลุดตัวของฐานรากแผ่

3.1) กรณีดินฐานรากเป็นดินเหนียว

$$S_f = S_p \left(\frac{B}{B_p} \right) \quad \dots \text{สมการที่ 28}$$

3.2) กรณีดินฐานรากเป็นกรวดแน่นหรือทรายแน่น

$$S_f = S_p \left(\frac{[B(B_p+0.3)]}{[B_p(B+0.3)]} \right)^2 \quad \dots \text{สมการที่ 29}$$

เมื่อ B คือ ความกว้างด้านที่มากที่สุดของฐานรากแผ่ หน่วย เมตร (m)

(กรณีไม่ทราบความกว้างของฐานรากแผ่ให้กำหนดเท่ากับ 1 เมตร)

B_p คือ ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็กทดสอบ หน่วย เมตร (m)

S_f คือ ค่าการหลุดตัวของฐานรากแผ่ หน่วย มิลลิเมตร (mm)

S_p คือ ค่าการหลุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบ หน่วย มิลลิเมตร (mm)

ค่าการทรุดตัวของฐานรากแผ่ที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เกิน 25 มิลลิเมตร จึงจะใช้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดนั้น เพื่อนำไปพิจารณาหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของดิน กรณีมีค่ามากกว่า 25 มิลลิเมตร ให้แทนค่าการทรุดตัวของฐานรากแผ่ (S_p) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร ในสมการที่ 28 หรือสมการที่ 29 ตามแต่กรณี เพื่อคำนวณหาการทรุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบ (S_p) จากนั้นนำไปประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทดสอบและค่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบ โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับนำไปพิจารณาหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของดิน จะเป็นค่าน้ำหนักบรรทุกบนกราฟความสัมพันธ์ที่แผ่นเหล็กทดสอบมีค่าการทรุดตัวเทียบเท่ากับค่าการทรุดตัวของฐานรากที่ 25 มิลลิเมตร

4.5 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Sand cone method)

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นในสนามของดินหรือวัสดุบดอัดที่มีขนาดเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 2 นิ้ว (50.8 มิลลิเมตร) โดยใช้ทราย คือ ทรายออตาว่า (Ottawa sand) แทนที่ปริมาตรในหลุมตามมาตรฐาน ASTM D 1556 - 00 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method เพื่อตรวจสอบการบดอัดว่ามีความหนาแน่นที่สามารถรับน้ำหนักได้ตามข้อกำหนด เช่น งานดินเดิมและงานดินถม ต้องบดอัดให้ได้ 95% Modified AASHTO

4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

1) ขวดแก้วหรือพลาสติก ลักษณะทรงกระบอก โปร่งแสง ขนาดปริมาตรประมาณ 3,780 มิลลิลิตร (1 แกลลอน) ตรงกลางขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร ปากขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร และมีเกลียวสำหรับต่อกับกรวย

2) กรวยโลหะ สูงประมาณ 210 มิลลิเมตร ตรงกลางมีลิ้น (Valve) สำหรับปิดหรือเปิดรูทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ยาว 28.6 มิลลิเมตร (1 1/2 นิ้ว) ปากกรวยบานออก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 165.1 มิลลิเมตร (6 1/2 นิ้ว) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 171.5 มิลลิเมตร (6 3/4 นิ้ว) สูง 136.5 มิลลิเมตร (5 3/8 นิ้ว) ปลายอีกข้างหนึ่งมีเกลียวสำหรับต่อกับขวด ขณะทำการทดสอบรอยต่อระหว่างขวดและกรวยต้องปิดสนิท ในกรณีที่ไม่มีช่องว่างหรือเคลื่อนตัวได้ ต้องใส่แหวนยางหรือ Gasket

3) แผ่นฐานโลหะ ขนาด 304.8 x 304.8 มิลลิเมตร (12 x 12 นิ้ว) ตรงกลางมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 165.1 มิลลิเมตร (เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปากกรวย) มีร่องกว้างประมาณ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) สำหรับวางปากกรวยให้สนิท ขอบของแผ่นฐานยกสูงขึ้นเพื่อความสะดวกในการเก็บดินตัวอย่าง มีรูสำหรับตอกตะปูยึดแผ่นฐานไว้ทั้ง 4 มุม

หมายเหตุ เครื่องทดสอบความหนาแน่นนี้ใช้กับตัวอย่างประมาณ 2,800 มิลลิลิตร อาจดัดแปลงเครื่องมือให้เล็กลงหรือใหญ่ขึ้น ตามความเหมาะสมในการใช้งานแต่ละชนิด

4) ทรายออตาว่า (Ottawa sand) หรือทรายตามธรรมชาติหรือที่ทำขึ้น ต้องมีความสะอาด แห้ง ไหลได้โดยอิสระ ไม่มีการเชื่อมประสาน กลมไม่มีรอยแตก ไม่มีเหลี่ยมมุม ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (0.85 มิลลิเมตร) แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) และมีความหนาแน่นน้ำหนัก (Bulk density) ที่เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์

5) เครื่องชั่งสนาม ชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม มีความละเอียดอ่านค่าได้ระดับ 1.0 กรัม

6) เครื่องชั่งขนาด 1,000 กรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม

7) เครื่องอบ ควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส หรือเครื่องมือที่สามารถทำให้ตัวอย่างแห้ง เพื่อหาปริมาณน้ำในดิน

8) เครื่องมือประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ช้อนตักดิน กระจบเก็บตัวอย่าง ภาชนะใส่ดิน เกรียง ส้อม ค้อน อีเทอร์ จอบ พลั่ว แปรงขน แปรงลวด เหล็กปาด ตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ตะแกรงเบอร์ 20 (0.85 มิลลิเมตร) ตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) น้ำกลั่น และเทอร์โมมิเตอร์ แสดงในรูปที่ 42



รูปที่ 42 ชุดเครื่องมือทดสอบความหนาแน่นในสนามโดยใช้ทราย

(<https://www.lgtool.com/product/227848>, Retrieved September 15, 2023)

4.5.2 วิธีการทดสอบ

การตรวจสอบความหนาแน่นน้ำหนักของทราย (Bulk density of sand)

1) หาปริมาตรของขวด (L)

1.1) ตั้งขวดเปล่าพร้อมกรวย บนพื้นที่มั่นคงได้ระดับแล้วเปิดลิ้นไว้

1.2) เติมน้ำกลั่นลงในขวด จนกระทั่งระดับน้ำท่วมกรวยแล้วจึงปิดลิ้น แล้วเทน้ำที่ล้นข้างบนออกให้หมด ถ้าเกลียวของขวดและกรวยปิดไม่สนิทจะมีน้ำซึมออกมาในขณะที่เติมน้ำ ให้ใช้พาราฟิน หรือเทป หรือซีเมนต์ ฉาบป้องกันน้ำซึม

1.3) เช็ดน้ำที่ติดกรวยให้แห้ง แล้วนำขวดน้ำไปชั่งหาน้ำหนักของน้ำเต็มขวด โดยให้หักน้ำหนักของวัสดุป้องกันน้ำรั่วออก และวัดอุณหภูมิของน้ำในขวด

1.4) ทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักน้ำเต็มขวด (M_2) และอุณหภูมิของน้ำ เพื่อนำไปหาปริมาตรของน้ำต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (T) จากตารางที่ 20

1.5) คำนวณหาค่าปริมาตรของขวด (L) จากสมการที่ 30

หมายเหตุ 1. ต้องทำเครื่องหมายไว้ว่าเกลียวของขวดและกรวยเคลื่อนตัวหรือไม่ เกลียวต้องไม่ขยับเพื่อให้ปริมาตรของขวดคงที่ตลอดเวลาที่ทดสอบ

2. เมื่อได้ปริมาตรของขวดเรียบร้อยแล้ว ให้บันทึกปริมาตรที่ถูกต้องของขวดนั้นเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

ตารางที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรของน้ำต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก

อุณหภูมิ		ปริมาณน้ำต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก
องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์	มิลลิลิตรต่อกรัม (T)
12	53.6	1.000 / 48
14	57.2	1.000 / 73
16	60.8	1.001 / 03
18	64.4	1.001 / 38
20	68.8	1.001 / 77
22	71.6	1.002 / 21
24	75.2	1.002 / 68
26	78.8	1.003 / 20
28	82.4	1.003 / 75
30	86.0	1.003 / 35
32	89.6	1.004 / 97

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2546)

2) หาน้ำหนักของทรายเต็มขวด (M_1)

2.1) หายขวดเปล่าที่ประกอบเข้ากับกรวย ซึ่งทำความสะอาดและชั่งเรียบร้อยแล้ว ลงบนพื้นที่มีน้ำหนักได้ระดับ ปิดลิ้นแล้วเททรายใส่ในกรวยจนเต็ม

2.2) เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงในขวด แล้วคอยเติมทรายให้เต็มกรวยอยู่ตลอดเวลา ต้องระวังไม่ให้ขวดทรายกระเทือน เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจะทำให้ค่าความหนาแน่นของทรายผิดได้ เมื่อทรายล้นขวดแล้วจึงปิดลิ้นแล้วเททรายที่ล้นออกให้หมด

2.3) ชั่งขวดทรายแล้วหาน้ำหนักของทรายเต็มขวดโดยเอาน้ำหนักของขวดเปล่าพร้อมกรวยไปหักออกจากน้ำหนักของขวดทราย

2.4) ทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของทรายเต็มขวด (M_1) แล้วนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของทราย (ρ_s) ตามสมการที่ 31

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

1) ตั้งเครื่องชั่งให้อยู่ในแนวระดับและปรับให้ได้ศูนย์ เพื่อชั่งหาน้ำหนักของกระป๋องเก็บตัวอย่าง (X_4) และน้ำหนักภาชนะใส่ดิน (P_2)

2) เติมทรายลงในขวดซึ่งประกอบเข้ากับกรวยเรียบร้อยแล้วให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการใช้งาน ปิดลิ้นไว้แล้วนำขวดทรายไปชั่งได้น้ำหนักครั้งที่หนึ่ง (M_1)

3) ปรับพื้นผิวทดสอบให้เรียบและได้ระดับ วางแผ่นฐานให้สนิทกับพื้น แล้วตอกตะปูยึดให้แน่น ใช้แปรงขนปัดฝุ่นผิวหน้าดินและแผ่นฐานออกให้หมด

4) คว่ำขวดทรายให้ปากกรวยตรงกับร่องของแผ่นฐาน เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงจนล้นขึ้นมาเต็มกรวยโดยไม่ให้ขวดทรายกระเทือน เมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น นำขวดทรายที่เหลือไปชั่งได้น้ำหนักครั้งที่สอง (M_2) น้ำหนักที่หายไป คือน้ำหนักของทรายในกรวย (M_g) ตามสมการที่ 32

หมายเหตุ การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีเม็ดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่ต้องการความรวดเร็วและค่าละเอียดไม่มากนัก ให้ใช้ค่าปริมาตรของกรวยเป็นค่าคงที่ ซึ่งหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง

5) เก็บทรายบนแผ่นฐานและพื้นทดสอบออกให้หมด ให้ผิวหน้าคงสภาพเดิมเหมือนก่อนเททราย สำหรับทรายที่สกปรกหรือขึ้น ให้นำไปทำความสะอาด เติมทรายที่สะอาดลงในขวด จนมีปริมาตรเพียงพอต่อการใช้งาน ปิดลิ้นไว้ แล้วนำขวดทรายไปชั่งหาน้ำหนักครั้งที่ 3 (M_3)

6) เจาะดินตรงกลางแผ่นฐานเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ารูตรงกลางของแผ่นฐาน โดยขุดเป็นแนวตั้งฉากตลอดชั้นวัสดุที่ทดสอบหรือลึกประมาณ 100 – 150 มิลลิเมตร แล้วแต่ชนิดของงาน และขนาดของวัสดุตามตารางที่ 21 แต่งหลุมให้เรียบร้อยให้ทรายแทนที่ได้สะดวก

7) รวบรวมตัวอย่างที่ขุดได้ทั้งหมดใส่ภาชนะแล้วนำไปชั่งได้น้ำหนักรวมของตัวอย่างขึ้นและภาชนะใส่ตัวอย่าง (P_1) จากนั้นนำน้ำหนักของภาชนะใส่ตัวอย่าง (P_2) ไปหักออก จะได้น้ำหนักของดินขึ้นในหลุม (P_3) ตามสมการที่ 39

8) คลุกดินที่เก็บจากหลุมให้ทั่ว แล้วเก็บใส่กระป๋องเก็บตัวอย่าง อย่างน้อย 100 กรัม หรือแล้วแต่ขนาดของวัสดุตามตารางที่ 21

9) ปิดฝากระป๋องป้องกันดินหล่นออก แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักทันที ได้น้ำหนักรวมของดินขึ้นและกระป๋องเก็บตัวอย่าง (X_1) และนำดินในกระป๋องที่ปิดฝาไปอบในเครื่องอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างแห้งแล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักรวมของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง (X_2) จากนั้นนำไปหักออกจากน้ำหนักของดินขึ้นและกระป๋องเก็บตัวอย่าง จะได้น้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในดิน (X_3) ตามสมการที่ 35

10) นำน้ำหนักของกระป๋องเก็บตัวอย่าง (X_4) ไปหักออกจากน้ำหนักรวมของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง (X_2) จะได้น้ำหนักของดินแห้ง (X_5) ตามสมการที่ 36

11) หาปริมาณน้ำในดิน (W) โดยคิดเทียบน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในดิน (X_3) เป็นร้อยละของน้ำหนักของดินแห้ง (X_5) ในหน่วยน้ำหนักเดียวกัน ตามสมการที่ 37

12) คำว่าขุดทรายให้ปากกรวยตรงกับร่องของแผ่นฐาน (การทดสอบที่ต้องการความละเอียดและถูกต้องให้ทำเครื่องหมายไว้ที่ปากกรวยด้านนอก และที่ขอบรูกลางแผ่นฐานด้านบน ในขณะที่คำว่าขุดทรายลงบนแผ่นฐานต้องเลื่อนให้เครื่องหมายตรงกันทุกครั้ง) เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงจนเต็มหลุม ต้องไม่ให้ขุดทรายกระเทือน เมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น นำขุดทรายที่เหลือไปชั่งหาน้ำหนักครั้งที่ 4 (M_4) เก็บทรายสะอาดเพื่อใช้งานต่อไป ส่วนทรายที่ขึ้นหรือสกปรกให้นำไปทำความสะอาด ผลต่างของน้ำหนักในการทดสอบครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4 คือน้ำหนักของทรายที่แทนที่ในหลุมและกรวย (M_6) ตามสมการที่ 33

13) นำน้ำหนักของทรายในกรวย (M_5) ไปหักออกจากน้ำหนักของทรายในหลุมและกรวย (M_6) จะได้น้ำหนักของทรายในหลุม (M_7) ตามสมการที่ 34

14) หาปริมาตรของหลุม (V_1) โดยเอาความหนาแน่นของทราย (ρ_s) ไปหารน้ำหนักของทรายในหลุม (M_7) ตามสมการที่ 38

15) หาความหนาแน่นของดินขึ้น (ρ_1) โดยเอาปริมาตรของหลุม (V_1) ไปหารน้ำหนักของดินขึ้นในหลุม (P_3) ตามสมการที่ 40 และความหนาแน่นของดินแห้ง (ρ_d) ตามสมการที่ 41

ตารางที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดวัสดุ ปริมาตรหลุม และน้ำหนักที่ใช้หาความชื้น

ขนาดใหญ่สุดของวัสดุ		ปริมาตรต่ำสุดของหลุม (มิลลิลิตร)	น้ำหนักต่ำสุดของวัสดุ ที่ใช้หาความชื้น (กรัม)
มิลลิเมตร	ขนาดตะแกรง		
4.75	เบอร์ 4	700	100
12.5	1/2 นิ้ว	1,400	250
25.0	1 นิ้ว	2,100	500

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2546)

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 50.8 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร น้อยกว่า 10% ของน้ำหนักรวม

- 1) ปฏิบัติตามการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ข้อย่อย 1) ถึง 7)
- 2) ใช้ตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร แบ่งแยกดินที่เก็บจากหลุม และชั่งหาน้ำหนักของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรง (P_d) โดยนำส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ใส่ลงในหลุมทดสอบ
- 3) ปฏิบัติตามการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ข้อย่อย 8) ถึง 13)
- 4) หาปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (V_2) ตามสมการที่ 42 โดยเอาความหนาแน่นของทราย (ρ_s) ไปหารน้ำหนักของทรายในหลุม (M_7)
- 5) หาความหนาแน่นของดินชื้น (ρ_2) โดยเอาปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (V_2) ไปหารน้ำหนักของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (P_d) ตามสมการที่ 43 และความหนาแน่นของดินแห้ง (ρ_d) ตามสมการที่ 44

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 50.8 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร มากกว่าหรือเท่ากับ 10% ของน้ำหนักรวม

- 1) ปฏิบัติตามการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ข้อย่อย 1) ถึง 7)
- 2) ใช้ตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร แบ่งแยกดินที่เก็บจากหลุม ชั่งหาน้ำหนักของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรง (P_5) และชั่งหาน้ำหนักของดินที่เม็ดค้างตะแกรง (P_6) โดยส่วนที่เม็ดค้างตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ให้คำนวณหาปริมาตรของดินที่มีเม็ดค้างตะแกรง (V_3) ตามสมการที่ 45
- 3) ปฏิบัติตามการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของดิน ที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร ข้อย่อย 8) ถึง 13)

4) หาปริมาตรของหลุม (V_d) โดยเอาความหนาแน่นของทราย (ρ_s) ไปหารน้ำหนักรวมของทรายในหลุม และผลต่างของปริมาตรของหลุมกับปริมาตรของดินที่มีเม็ดค้ำตะแกรง คือปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (V_5) ตามสมการที่ 46

5) หาคความหนาแน่นของดินชั้น (ρ_3) ตามสมการที่ 47 โดยเอาปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (V_5) ไปหารน้ำหนักของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (P_5) และหาคความหนาแน่นของดินแห้ง (ρ_d) ตามสมการที่ 48

6) หาร้อยละการบดอัด (% Compaction) (ρ_c) โดยเอาความหนาแน่นสูงสุดของดินแห้ง (ρ_m) ไปหารความหนาแน่นของดินแห้ง (ρ_d) ตามสมการที่ 49

4.5.3 การคำนวณ

1) ความหนาแน่นของทราย (ρ_s)

1.1) ปริมาตรของขวด

$$L = M_2 T \quad \dots \text{สมการที่ 30}$$

เมื่อ L คือ ปริมาตรของขวด หน่วย มิลลิลิตร (ml)

M_2 คือ น้ำหนักของน้ำเต็มขวด หน่วย กรัม (g)

T คือ ปริมาตรของน้ำ 1 กรัม ที่อุณหภูมิทดสอบ ดังแสดงใน
ตารางที่ 18 หน่วย มิลลิลิตรต่อกรัม (ml/g)

1.2) ความหนาแน่นของทราย

$$\rho_s = \frac{M_1}{L} \quad \dots \text{สมการที่ 31}$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของทราย หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

M_1 คือ น้ำหนักของทรายเต็มขวด หน่วย กรัม (g)

L คือ ปริมาตรของขวด หน่วย มิลลิลิตร (ml)

2) น้ำหนักของทรายในหลุม

2.1) น้ำหนักของทรายในกรวย

$$M_5 = M_1 - M_2 \quad \dots \text{สมการที่ 32}$$

เมื่อ M_5 คือ น้ำหนักของทรายในกรวย หน่วย กรัม (g)

M_1 คือ น้ำหนักครั้งที่หนึ่งของขวด กรวยและทราย หน่วย กรัม (g)

M_2 คือ น้ำหนักครั้งที่สองของขวด กรวยและทราย หน่วย กรัม (g)

2.2) น้ำหนักของทรายในหลุมและกรวย

$$M_6 = M_3 - M_4 \quad \dots \text{สมการที่ 33}$$

- เมื่อ M_6 คือ น้ำหนักของทรายในหลุมและกรวย หน่วย กรัม (g)
 M_3 คือ น้ำหนักครั้งที่สามของขวด กรวยและทราย หน่วย กรัม (g)
 M_4 คือ น้ำหนักครั้งที่สี่ของขวด กรวยและทราย หน่วย กรัม (g)

2.3) น้ำหนักของทรายในหลุม

$$M_7 = M_6 - M_5 \quad \dots \text{สมการที่ 34}$$

- เมื่อ M_7 คือ น้ำหนักของทรายในหลุม หน่วย กรัม (g)
 M_6 คือ น้ำหนักของทรายในหลุมและกรวย หน่วย กรัม (g)
 M_5 คือ น้ำหนักของทรายในกรวย หน่วย กรัม (g)

3) ปริมาณน้ำในดิน (Water content)

3.1) น้ำหนักของน้ำที่อยู่ในดิน

$$X_3 = X_1 - X_2 \quad \dots \text{สมการที่ 35}$$

- เมื่อ X_3 คือ น้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในดิน หน่วย กรัม (g)
 X_1 คือ น้ำหนักของดินขึ้นและกระป๋องเก็บตัวอย่าง หน่วย กรัม (g)
 X_2 คือ น้ำหนักของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง หน่วย กรัม (g)

3.2) น้ำหนักของดินแห้ง

$$X_5 = X_2 - X_4 \quad \dots \text{สมการที่ 36}$$

- เมื่อ X_5 คือ น้ำหนักของดินแห้ง หน่วย กรัม (g)
 X_2 คือ น้ำหนักของดินแห้งและกระป๋องเก็บตัวอย่าง หน่วย กรัม (g)
 X_4 คือ น้ำหนักของกระป๋องเก็บตัวอย่าง หน่วย กรัม (g)

3.3) ปริมาณน้ำในดิน (Moisture content)

$$W = \frac{X_3}{X_5} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 37}$$

- เมื่อ W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ
 X_3 คือ น้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในดิน หน่วย กรัม (g)
 X_5 คือ น้ำหนักของดินแห้ง หน่วย กรัม (g)

4) ความหนาแน่นของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

4.1) ปริมาตรของหลุม

$$V_1 = \frac{M_7}{\rho_s} \quad \dots \text{สมการที่ 38}$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของหลุม หน่วย มิลลิลิตร (ml)

M_7 คือ น้ำหนักของทรายในหลุม หน่วย กรัม (g)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของทราย หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

4.2) น้ำหนักของดินขึ้นจากหลุม

$$P_3 = P_1 - P_2 \quad \dots \text{สมการที่ 39}$$

เมื่อ P_3 คือ น้ำหนักของดินขึ้นจากหลุม หน่วย กรัม (g)

P_1 คือ น้ำหนักของดินขึ้นและภาชนะใส่ดิน หน่วย กรัม (g)

P_2 คือ น้ำหนักของภาชนะใส่ดิน หน่วย กรัม (g)

4.3) ความหนาแน่นของดินขึ้น (Wet density)

$$\rho_1 = \frac{P_3}{V_1} \quad \dots \text{สมการที่ 40}$$

เมื่อ ρ_1 คือ ความหนาแน่นของดินขึ้น หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

P_3 คือ น้ำหนักของดินขึ้นจากหลุม หน่วย กรัม (g)

V_1 คือ ปริมาตรของหลุม หน่วย มิลลิลิตร (ml)

4.4) ความหนาแน่นของดินแห้ง (Dry density)

$$\rho_d = \frac{\rho_1}{1 + \frac{w}{100}} \quad \dots \text{สมการที่ 41}$$

เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นของดินแห้ง หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของดินขึ้น หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

w คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ

5) ความหนาแน่นของดินที่มีส่วนของเม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร น้อยกว่า 10% ของน้ำหนักรวม

5.1) ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

$$V_2 = \frac{M_7}{\rho_s} \quad \dots \text{สมการที่ 42}$$

เมื่อ V_2 คือ ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
หน่วย มิลลิลิตร (ml)

M_7 คือ น้ำหนักของทรายในหลุม หน่วย กรัม (g)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของทราย หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

5.2) ความหนาแน่นของดินชื้น (Wet density)

$$\rho_2 = \frac{P_4}{V_2} \quad \dots \text{สมการที่ 43}$$

เมื่อ ρ_2 คือ ความหนาแน่นของดินชื้น หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

P_4 คือ น้ำหนักของดินชื้นที่มีเม็ดผ่านตะแกรง 19.0 มิลลิเมตร หน่วย กรัม (g)

V_2 คือ ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
หน่วย มิลลิลิตร (ml)

5.3) ความหนาแน่นของดินแห้ง (Dry density)

$$\rho_d = \frac{\rho_2}{1 + \frac{w}{100}} \quad \dots \text{สมการที่ 44}$$

เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นของดินแห้ง หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

ρ_2 คือ ความหนาแน่นของดินชื้น หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

w คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ

**6) การหาความหนาแน่นของดินที่มีส่วนของเม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 มากกว่าหรือเท่ากับ 10% ของน้ำหนักรวม**

6.1) ปริมาตรของดินที่มีเม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

$$V_3 = \frac{P_6}{G \times \rho_w} \quad \dots \text{สมการที่ 45}$$

เมื่อ V_3 คือ ปริมาตรของดินที่มีเม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 หน่วย มิลลิลิตร (ml)

P_6 คือ น้ำหนักของส่วนที่เม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 หน่วย กรัม (g)

G คือ ความถ่วงจำเพาะของส่วนที่เม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0
 มิลลิเมตร

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ 1 กรัมต่อมิลลิลิตร

6.2) ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร

$$V_5 = V_4 - V_3 \quad \dots \text{สมการที่ 46}$$

เมื่อ V_5 คือ ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 หน่วย มิลลิลิตร (ml)

V_4 คือ ปริมาตรของหลุม หน่วย มิลลิลิตร (ml)

V_3 คือ ปริมาตรของดินที่มีเม็ดค้ำตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 หน่วย มิลลิลิตร (ml)

6.3) ความหนาแน่นของดินชื้น (Wet density)

$$\rho_3 = \frac{P_5}{V_5} \quad \dots \text{สมการที่ 47}$$

เมื่อ ρ_3 คือ ความหนาแน่นของดินชื้น หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

P_5 คือ น้ำหนักของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 หน่วย กรัม (g)

V_5 คือ ปริมาตรของดินที่มีเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร
 หน่วย มิลลิลิตร (ml)

6.4) ความหนาแน่นของดินแห้ง (Dry density)

$$\rho_d = \frac{\rho_3}{1 + \frac{w}{100}} \quad \dots \text{สมการที่ 48}$$

เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นของดินแห้ง หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

ρ_3 คือ ความหนาแน่นของดินขึ้น หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ

7) ร้อยละการบดอัด (% Compaction)

$$\rho_c = \frac{\rho_d}{\rho_m} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 49}$$

เมื่อ ρ_c คือ ร้อยละการบดอัด

ρ_d คือ ความหนาแน่นของดินแห้ง หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

ρ_m คือ ความหนาแน่นสูงสุดของดินแห้ง หน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

บทที่ 5

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test) เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินจากตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่สำรวจ ประกอบด้วย การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) คุณสมบัติทางกำลังหรือทางกล (Mechanical properties) ส่วนประกอบของวัสดุ (Chemical properties) และอัตราส่วนผสมของวัสดุ (Composition) การทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ

ลำดับ	การทดสอบ	มาตรฐาน	ผลจากการทดสอบ	การประยุกต์ใช้ผลการทดสอบ
1	Sieve analysis	ASTM D422-63	การกระจายขนาดของดิน เม็ดหยาบ	- การจำแนกประเภทดิน - ออกแบบวัสดุกรอง (Filter)
2	Hydrometer analysis	ASTM D7928-21	การกระจายขนาดของดิน เม็ดละเอียด	ออกแบบวัสดุกรอง (Filter)
3	Atterberg's limits	ASTM D4318-17	- Liquid Limit (L.L.) - Plastic Limit (P.L.) - Shrinkage Limit (S.L.) - Plastic Index (P.I.)	- การจำแนกประเภทดิน - วิเคราะห์เสถียรภาพ ลาดตลิ่ง - การยุบตัวคายน้ำ
4	Specific gravity	ASTM D854-00	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	คำนวณพื้นฐานมวลดิน
5	Relative density test	ASTM D4253-16 ASTM D4254-16	-Maximum dry density, (ρ_{dmax}) -Minimum dry density (ρ_{dmin}) -Relative density (D_r) ของดินไม่มีความเชื่อมั่น	ควบคุมคุณภาพการบดอัด
6	Los Angeles Abrasion test	ASTM C535	ร้อยละความสึกกร่อน	ตรวจสอบความสึกกร่อน จากการขัดสี
7	Soundness test	ASTM C88	ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย	ตรวจสอบความคงทนของ กรวดทราย
8	Direct shear test	ASTM D3080	- Cohesion (C) - Angle of internal friction (ϕ)	- วิเคราะห์ความมั่นคง - ออกแบบฐานรากและ เสาเข็ม

ตารางที่ 22 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

ลำดับ	การทดสอบ	มาตรฐาน	ผลจากการทดสอบ	การประยุกต์ใช้ผลการทดสอบ
9	Unconfined compression test	ASTM D2166-06	- Unconfined compression strength (q_u) - Undrained shear strength (S_u)	- การออกแบบฐานราก - กำหนดสถานะภาพความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)
10	Compaction	ASTM D698-75 ASDM D1557-78	- Compaction Curve - ρ_{dmax} , W_{opt}	- การควบคุมคุณภาพในสนาม - กำหนดความหนาแน่นในการทดสอบ
11	Permeability test	ASTM D2434-68 (2006)	- ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k)	- คุณสมบัติของดิน

5.1 การทดสอบหาการกระจายขนาดผลของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน (Sieve analysis)

เพื่อหาการกระจายขนาดผลของดินเม็ดหยาบ ที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.075 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนใหญ่ไม่มีความเหนียวหรือแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน ได้แก่ กรวดมนใหญ่ (Boulder) กรวดมนเล็ก (Cobble) กรวด (Gravel) และทราย (Sand) ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เป็นสัดส่วนของเม็ดดินขนาดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในมวลดิน จากนั้นนำไปจำแนกชนิดดินตามระบบ USCS หรือ AASHTO ต่อไป โดยตะแกรงร่อนมีขนาดตะแกรงและขนาดช่องเปิดหลายขนาด แสดงตาม**ตารางที่ 23** นอกจากนี้ขนาดเม็ดดินมีอิทธิพลกับการซึมน้ำ, การรับแรง, อัตราการทรุดตัว และอื่น ๆ อีกมาก

ตารางที่ 23 ขนาดตะแกรงร่อน

ขนาดตะแกรง (นิ้ว)	ขนาดช่องเปิด (มิลลิเมตร)	ขนาดตะแกรง (เบอร์)	ขนาดช่องเปิด (มิลลิเมตร)	ขนาดตะแกรง (เบอร์)	ขนาดช่องเปิด (มิลลิเมตร)
3	75.0	4	4.75	60	0.25
2½	63.0	8	2.36	80	0.18
2	50.0	10	2.0	100	0.15
1 ½	37.5	16	1.18	120	0.125
1	25.0	20	0.85	150	0.1
¾	19.0	30	0.6	200	0.075
½	12.5	40	0.4	300	0.05
⅜	9.5	50	0.3	400	0.0385

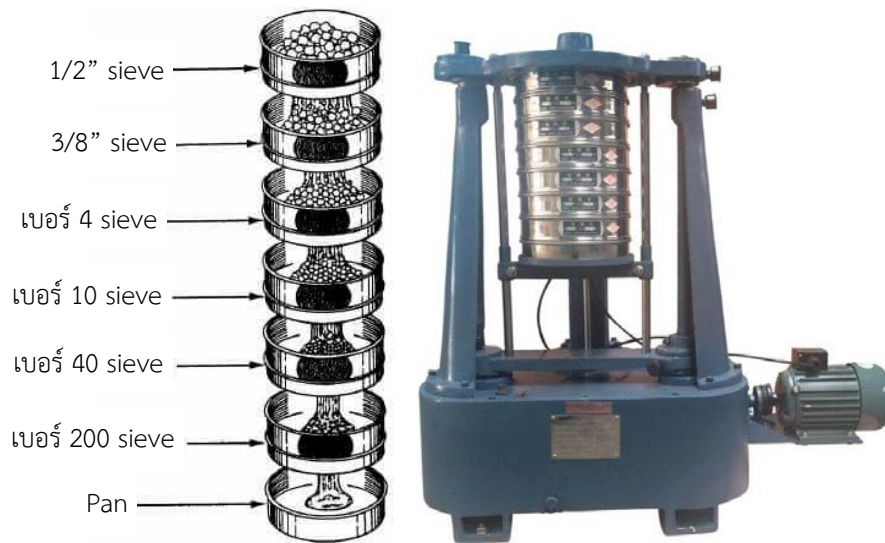
(ที่มา : ASTM E11)

5.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ชุดตะแกรงร่อน ขนาด 2 นิ้ว ถึงเบอร์ 200 ตามชนิดของวัสดุ พร้อมถาดรอง (Pan)

ดังแสดงในรูปที่ 43

- 2) เครื่องสั่นกลไฟฟ้า (Mechanical shaker)
- 3) เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample splitter)
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
- 5) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 105 - 110 องศาเซลเซียส
- 6) ถาดใส่ตัวอย่าง
- 7) แปรงทำความสะอาดตะแกรง
- 8) ค้อนยางสำหรับทุบดิน



รูปที่ 43 ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐานและเครื่องสั่นกลไฟฟ้า (Michaud, L.D., 2016)

5.1.2 วิธีการทดสอบ

ดินประเภทที่เกิดจากการผุร่อนของหิน (Residual soils) ลักษณะเม็ดดินอาจแตกหักง่าย จึงควรทำการร่อนผ่านตะแกรงแบบเปียกเพื่อแยกดินเม็ดละเอียดออกก่อน จากนั้นทำการทดสอบหาการกระจายขนาดคละของเม็ดดินโดยวิธีตะแกรงร่อน ดังนี้

1) นำตัวอย่างดินมาคลุกให้เข้ากัน ถ้าเม็ดดินจับตัวกันเป็นก้อนให้ใช้ค้อนยางทุบ เพื่อให้เม็ดดินที่เกาะตัวแตกออกจากกัน จากนั้นเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบโดยใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง และนำไปอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินที่อบแห้งแล้ว จำนวนไม่น้อยกว่า 1,000 กรัม เพื่อเตรียมทดสอบ

3) เลือกตะแกรงร่อนขนาดที่ต้องการตามมาตรฐาน และตรวจสอบว่าตะแกรงมีส่วนชำรุดหรือไม่ จากนั้นทำความสะอาดตะแกรงร่อนด้วยแปรงทำความสะอาด และชั่งน้ำหนักตะแกรงร่อนแต่ละขนาด และถาดรอง จากนั้นบันทึกรายละเอียดในแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบหาการกระจายขนาดคละของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน Sieve analysis

4) นำตะแกรงร่อนขนาดที่ต้องการวางเรียงกัน โดยให้ตะแกรงขนาดช่องใหญ่สุดวางอยู่ด้านบน เรียงลงมาถึงตะแกรงร่อนเบอร์ 200 และถาดรองตามลำดับ

5) นำตัวอย่างดินที่ชั่งน้ำหนักแล้วใส่ในตะแกรงร่อนชั้นบนสุด ทำการปิดฝาและเขย่าโดยใช้เครื่องสั่นกลไฟฟ้าเป็นเวลา 15 นาที ดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงร่อนเบอร์ 200 จะตกอยู่ในถาดรอง ซึ่งอยู่ด้านล่างสุดของชุดตะแกรงร่อน

6) นำตัวอย่างดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงร่อนแต่ละขนาดและถาดรอง มาชั่งหาน้ำหนัก และจดบันทึก เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละที่ผ่านตะแกรง

5.1.3 การคำนวณ

1) น้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรง (Weight of soil retained)

น้ำหนักดินค้างตะแกรง = (น้ำหนักตะแกรง + น้ำหนักดินที่ค้าง) - น้ำหนักตะแกรง ...สมการที่ 50

2) ร้อยละดินค้างตะแกรง (Percent retained)

$$\text{ร้อยละดินค้างตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักของดินค้างตะแกรง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของดินทั้งหมด (กรัม)}} \times 100 \quad \dots\text{สมการที่ 51}$$

3) ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (Cumulative percent retained)

ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม = ผลรวมสะสมของร้อยละดินค้างตะแกรงขนาดช่องใหญ่กว่า ...สมการที่ 52

4) ร้อยละผ่านตะแกรง (Percent finer หรือ Percent passing)

ร้อยละผ่านตะแกรง = 100 - ร้อยละดินค้างสะสม ...สมการที่ 53

5) สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity, C_u)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \dots\text{สมการที่ 54}$$

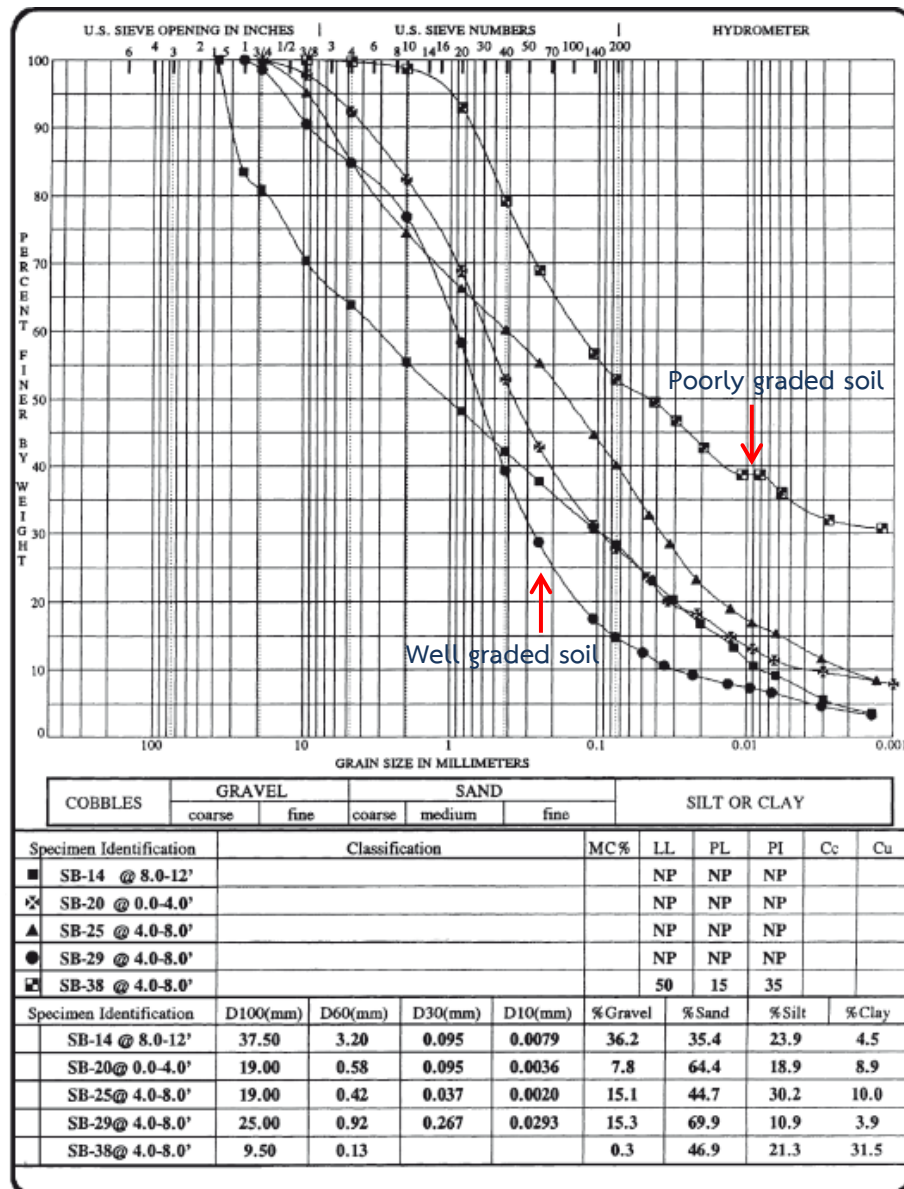
6) สัมประสิทธิ์ของความโค้ง (Coefficient of curvature, C_c)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} \quad \dots\text{สมการที่ 55}$$

เมื่อ D_{10} , D_{30} และ D_{60} คือ ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวน 10%, 30% และ 60% ตามลำดับ

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงด้วยกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain size distribution) ในกราฟแบบกึ่งล็อก (Semi-log) โดยนำค่าร้อยละผ่านตะแกรง (Percent finer) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดิน (Grain or particle size) มาพล็อต ดังแสดงในรูปที่ 44 โดยดินที่มีการกระจายดี (Well graded soil) เส้นกราฟจะมีลักษณะโค้งเรียบสม่ำเสมอจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง และดินที่มีการกระจายไม่ดี (Poorly graded soil) เส้นกราฟจะมีลักษณะราบในช่วงที่ขนาดของเม็ดดินขนาดใดขนาดหนึ่งหายไป ยกตัวอย่างเช่น ดินมีการกระจายของเม็ดดินขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ช่วงขนาดกลางที่หายไป เส้นกราฟจะมีลักษณะราบ

นอกจากนี้ ดินที่มีค่า C_u น้อยกว่า 4 จัดว่าเป็นดินที่มีการกระจายขนาดไม่ดี ส่วนดินที่มีค่า C_u มากกว่า 4 รวมถึงเส้นโค้งการกระจายขนาดมีลักษณะเรียบและสมมาตร และมีค่า C_c ระหว่าง 1 ถึง 3 จัดว่าเป็นดินที่มีการกระจายขนาดดี (สัมพันธ์ สิงหราชวรพันธุ์, 2545)



รูปที่ 44 กราฟแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน (Sieve analysis) และวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis) (Day, 2012)

5.2 การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis)

การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ เป็นวิธีการทดสอบหาการกระจายขนาดของดินเม็ดละเอียด ที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 หรือมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร เช่น ทรายแป้ง ดินเหนียว เป็นต้น โดยอาศัยหลักการตกตะกอนของเม็ดดินในน้ำด้วยความเร็วที่ต่างกัน ตามมาตรฐาน ASTM D7928-21 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis ซึ่งการตกตะกอนของเม็ดดินขึ้นอยู่กับรูปร่าง ขนาด น้ำหนัก และค่าความหนืดของน้ำ (สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ, 2549)

5.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ไฮโดรมิเตอร์ ชนิดอ่านค่าความถ่วงจำเพาะ (ASTM 151H) ได้ประมาณ 0.995 -1.030 หรืออ่านค่าน้ำหนักเม็ดดินต่อปริมาตร (ASTM 152H) ได้ประมาณ 0 - 60 กรัม/ลิตร
- 2) ผงช่วยให้กระจายตัว (Dispersing agent) โดยใช้โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (Sodium hexametaphosphate)
- 3) กระบอกไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer jar) หรือกระบอกตวง (Measuring cylinder) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ
- 4) เทอร์โมมิเตอร์ 0 - 50 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1 - 0.5 องศาเซลเซียส
- 5) แท่งคนสาร
- 6) น้ำกลั่น
- 7) ภาชนะใส่ตัวอย่างดิน ภาชนะผสมดิน
- 8) นาฬิกาจับเวลา
- 9) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
- 10) ตู้อบ

5.2.2 วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างดินร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ให้ได้น้ำหนักผ่านตะแกรงประมาณ 100 กรัม
- 2) เตรียมสารช่วยให้เม็ดดินกระจายตัว ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยใช้โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟตปริมาณ 4 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยตั้งทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง ตามที่ ASTM แนะนำ
- 3) นำตัวอย่างดินแห้งที่เตรียมไว้ประมาณ 50 กรัม มาผสมกับสารละลายโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ใช้แท่งคนสารคนให้เข้ากันหรือใช้เครื่องกวนดินไฟฟ้าปั่นส่วนผสมดินประมาณ

10 นาที จากนั้นนำมาเทใส่กระบอกตวงแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
ดังแสดงในรูปที่ 45



รูปที่ 45 การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์
(สุชาติ ทองเงิน, 2557)

4) ใส่ น้ำกลั่นในกระบอกตวงอีกอัน เพื่อใช้ล้างน้ำโคลนที่อาจติดไฮโดรมิเตอร์หลังจากการวัด (โดยจับที่ก้านไฮโดรมิเตอร์จุ่มลงไปใต้น้ำแล้วหมุนไปมา) และแช่ไฮโดรมิเตอร์ในระหว่างที่ไม่ใช้วัด

5) ใช้จุกยางปิดปากกระบอกตวงและพลิกไปมา ประมาณ 1 นาที เพื่อให้ตะกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นวางลงแล้วเริ่มจับเวลาทันที

6) หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในน้ำโคลนเพื่ออ่านค่า R จากไฮโดรมิเตอร์ ที่เวลา 15 วินาที, 30 วินาที, 1 นาที และ 2 นาที โดยวัดอุณหภูมิ ณ เวลาที่อ่านค่าบนไฮโดรมิเตอร์ทุกครั้ง และบันทึกรายละเอียดการทดสอบในรูปแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ **Hydrometer analysis** โดยไม่ต้องยกไฮโดรมิเตอร์ออกขณะที่อ่านค่า เมื่ออ่านค่าเวลาครบแล้วจึงยกไฮโดรมิเตอร์ออก

7) เขย่ากระบอกอีกครั้งตามขั้นตอนที่ 5 แล้ววัดค่า R ที่เวลา 2, 5, 10, 20, นาที (เพิ่มระยะเวลาอ่านครั้งต่อไปประมาณ 2 เท่า) จนกระทั่งค่าที่อ่านได้คงที่โดยประมาณจึงหยุดการทดสอบ หลังจากการอ่านค่าแต่ละครั้งให้ยกไฮโดรมิเตอร์ออกไปจุ่มไว้ในกระบอกน้ำเปล่าที่เตรียมไว้และปิดปากกระบอกน้ำโคลนด้วยจุกยาง

8) หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ให้เขย่ากระบอก เทน้ำโคลนออกจากกระบอกใส่ภาชนะ โดยล้างดินที่ก้นกระบอกออกให้หมด แล้วนำไปอบเพื่อหาน้ำหนักของดินแห้ง

5.2.3 การคำนวณ

1) ค่า C_m (สำหรับ 151H)

$$C_m = (B - A) 1000 \quad \dots \text{สมการที่ 56}$$

สมมติอ่านค่าได้ $A = 0.9985$, $B = 0.9990$

แทนค่าได้ ดังนี้

$$C_m = (0.9990 - 0.9985) \times 1000$$

$$C_m = 0.0005 \times 1000$$

$$C_m = + 0.5$$

2) ค่า R (สำหรับ 151H)

$$R = 1000 (r - 1) \quad \dots \text{สมการที่ 57}$$

เมื่อ r คือ ค่าสเกลไฮโดรมิเตอร์ในน้ำโคลน (อ่านที่ระดับโค้งบนผิวน้ำ)

3) ค่า R_c หลังจากปรับแก้ค่า

$$R_c = R + C_m \pm C_t - C_d \quad \dots \text{สมการที่ 58}$$

เมื่อ R คือ $1000 (r - 1)$ มีค่าเท่ากับ -5 ถึง 30 (สำหรับ 151H)

R คือ 0 – 60 (สำหรับ 152H)

r คือ ค่าสเกลไฮโดรมิเตอร์ในน้ำโคลน (อ่านที่ระดับโค้งบนผิวน้ำ)

C_m คือ ผลกระทบจากระยะโค้งของผิวน้ำ

C_t คือ ผลกระทบจากอุณหภูมิ จากตารางค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อน เนื่องจากอุณหภูมิ ในภาคผนวก การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์
Hydrometer analysis

C_d คือ ผลกระทบจากการเติมสารช่วยให้เม็ดดินกระจายตัว

4) ขนาดของเม็ดดิน (D) หน่วย มิลลิเมตร (สำหรับ 151H และ 152H)

$$D = K \sqrt{\frac{H}{t}} \quad \dots \text{สมการที่ 59}$$

เมื่อ H คือ ระยะตกตะกอนจากการปรับแก้ หน่วย เซนติเมตร หรือจากตารางค่า Effective depth ในภาคผนวก การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ Hydrometer analysis

T คือ เวลาในการตกตะกอน หน่วย นาที

K คือ ค่าคงที่ จากตารางค่า K ในภาคผนวก การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ Hydrometer analysis

5) ร้อยละผ่านตะแกรงของเม็ดดิน (% Finer)

กรณีใช้ Hydrometer 151 H

$$\% \text{ Finer} = \frac{G_s}{G_s - 1} \times \frac{R_c}{W_s} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 60}$$

กรณีใช้ Hydrometer 152 H

$$\% \text{ Finer} = \frac{R_c a}{W_s} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 61}$$

เมื่อ G_s คือ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

R_c คือ ค่าอ่านสเกลไฮโดรมิเตอร์ในน้ำโคลนหลังจากปรับแก้ค่า

a คือ ค่าปรับแก้ (Correction factor) จากตารางค่า Factor a ในภาคผนวก การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ Hydrometer analysis

W_s คือ น้ำหนักดินแห้ง หน่วย กรัม

6) ร้อยละผ่านตะแกรงรวมของตัวอย่างดินทั้งหมด (% F') (สำหรับ 151H และ 152H)

$$\% F' = \% F \times F_{200} \quad \dots \text{สมการที่ 62}$$

เมื่อ % F คือ ร้อยละผ่านตะแกรงของดินเฉพาะการวิเคราะห์ Hydrometer

F_{200} คือ ร้อยละผ่านตะแกรงของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200

5.3 การทดสอบหาขีดจำกัดแอดเทอร์เบิร์ก (Atterberg's limits)

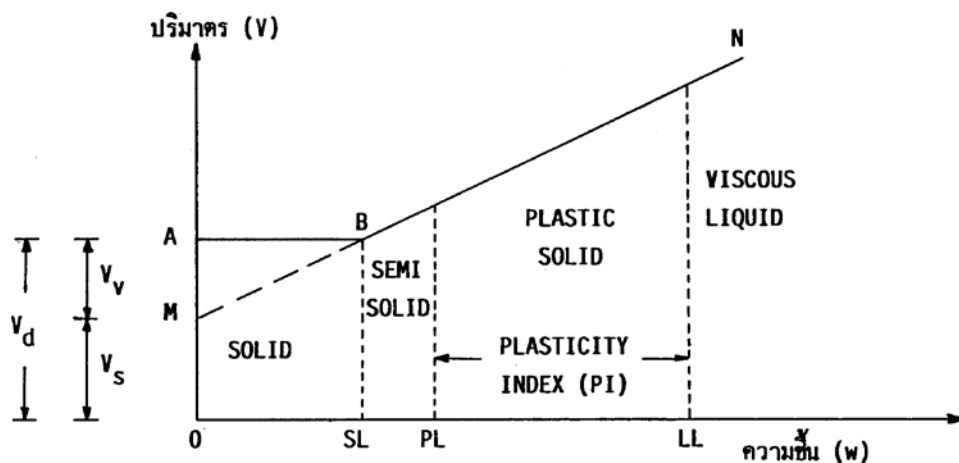
การทดสอบหาขีดจำกัดแอดเทอร์เบิร์ก เป็นวิธีการทดสอบความชื้นเหลวของดินประเภทเม็ดละเอียด (Fine grain soil) เช่น ดินเหนียว ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในมวลดิน หากปล่อยให้ดินเหนียวแห้งอย่างช้า ๆ จะพบว่าดินเหนียวจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (Liquid) เป็นพลาสติก (Plastic) เป็นวัสดุกึ่งของแข็ง (Semi-solid) และเป็นของแข็ง (Solid) ในที่สุด ดังรูปที่ 46 ซึ่งปริมาณน้ำขณะที่ดินเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง เรียกว่า ขีดจำกัดความชื้นเหลว (Consistency limits) หรือ ขีดจำกัดแอดเทอร์เบิร์ก (Atterberg's limits) ในที่นี้จะกล่าวถึง 3 สถานะ ดังนี้

1.1 ขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, L.L.) คือ ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินเปลี่ยนสถานะความคงตัวจากของเหลวหนืด (Viscous liquid) เป็นพลาสติก (Plastic solid) ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดที่ดินสามารถไหลได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง

1.2 ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) คือ ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินเปลี่ยนสถานะความคงตัวจากการเป็นพลาสติกเป็นวัสดุกึ่งของแข็ง ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดที่ดินสามารถถูกคลึงเป็นเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1/8$ นิ้ว โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว

1.3 ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit, S.L.) คือ ปริมาณน้ำที่มากที่สุดของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินเปลี่ยนสถานะความคงตัวจากการเป็นวัสดุกึ่งของแข็งเป็นมวลดินแข็ง และจะไม่มีการหดตัวต่อไปอีก ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดที่ดินจะไม่เปลี่ยนปริมาตรเมื่อสูญเสียน้ำ

นอกจากนี้ยังมีดัชนีพลาสติก (Plastic Index, P.I.) คือ ปริมาณน้ำที่ดินอยู่ในสถานะพลาสติก ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างขีดจำกัดความเหลว (L.L.) กับขีดจำกัดพลาสติก (P.L.) โดยดัชนีพลาสติกมักใช้เป็นข้อกำหนดในการคัดเลือกวัสดุสำหรับบดอัดดินชั้นต่าง ๆ ของถนน เนื่องจากสามารถประมาณคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินได้จากค่าดัชนีพลาสติก ซึ่งดินที่มีค่าพลาสติกสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of permeability) ต่ำ แต่มีค่าการทรุดตัวสูง ทำให้บดอัดได้ยาก (สุรชัย สุนันทพงศ์ศักดิ์ และ ประเสริฐ บุญรักษา, 2543) ตามมาตรฐาน ASTM D4318-17 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils



รูปที่ 46 Phase diagram แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของมวลดินเม็ดละเอียด (สุริยะ ทองมูณี, 2558)

5.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

ทดสอบหาขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) ดังแสดงในรูปที่ 47

- 1) เครื่องมือทดสอบขีดจำกัดความเหลว (Liquid limit device)
- 2) เครื่องมือปาดร่องดิน (Grooving Tool)
- 3) มีดปาดดิน (Spatula)
- 4) ถ้วยกระเบื้องเคลือบ สำหรับผสมดิน
- 5) ถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่าง
- 6) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
- 7) ตะแกรงร่อนเบอร์ 40
- 8) ตู้อบ



รูปที่ 47 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขีดจำกัดความเหลว (Humboldt Mfg. Co., n.d.)

ทดสอบหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)

- 1) แผ่นกระจกทดสอบขีดจำกัดพลาสติก ขนาดไม่น้อยกว่า 10 x 10 เซนติเมตร
- 2) ถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่าง
- 3) น้ำกลั่น
- 4) ขวดฉีดน้ำ สำหรับใส่น้ำกลั่น

ทดสอบหาขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit) ดังแสดงในรูปที่ 48

- 1) ถ้วยสำหรับทดสอบหาขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage dish) เป็นโลหะเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ¾ นิ้ว (44 มิลลิเมตร) สูงประมาณ ½ นิ้ว (12 มิลลิเมตร)
- 2) ถ้วยแก้ว เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ¼ นิ้ว (57.2 มิลลิเมตร) สูงประมาณ 1 ¼ นิ้ว (31.8 มิลลิเมตร)
- 3) แผ่นกระจกมีปุ่ม 3 ปุ่ม ขนาดของแผ่นกระจก 3 x 3 นิ้วหนา 1/16 นิ้ว
- 4) มีดปาดดิน
- 5) ปรอท
- 6) ตู้อบ



รูปที่ 48 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขีดจำกัดหดตัว (Singh, S., 2021)

5.3.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมดิน

- 1) ดินที่มีส่วนผสมของดินเหนียวต้องตากให้แห้ง โดยการผึ่งแดด หรือผึ่งในที่ร่มจนแห้ง
- 2) ร่อนดินผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 40 ที่ประกอบไปด้วย ทราเยละเอียด ทราเยแปง และดินเหนียว ให้ได้น้ำหนักประมาณ 150 - 200 กรัม
- 3) ดินที่มีความชื้น อาจแยกดินผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ด้วยการบี้ดินบนตะแกรง จนได้จำนวนดินผ่านตะแกรงเพียงพอสำหรับการทดสอบ

4) ดินที่มีเม็ดละเอียดอื่น ๆ (ควรเตรียมตัวอย่างจากดินชั้น ไม่ควรทำให้ดินแห้ง จนจับตัวเป็นก้อนแข็ง) โดยทดสอบผ่านตะแกรง เบอร์ 40

5) สำหรับดินเหนียวที่แข็งมาก ให้แบ่งดินที่จะใช้ในภาชนะโดยตัดดินเป็นชิ้นบาง ๆ เติมน้ำลงไปจนท่วมดินแล้วแช่น้ำไว้ค้างคืน เพื่อให้กวนผสมดินได้ง่ายขึ้น

การทดสอบขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D423-66

1) ผสมน้ำในดินที่เตรียมไว้ในถ้วยกระเบื้องเคลือบ ผสมดินและกวนดินให้เป็นเนื้อเดียวกัน แยกดินส่วนหนึ่งไว้สำหรับการทดสอบขีดจำกัดพลาสติกประมาณ 20 - 30 กรัม

2) ใช้มีดปาดดิน ตักดินใส่เครื่องมือทดสอบขีดจำกัดความเหลว เรียกว่า เครื่องเคาะดิน (Casagrande liquid limit device) มีลักษณะเป็นถ้วยทองเหลือง สามารถกระดกขึ้นลงได้บนแผ่นยางแข็ง กดอัดมีดให้ติดกันกระทะ ปาดให้เรียบ ให้ดินเหนียวเหลวมีความหนาประมาณ 10 มิลลิเมตร จากกันกระทะ

3) ใช้มีดปาดร่องดินกรีดร่องผ่ากลางมวลดินเหนียวเหลวในถ้วย ให้แยกจากกันเป็นสองส่วน จนมองเห็นกันถ้วยทองเหลืองเป็นแนวเส้นตรงกว้าง 2 มิลลิเมตร

4) เริ่มเคาะกระแทกด้วยอัตราความเร็วในการเคาะคงที่ 120 ครั้งต่อนาที นับจำนวนครั้งที่เคาะจนกระทั่งร่องดินที่ปาดไว้ไปไหลเข้ามาชนกันสนิทเป็นทางยาว 13 มิลลิเมตร หรือ ½ นิ้ว โดยครั้งแรกให้ทำการทดสอบให้ได้ค่าการตกกระแทกจำนวน 50 ครั้ง แล้วแบ่งดินไว้ 20 กรัม บันทึกจำนวนครั้งการเคาะ (Number of blows) ในแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก Atterberg's limits

5) เอาดินที่เหลือเติมน้ำคลุกเคล้าให้เข้ากัน ทำการทดสอบตามข้อ 2) ถึงข้อ 4) ให้ได้ค่าการเคาะอยู่ระหว่าง 30 - 40 ครั้ง

6) ปาดดินส่วนที่ไหลติดกันใส่ถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่าง นำไปชั่งน้ำหนัก (Weight of can + Wet soil) และบันทึกผลการทดสอบ

7) เพิ่มปริมาณน้ำให้ดิน แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 4) ให้ได้ค่าการเคาะอยู่ระหว่าง 25 - 35 ครั้ง

8) เพิ่มปริมาณน้ำให้ดิน แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 4) ให้ได้ค่าการเคาะอยู่ระหว่าง 20 - 30 ครั้ง

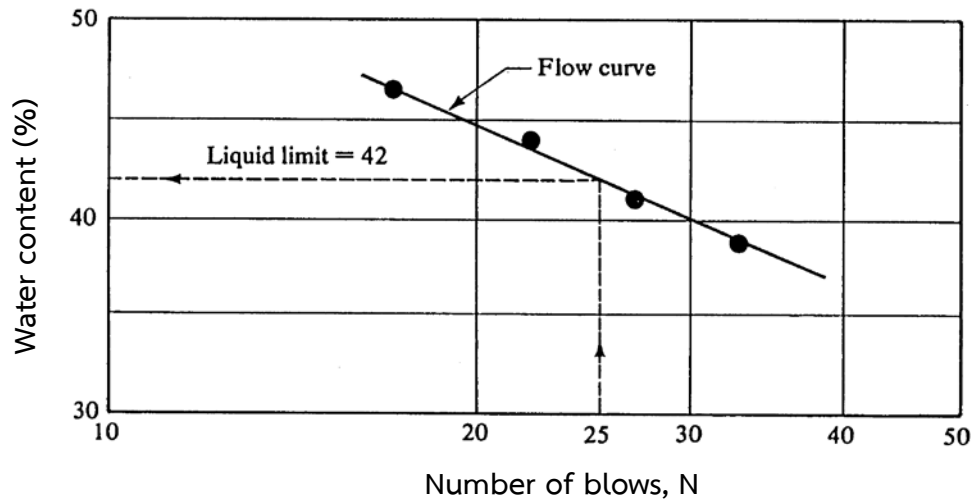
9) เพิ่มปริมาณน้ำให้ดิน แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 4) ให้ได้ค่าการเคาะอยู่ระหว่าง 15 - 25 ครั้ง

10) นำถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่างที่บรรจุดินที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

11) เมื่ออบเสร็จแล้วนำถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่างไปชั่งหาน้ำหนัก (Weight of can + Dry soil) และบันทึกผลการทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน

นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปพล็อตในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการเคาะ (Number of blows) และปริมาณน้ำในดิน (Water content) จากนั้นลากเส้นตรงให้ผ่านในแนวของจุดต่าง ๆ

ที่พล็อตไว้อย่างน้อย 3 จุด โดยขีดจำกัดความเหลว ((Liquid Limit)) ของตัวอย่างดิน คือ เป็นปริมาณน้ำ ณ จุดที่เส้นกราฟลากผ่านจำนวนครั้งการเคาะ 25 ครั้ง ดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการเคาะ (Number of blows) และปริมาณน้ำในดิน (Water content) จากการทดสอบขีดจำกัดความเหลวของดิน (สุริยะ ทองมณี, 2558)

การทดสอบขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D424-59

1) นำดินที่แบ่งไว้จากการทดสอบขีดจำกัดของเหลวมาปั้นเป็นก้อนกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร จำนวน 4 ตัวอย่าง

2) คลึงดินบนแผ่นกระจกผิวเรียบพร้อมกับกดน้ำหนักอย่างสม่ำเสมอ ให้ดินเป็นเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยปั้นตัวอย่างละ 4 เส้น ในอัตรา 80 - 90 รอบต่อนาที (1 รอบเท่ากับการคลึงไปข้างหน้า 1 ครั้ง และกลับหลัง 1 ครั้ง) ถ้าดินยังไม่มีรอยแตกให้ปั้นก้อนกลมใหม่แล้วคลึงจนกว่าจะเกิดรอยแตกที่ผิว

3) นำดินตัวอย่างที่คลึงเสร็จแล้วใส่ถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่างนำไปชั่งน้ำหนัก (Weight of can + Wet Soil) ทำซ้ำตามข้อ 2) ถึงข้อ 3) อีก 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 50 และบันทึกรายละเอียดการทดสอบในแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก Atterberg's limits

4) นำถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5) เมื่ออบเสร็จนำถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก (Weight of can + Dry soil) และบันทึกผลการทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน

การคลึงเส้นดิน มีผลให้ความชื้นของเส้นดินลดลง เมื่อคลึงเส้นดินได้ขนาดดังกล่าวแล้ว เนื้อดินเริ่มมีรอยแยกตัวปรากฏขึ้นบนผิวของเส้นดิน แสดงว่าเส้นดินกำลังเปลี่ยนสถานะจากพลาสติก

ไปเป็นวัสดุแข็งของแข็ง ความชื้นของตัวอย่างดินในขณะนั้นจะเป็นความชื้นที่ค่าขีดจำกัดพลาสติก (สุริยะ ทองมณี, 2558)



รูปที่ 50 ตัวอย่างดินที่คลึงจากการทดสอบหาขีดจำกัดพลาสติก (สุชาติ ทองเงิน, 2557)

การทดสอบขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit)

- 1) ใช้ตัวอย่างดินประมาณ 100 กรัม ถ้ามีดินเม็ดหยาบปนอยู่ ให้ร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 40 หรือถ้าดินชั้นใช้วิธีเลือกเก็บดินเม็ดหยาบออก หรือใช้วิธีบดดินบนตะแกรง เบอร์ 40
- 2) นำตัวอย่างดินมาผสมน้ำใช้มีดปาดดินผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันเติมน้ำแล้วคลุกเคล้าต่อไป จนประมาณการว่ามีความชื้นสูงกว่าค่าความชื้นที่ขีดจำกัดความเหลว
- 3) ตักดินใส่ถ้วยประมาณ 3 - 4 ชั้น โดยแต่ละครั้งพยายามไล่ฟองอากาศด้วยการเคาะถ้วยบนพื้นแข็งเบา ๆ ใส่ดินต่อไปจนดินล้นปากถ้วย ปาดดินให้เรียบกับขอบถ้วยนำไปชั่งน้ำหนัก
- 4) ชั่งถ้วยเหล็ก สำหรับหาขีดจำกัดหดตัวและหาจิบ้าง ๆ ภายในถ้วยเพื่อป้องกันดินติดถ้วยเหล็ก
- 5) ปล่อยดินให้แห้งตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง 4 - 6 ชั่วโมง จึงนำถ้วยดินไปเข้าตู้อบประมาณ 12 - 18 ชั่วโมง (ถ้าตัวอย่างดินเข้าเตาอบเร็วเกินไป ดินจะแตกเป็นหลายก้อน ทำให้ยากต่อการหาปริมาตรภายหลัง)
- 6) นำดินออกจากตู้อบตัวอย่างดินไว้ในอ่างดูดความชื้น จนดินตัวอย่างเย็นลงแล้วจึงชั่งน้ำหนักดินแห้งกับถ้วย
- 7) นำดินที่อบแห้งแล้วมาหาปริมาตร โดยแทนที่ปรอทในถ้วยที่มีปรอทเต็ม ใช้แผ่นพลาสติกที่มีขาโลหะสามขากดดินให้จมมิดปรอท ชั่งปรอทส่วนที่เหลือนำไปคำนวณปริมาตรก้อนดินแห้งต่อไป บันทึกรายละเอียดการทดสอบในแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก Atterberg's limits

5.3.3 การคำนวณ

คำนวณหาขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit)

1) ปริมาณน้ำในดิน (Water content)

$$W = \frac{W_{wi}}{W_s} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 63}$$

เมื่อ W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ

W_{wi} คือ น้ำหนักของน้ำในมวลดินเมื่อดินมีปริมาณน้ำในดิน ขณะเริ่มทดสอบ

W_s คือ น้ำหนักดินแห้งในก้อนตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบ หน่วย กรัม

2) ค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, L.L.) อ่านได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการเคาะ (Number of blows) และปริมาณน้ำในดิน (Water content) ที่จำนวนครั้งการเคาะ 25 ครั้ง ดังรูปที่ 49

3) ดัชนีการไหล (Flow Index, F.I.)

$$F.I. = \frac{W_1 - W_2}{\log \frac{N_2}{N_1}} \quad \dots \text{สมการที่ 64}$$

เมื่อ W_1 คือ ร้อยละปริมาณน้ำในดิน (Water content) ค่าที่ 1 (ค่ามาก)

W_2 คือ ร้อยละปริมาณน้ำในดิน ค่าที่ 2 (ค่าน้อย)

N_1 คือ จำนวนการเคาะ (Number of Blows) ค่าที่ 1 (ค่าน้อย)

N_2 คือ จำนวนการเคาะ ค่าที่ 2 (ค่ามาก)

คำนวณหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)

1) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำในดิน (Water content, W%) ที่ได้จากการทดสอบ

2) ดัชนีพลาสติก (Plastic Index, P.I.)

$$P.I. = L.L. - P.L. \quad \dots \text{สมการที่ 65}$$

กรณีไม่สามารถหาค่า Plastic Limit ได้ให้รายงานค่า P.I. ว่า N-P (Non - Plastic) และหากค่า Plastic Limit มากกว่าหรือเท่ากับ Liquid Limit ให้รายงานค่า P.I. ว่า N-P เช่นเดียวกัน โดยดินเม็ดละเอียดหรือดินเหนียว สามารถแยกความเหนียวชนิดได้ดังนี้

- ค่าดัชนีพลาสติก น้อยกว่าร้อยละ 35 ดินมีความเหนียวชนิดต่ำ (Low plasticity)

- ค่าดัชนีพลาสติก อยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 50 ดินมีความเหนียวหนืดปานกลาง (Medium plasticity)

- ค่าดัชนีพลาสติก มากกว่าร้อยละ 50 ดินมีความเหนียวหนืดสูง (High plasticity)

3) ดัชนีความเหลว (Liquidity Index, L.I.)

$$L.I. = \frac{W - P.L.}{P.I.} = \frac{W - P.L.}{L.L. - P.L.} \quad \dots \text{สมการที่ 66}$$

4) ดัชนีทาลเฟนส์ (Toughness Index, T.I.)

$$T.I. = \frac{P.I.}{F.I.} \quad \dots \text{สมการที่ 67}$$

คำนวณหาขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit)

1) ปริมาตรของดินเปียก (Volume of wet soil)

$$V_t = \frac{W_m}{13.53} \quad \dots \text{สมการที่ 68}$$

เมื่อ V_t คือ ปริมาตรของดินเปียก หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

W_m คือ น้ำหนักของปรอทที่ถูกแทนที่ หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) ปริมาตรของดินแห้ง (Volume of dry soil)

$$V_d = \frac{W_d}{13.53} \quad \dots \text{สมการที่ 69}$$

เมื่อ V_d คือ ปริมาตรของดินแห้ง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

W_d คือ น้ำหนักของปรอทที่ถูกแทนที่ หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร

(สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ, 2549)

3) ปริมาณน้ำในดิน (Water content)

$$W_i = \frac{W_{wi}}{W_s} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 70}$$

เมื่อ W_i คือ ปริมาณน้ำในดินของดินเปียก หน่วย ร้อยละ

W_{wi} คือ น้ำหนักของน้ำในมวลดินเมื่อดินมีปริมาณน้ำในดิน W_i ขณะเริ่มทดสอบ

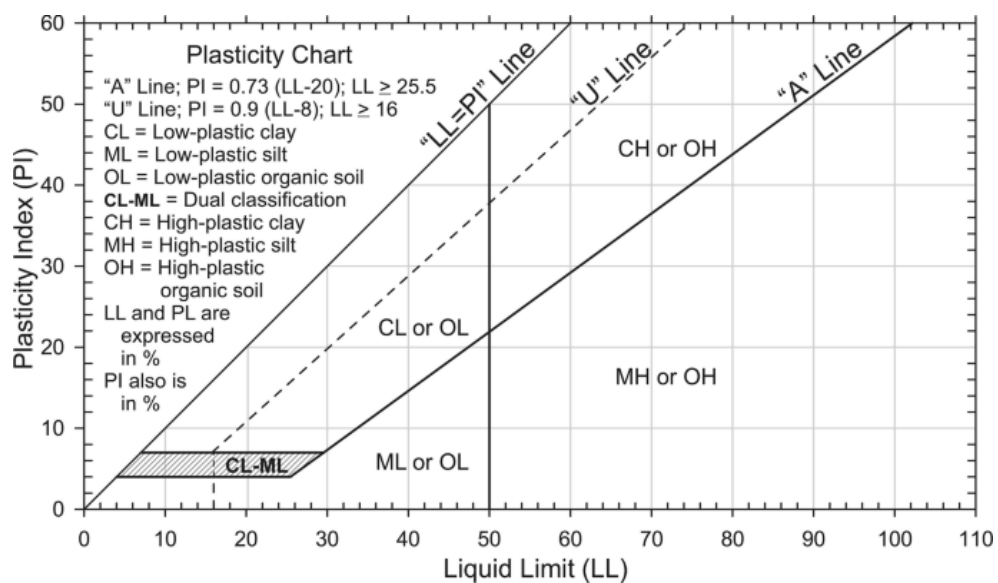
W_s คือ น้ำหนักดินแห้งในก้อนตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบ หน่วย กรัม

4) ค่าขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit, S.L.)

$$S.L. = W_i - \left[\frac{(V_t - V_d)\rho_w}{W_s} \times 100 \right] \quad \dots \text{สมการที่ 71}$$

- เมื่อ W_i คือ ปริมาณน้ำในดินของดินเปียก หน่วย ร้อยละ
 W_{wi} คือ น้ำหนักของน้ำในมวลดินเมื่อดินมีปริมาณน้ำในดิน W_i ขณะเริ่มทดสอบ
 W_s คือ น้ำหนักดินแห้งในก้อนตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบ หน่วย กรัม
 V_t คือ ปริมาตรของดินเปียก ขณะที่มียปริมาณน้ำในดิน W_i หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร
 V_d คือ ปริมาตรของดินแห้ง ขณะที่ตัวอย่างดินมีปริมาณน้ำในดินเท่ากับค่าขีดจำกัดหดตัว หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร
 ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ มีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)
 (สุริยะ ทองมณี, 2558)

จากนั้นนำค่า Plastic Index และ Liquid Limit พล็อตลงในกราฟ เพื่อหาสภาพพลาสติกของดินเม็ดละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 51



รูปที่ 51 กราฟแสดงสภาพพลาสติกของดินเม็ดละเอียด

5.4 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil solid)

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของดินกับความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แต่ตามมาตรฐาน ASTM D 854 และ BOWLES (1992) กำหนดให้ประเมินค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินในมวลดินคละ โดยอ้างอิงกับค่าความหนาแน่นมวลของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ρ_{w20}) โดยวิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีการที่กำหนดไว้เพื่อประเมินค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินในมวลดินคละที่ประกอบด้วยเม็ดดินขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้ (สุริยะ ทองมณี, 2558) ตามมาตรฐาน ASTM D854-00 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer

ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินมีความสำคัญในการนำมาคำนวณหาค่าต่าง ๆ เช่น ความพรุน (Porosity) อัตราส่วนช่องว่างในดิน (Void Ratio) ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) ความหนาแน่น (Density) เป็นต้น โดยทั่วไปความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินมีค่าอยู่ในช่วง 2.60 - 2.80 ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดิน ดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินชนิดต่าง ๆ

ชนิดของดิน	ความถ่วงจำเพาะ
ดินที่มีแร่ไมกาหรือแร่เหล็ก เช่น ดินลูกรัง เป็นต้น	2.67 - 3.00
ทราย	2.65 - 2.67
ทรายแป้ง	2.67 - 2.70
ดินเหนียวและทรายแป้งปนดินเหนียวหรือดินอินทรีย์	2.67 - 2.80
ดินอินทรีย์	1.00 - 2.60

(ที่มา : ASTM D854-92 และ Bowles, 2012)

5.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ตัวอย่างดินแห้งร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หนักประมาณ 50 กรัม
- 2) ขวดหาค่าความถ่วงจำเพาะ ใช้ขวดตวงปากเล็ก (Volumetric flask) ความจุ 500 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิดขวด
- 3) น้ำกลั่นที่ไล่อากาศออกแล้ว
- 4) กระบอกตวง ความจุ 500 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ
- 5) อุปกรณ์ให้ความร้อน และน้ำเย็น (หรือน้ำแข็ง)
- 6) เทอร์โมมิเตอร์ 0 - 100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 1 องศาเซลเซียส
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม

8) เตาและภาชนะต้มน้ำ หรือเครื่องปั๊มสุญญากาศ

9) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส

5.4.2 วิธีการทดสอบ

การสอบเทียบ (Calibrate) ขวดตวงปากเล็ก

1) นำขวดหาค่าความถ่วงจำเพาะหรือขวดตวงปากเล็กมาล้างให้สะอาด เช็ดให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักพร้อมจุกขวด แล้วเติมน้ำกลั่นให้เต็มถึงระดับเครื่องหมายที่คอขวด นำขวดไปให้ความร้อนบนเตา จนน้ำเดือดนานประมาณ 10 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศออกจากน้ำกลั่น

2) ตั้งขวดตวงปากเล็กทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง ตรวจสอบอุณหภูมิในขวดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ จนอุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 32 องศาเซลเซียส และตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดเท่ากันทุกระดับหรือไม่ ถ้าไม่เท่ากันให้ขยับขวดเอียงไปมาหรือใช้หลอดแก้ววน

3) ถ้าระดับน้ำในขวดตวงปากเล็กอยู่ต่ำกว่าระดับเครื่องหมายที่คอขวด ให้เติมน้ำกลั่นจนถึงระดับเครื่องหมายแล้วปิดจุกขวด เช็ดรอบขวดภายนอกให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนัก (Flask + Water) แล้วบันทึกรายละเอียดการทดสอบในแบบฟอร์ม ภาคผนวก การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน Specific gravity test

4) จุ่มเทอร์โมมิเตอร์ลงไปในน้ำในขวดตวงปากเล็ก อ่านค่าอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ ในขวดอย่างรวดเร็ว นำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (Temperature) แล้วบันทึกค่า

5) ตั้งขวดตวงปากเล็กทิ้งไว้หรือแช่ในถังน้ำเย็นเพื่อให้อุณหภูมิลดลงต่อไปอีก

6) ทำการทดสอบซ้ำขั้นตอนที่ 3) ถึง 5) เมื่อน้ำในขวดตวงปากเล็กมีอุณหภูมิประมาณ 28 องศาเซลเซียส, 24 องศาเซลเซียส, 20 องศาเซลเซียส, และ 16 องศาเซลเซียส (หรือใกล้เคียง) ให้ได้ข้อมูลไม่ต่ำกว่า 4 ค่า

7) นำข้อมูลเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักขวดหาค่าความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำเต็ม (Flask + Water) กับอุณหภูมิในขณะนั้น ๆ

การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

1) นำตัวอย่างดินแห้ง ประมาณ 50 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นประมาณ 150 - 200 มิลลิลิตร ในกระบอกตวง เขย่าให้เม็ดดินแตกตัวในน้ำกลั่น

2) เทน้ำที่ผสมดินจากกระบอกตวงใส่ขวดตวงปากเล็กที่สอบเทียบไว้แล้ว ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างน้ำและดินจากกระบอกตวงลงไปในขวดให้หมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ประมาณ 2 ใน 3 ของขวด

3) ทำการไล่ฟองอากาศในส่วนผสม โดยให้ความร้อนจนเดือดอย่างน้อย 10 นาที แล้วเติมน้ำกลั่นที่ไล่อากาศแล้วลงไปจนเต็มถึงระดับเครื่องหมายที่คอขวด คอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นหรือไม่ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมดไป หลังจากไล่ฟองอากาศหมดแล้ว ทำการเติมน้ำกลั่น

ให้ระดับน้ำอยู่ที่ 500 มิลลิเมตร ในการเติมน้ำกลั่นควรใช้หลอดและปล่อยน้ำกลั่นจากหลอดโดยจุ่มปากหลอดให้อยู่ใต้ระดับน้ำในขวดเพื่อป้องกันอากาศลงไป

4) ตั้งขวดทิ้งไว้ (หรือนำไปแช่ในน้ำเย็น) ให้อุณหภูมิลดลงเหลือเท่าอุณหภูมิห้องหรือประมาณ 28 องศาเซลเซียส

5) ตรวจสอบว่าระดับน้ำในขวดอยู่ที่ระดับเครื่องหมาย 500 มิลลิเมตร บนคอขวด ปิดจุกขวดให้สนิท เช็ดรอบขวดภายนอกให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนัก (Flask + Water + Soil) แล้วบันทึกค่า

6) วัดอุณหภูมิน้ำผสมดินที่ระดับต่าง ๆ ในขวด 3 - 4 ระดับ อย่างรวดเร็วทันทีหลังจากชั่งน้ำหนักตามข้อ 5 เสร็จ นำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (Temperature) แล้วบันทึกค่า

7) ทดสอบซ้ำขั้นตอนที่ 4) ถึง 6) เมื่ออุณหภูมิของน้ำดินในขวดลดลงเหลือประมาณ 25 องศาเซลเซียส, 22 องศาเซลเซียส และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หรือที่อุณหภูมิใด ๆ ที่ใกล้เคียงให้ได้ข้อมูลการทดสอบจำนวน 4 ค่า

8) เทน้ำผสมดินทั้งหมดในขวดลงใส่ภาตสะอาดที่ชั่งน้ำหนักและจดหมายเลขไว้แล้วใช้น้ำกลั่นฉีดล้างเม็ดดินจากขวดลงไปในภาตให้หมด

9) นำภาตน้ำผสมดินเข้าเตาอบจนแห้ง แล้วนำภาตดินไปชั่งน้ำหนัก (Dry soil + Container) เพื่อหาน้ำหนักดินแห้งที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ เมื่อลบน้ำหนักภาตออก จะได้เป็นน้ำหนักของดินแห้ง (Weight of dry soil) เพื่อนำไปหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

5.4.3 การคำนวณ

$$\text{Specific gravity } (G_s) = \frac{\rho_{wT}}{\rho_{w20}} \times \frac{W_s}{W_s + W_{aT} + W_{bT}} \quad \dots \text{สมการที่ 72}$$

$$= K \times \frac{W_s}{W_s + W_{aT} + W_{bT}} \quad \dots \text{สมการที่ 73}$$

เมื่อ	G_s	คือ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
	ρ_{wT}	คือ ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส จากตารางที่ 25
	ρ_{w20}	คือ ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
	W_s	คือ น้ำหนักดินแห้ง
	W_{aT}	คือ น้ำหนักขวดหาค่าความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำเต็ม ณ อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส อ่านค่าจากกราฟความสัมพันธ์จากการสอบเทียบขวดหาค่าความถ่วงจำเพาะ
	W_{bT}	คือ น้ำหนักขวดหาค่าความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำผสมเม็ดดินบรรจุอยู่เต็มขวด ณ อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส
	K	คือ ค่าตัวแปรปรับแก้เนื่องจากอุณหภูมิ ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ และค่าตัวแปรปรับแก้ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ		ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_{WT})	ค่าตัวแปรปรับแก้
องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์	(g/cc)	$K = (\rho_{WT} / \rho_{W20})$
4	32.0	1.000 0000	
18	64.4	0.998 6244	1.0004
19	66.2	0.998 4347	1.0002
20	68.0	0.998 2343	1.0000
21	69.8	0.998 0233	0.9998
22	71.6	0.997 8019	0.9996
23	73.4	0.997 5702	0.9993
24	75.2	0.997 3286	0.9991
25	77.0	0.997 0770	0.9989
26	78.8	0.996 8156	0.9986
27	80.6	0.996 5451	0.9983
28	82.4	0.996 2652	0.9980
29	84.2	0.995 9761	0.9977
30	86.0	0.995 6780	0.9974

(ที่มา : สิริยะ ทองมณี, 2558)

5.5 การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density test)

ความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นลักษณะเฉพาะของการตกตะกอนของทราย โดยความพรุนของดินขึ้นอยู่กับรูปร่างของเม็ดดิน ความสม่ำเสมอของขนาดเม็ดดิน และลักษณะของการตกตะกอน ดังนั้นความพรุนไม่สามารถบ่งชี้ว่าดินอยู่ในสภาพหลวมหรือแน่น แต่สามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบความพรุนหรืออัตราส่วนช่องว่างของดินในสภาพที่หลวมที่สุดและแน่นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ คือ การหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดของดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soil) เช่น ทราย ด้วยวิธีการสั่นสะเทือน ตามมาตรฐาน ASTM D4253-16 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table และ ASTM D4254-16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density

โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ได้แก่ กำลังเฉือน (Shear strength) ความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) และความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมความหนาแน่นของวัสดุกรอง (Filter) และประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของดินทราย

5.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) โต๊ะสั่น (Vibrating table) แสดงดังรูปที่ 52
- 2) กระบอกกลวงขนาดมาตรฐาน (Standard molds) ปริมาตร 2,830 ลูกบาศก์เซนติเมตร (โมลเล็ก) และ 14,200 ลูกบาศก์เซนติเมตร (โมลใหญ่)
- 3) ฐานแผ่นน้ำหนัก (Surcharge base plate)
- 4) แผ่นน้ำหนัก (Surcharge weights)
- 5) ชุดเกจวัดความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density gauge set)
- 6) ถาดใส่ตัวอย่าง และช้อนตัก
- 7) เหล็กปาด (Straight edge)
- 8) ตู้อบ
- 9) เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper)
- 10) นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 52 โต๊ะสั่น พร้อมอุปกรณ์สำหรับทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์

(<https://geotechnical-equipment.com/product/relative-density-test-of-soil/>, Retrieved April 25, 2025)

5.5.2 วิธีการทดสอบ

การทำให้ดินอยู่ในสภาพหลวมที่สุดตามมาตรฐาน ASTM D4253 และ D4254 ได้มีการกำหนดไว้ 3 วิธี และวิธีที่ 4 เป็นวิธีอย่างง่ายและใช้กันทั่วไป ดังนี้ (ทองเด่น สุภาพ, 2556)

วิธีที่ 1 ASTM Method A

เทตัวอย่างดินลงในโมล โดยเทจากภาชนะบรรจุดินผ่านกรวยที่มีความยาวอย่างน้อย 150 มิลลิเมตร โดยขนาดของรูปลายตัวอย่างสำหรับดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ถ้าดินขนาดใหญ่แต่ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร

วิธีที่ 2 ASTM Method B

ใช้ท่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางโมล และมีปริมาตรอย่างน้อย 1.25 เท่าของปริมาตรโมล วางตั้งลงในโมลที่จะวัดปริมาตรตัวอย่าง เทตัวอย่างลงในท่อให้เต็มจากนั้นค่อย ๆ ดึงท่อออกจากโมลช้า ๆ ให้ตัวอย่างดินไหลบรรจุลงในโมลจนเต็ม

วิธีที่ 3 ASTM Method C

ชั่งตัวอย่างดินที่แห้งด้วยเตาอบ จำนวน $1,000 \pm 1$ กรัม เกลงในกระบอกแก้ว ที่มีขีดบอกปริมาตรขนาด 2,000 มิลลิลิตร และบรรจุน้ำไว้จนเกือบเต็ม ใช้ยางปิดปากกระบอกแก้วให้แน่น จากนั้นยกกระบอกแก้วพลิกคว่ำลงแล้วหงายขึ้นวางบนโต๊ะที่เรียบ อ่านปริมาตรของทรายที่ตกตะกอนในน้ำในกระบอกแก้ว ให้ทำอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยความหนาแน่นต่ำสุดคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\rho_{\min} = 1,000/\text{ปริมาตรเฉลี่ย} \quad \dots \text{สมการที่ 74}$$

วิธีที่ 4

ใช้ข้อตักตัวอย่างดินที่อบแห้งแล้วค่อย ๆ เกลงในโมล จนกระทั่งตัวอย่างดินสูงกว่าขอบโมลเข้าไปในปลอกโมลด้านบน จากนั้นค่อย ๆ ถอดปลอกโมลออก และใช้เหล็กปาดตัวอย่างดินให้เรียบเสมอปากโมล ยกโมลที่บรรจุดินตัวอย่างไปชั่งหาน้ำหนัก เมื่อลบบอกด้วยน้ำหนักของโมลเปล่า จะได้น้ำหนักของดินตัวอย่าง ให้ทำการหาน้ำหนักอย่างน้อย 2 ครั้ง คำนวณน้ำหนักแต่ละครั้งที่ได้ต้องแตกต่างกันไม่เกิน 10 -15 กรัม จึงจะนำค่าไปใช้ได้ โดยเฉลี่ยค่าน้ำหนักของตัวอย่างดินจากค่าที่ใกล้เคียงกันที่สุดของการทำ 3 ครั้ง โดยความหนาแน่นต่ำสุดคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\rho_{\min} = \text{น้ำหนักของตัวอย่างดิน/ปริมาตรของโมล (V)} \quad \dots \text{สมการที่ 75}$$

การเตรียมตัวอย่างดิน

1) นำตัวอย่างดินที่เก็บมาจากแหล่งทำการคัดเลือกตัวแทนโดยใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sampling splitter) หรือทำการแบ่งแบบ 4 ส่วน ให้ได้ขนาดและปริมาณตามตารางที่ 26

2) อบตัวอย่างดินให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่

ตารางที่ 26 ขนาดและปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์

ขนาดตะแกรง นิ้ว (มิลลิเมตร)	จำนวนที่ใช้ทดสอบ (กิโลกรัม)	ขนาดโมลที่ใช้ทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	เครื่องมือที่ใช้ โรยตัวอย่าง
3 (75)	34	14,200	Shovel or extra large scoop
1 ½ (38.1)	34	14,200	Scoop
3/4 (19.0)	11	2,830	Scoop
3/8 (9.5)	11	2,830	Pouring device with 25 mm diameter spout
เบอร์ 4 (4.75) หรือเล็กกว่า	11	2,830	Pouring device with 25 mm diameter spout

(ที่มา : ASTM D4254, 2016)

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นต่ำสุด (Minimum density)

1) ชั่งน้ำหนักโมล (W_1) และหาปริมาตรภายในของโมลที่ใช้ในการทดสอบ (V_c) โดยการวัดความสูงของโมล (H) และพื้นที่ภายในของโมล (a) จากนั้นบันทึกรายละเอียดการทดสอบในรูปแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ Relative density test

2) วัดความหนาของฐานแผ่นน้ำหนัก (T_p) และความละเอียดของไดอัลเกจ (Dial Gauge) พร้อมบันทึกค่าในรูปแบบฟอร์มช่อง Primary Input Parameter

3) โรยตัวอย่างดินลงในโมลจนเต็ม และปาดตัวอย่างดินที่ล้นออกมาด้วยเหล็กปาด จากนั้นให้ใช้แปรงขนอ่อนปัดตัวอย่างดินที่ตรอบ ๆ โมลออก โดยให้ระวังเรื่องการสั่นสะเทือนและความสูงของการโรยตัวอย่าง (อย่าโรยตัวอย่างจากที่สูง)

4) นำโมลที่บรรจุตัวอย่างดินชั่งน้ำหนัก (W_{dmin}) และบันทึกค่าในรูปแบบฟอร์มช่อง Minimum Density เพื่อหาน้ำหนักดินแห้ง (W_s)

5) ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 2) ถึงข้อ 3) และทำการบันทึกค่า โดยค่าที่ได้จากการทดสอบแต่ละครั้งไม่ควรมีความแตกต่างกันมากเกินไป หากได้ค่าที่แตกต่างกันมาก ควรทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการโรยตัวอย่างที่แรงหรือมีการสั่นสะเทือนมากเกินไป

6) คำนวณหาค่าความหนาแน่นต่ำสุด (Minimum density, ρ_{dmin}) จากสมการที่ 76

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum density) โดยวิธีการทดสอบแบบแห้ง (Dry method)

1) นำตัวอย่างดินที่เตรียมและอบแห้งไว้แล้ว มาโรยลงในโมลจนเกือบเต็ม โดยเผื่อระยะสำหรับการวางฐานแผ่นน้ำหนัก จากนั้นวางฐานแผ่นน้ำหนักลงบนตัวอย่างในโมล โดยปรับให้อยู่ในแนวระดับกับปากโมล

2) นำโมลตัวอย่างดินประกอบติดตั้งบนโต๊ะสั่น โดยติดตั้งและประกอบ Guide sleeves บนโมล ยกแผ่นน้ำหนักวางลงบนฐานแผ่นน้ำหนักในโมลตัวอย่าง และเปิดเครื่องให้โต๊ะสั่นทำงาน โดยใช้เวลาประมาณ 12 นาที

3) นำแผ่นน้ำหนักและ Guide sleeves ออกจากโมล และทำการวัดความสูงของตัวอย่าง หลังการสั่นด้วยชุดเกจวัดความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยวัดค่าแรกที่ขอบของโมล (R_i) และวัดค่าที่สองที่ฐานแผ่นน้ำหนัก (R_f) พร้อมบันทึกค่าที่อ่านได้ทั้ง 2 จุด ในแบบฟอร์มช่อง Maximum Density (Dry Method)

4) ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่อยู่ในโมล (W_{dmax}) และบันทึกค่า เพื่อหาน้ำหนักดินแห้ง (W_s) สำหรับคำนวณหาค่าความหนาแน่นสูงสุดจากวิธีการทดสอบแบบแห้ง (Maximum density) โดยหาได้จากการนำปริมาตรของตัวอย่าง (V_s) ไปหารน้ำหนักของตัวอย่างดินแห้ง (W_s)

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum density) โดยวิธีการทดสอบแบบเปียก (Wet method)

1) นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ไปแช่น้ำเพื่อให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว ใช้เวลาประมาณ 15 - 30 นาที

2) เทน้ำที่แช่ออกจากตัวอย่างดินให้ดินไม่มีน้ำขัง จากนั้นใช้ช้อนตักตัวอย่างดินลงในโมล โดยใส่ตัวอย่างดินจนเกือบเต็ม และเผื่อระยะสำหรับการวางฐานแผ่นน้ำหนัก จากนั้นวางฐานแผ่นน้ำหนักลงบนตัวอย่างในโมล โดยปรับให้อยู่ในแนวระดับกับปากโมล

3) นำโมลตัวอย่างดินประกอบติดตั้งบนโต๊ะสั่น โดยติดตั้งและประกอบ Guide sleeves บนโมล ยกแผ่นน้ำหนักวางลงบนฐานแผ่นน้ำหนักในโมลตัวอย่าง และเปิดเครื่องให้โต๊ะสั่นทำงาน โดยใช้เวลาประมาณ 12 นาที

4) นำแผ่นน้ำหนักและ Guide sleeves ออกจากโมล และทำการวัดความสูงของตัวอย่าง หลังการสั่นด้วยชุดเกจวัดความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยวัดค่าแรกที่ขอบของโมล (R_i) และวัดค่าที่สองที่ฐานแผ่นน้ำหนัก (R_f) พร้อมบันทึกค่าที่อ่านได้ทั้ง 2 จุด ในแบบฟอร์มช่อง Maximum Density (Wet Method)

5) ชั่งน้ำหนักกระบอกใส่ตัวอย่าง (W_c) และตักตัวอย่างดินที่อยู่บริเวณกลางของตัวอย่างใส่กระบอก จากนั้นชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินเปียกที่อยู่ในกระบอกใส่ตัวอย่าง (W_{cw}) พร้อมบันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน จากสมการที่ 77

6) นำดินไปอบแห้ง และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินแห้งที่อยู่ในกระบอกใส่ตัวอย่าง (W_{cd}) พร้อมบันทึกค่า เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน

7) ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่อยู่ในโมล (W_{wmax}) และบันทึกค่า เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นสูงสุดจากวิธีการทดสอบแบบเปียก (Maximum density, ρ_w) โดยหาได้จากการนำปริมาตรของตัวอย่าง (V_s) ไปหารน้ำหนักของตัวอย่างดินแห้ง (W_s)

8) คำนวณหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, ρ_{dmax}) จากสมการที่ 78 และความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) จากสมการที่ 80

5.5.3 การคำนวณ

1) ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด (Minimum dry density, ρ_{dmin})

$$\rho_{dmin} = \frac{W_s}{V_c} \quad \dots \text{สมการที่ 76}$$

เมื่อ ρ_{dmin} คือ ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

W_s คือ น้ำหนักของตัวอย่างดินแห้งที่บดอัดในโมล หน่วย กรัม (g)

V_c คือ ปริมาตรของโมล หน่วย ลูกบาศก์มิลลิเมตร (m^3)

2) ปริมาณน้ำในดิน (Water content)

$$W = \frac{(W_{cw} - W_{cd})}{W_s} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 77}$$

เมื่อ W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ (%)

W_{cw} คือ น้ำหนักของตัวอย่างดินเปียกที่อยู่ในกระบอกใส่ตัวอย่าง หน่วย กรัม (g)

W_{cd} คือ น้ำหนักของตัวอย่างดินแห้งที่อยู่ในกระบอกใส่ตัวอย่าง หน่วย กรัม (g)

W_s คือ น้ำหนักของตัวอย่างดินอบแห้ง หน่วย กรัม (g)

3) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, ρ_{dmax})

$$\rho_{dmax} = \frac{\rho_w}{1 + \frac{W}{100}} \quad \dots \text{สมการที่ 78}$$

- เมื่อ ρ_{dmax} คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุด หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
 ρ_w คือ ความหนาแน่นสูงสุดจากการทดสอบแบบเปียก หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
 W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ (%)

4) Relative Compaction (RC) หรือ % Compaction สำหรับดินที่มีความชื้นแน่น เช่น ดินเหนียว

$$RC = \frac{\text{ความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการบดอัดดินในสนาม}}{\text{ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ}} \times 100 \% \quad \dots \text{สมการที่ 79}$$

5) Relative density (D_r) สำหรับดินที่ไม่มีความชื้นแน่น เช่น กรวด ทราย

$$D_r = \frac{\rho_{dmax}(\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 80}$$

หรือ $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 81}$

- เมื่อ D_r คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ หน่วย ร้อยละ
 ρ_{dmax} คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
 ρ_{dmin} คือ ความหนาแน่นแห้งต่ำสุดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
 ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งจากการบดอัดในสนาม หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
 e_{max} คือ อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในสภาวะที่หลวมที่สุด
 e_{min} คือ อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในสภาวะที่แน่นที่สุด
 e คือ อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินตามสภาพในธรรมชาติ

5.6 การทดสอบความสึกกร่อน (Los Angeles Abrasion test)

การทดสอบความสึกกร่อน (Abrasion) เป็นวิธีการทดสอบหาความสึกกร่อนของมวลรวมวัสดุเม็ดหยาบ ได้แก่ หิน กรวด และทราย ที่จะนำไปใช้ผสมกับคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C535 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine โดยมวลรวมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญและมีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต รวมถึงโครงสร้างของคอนกรีตต่าง ๆ

5.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

1) เครื่อง Los Angeles Abrasion แสดงดังรูปที่ 53

2) ตะแกรงช่องเปิดรูสี่เหลี่ยม สำหรับหาขนาดมวลรวมหยาบ ขนาดต่าง ๆ ดังนี้

3 นิ้ว (75.0 มิลลิเมตร)	1/2 นิ้ว (12.5 มิลลิเมตร)
2 1/2 นิ้ว (63.0 มิลลิเมตร)	3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร)
2 นิ้ว (50.0 มิลลิเมตร)	1/4 นิ้ว (6.3 มิลลิเมตร)
1 1/2 นิ้ว (37.5 มิลลิเมตร)	เบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)
1 นิ้ว (25.0 มิลลิเมตร)	เบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร)
3/4 นิ้ว (19.0 มิลลิเมตร)	เบอร์ 12 (1.70 มิลลิเมตร)

3) ลูกเหล็กทรงกลม (Abrasive charge) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มิลลิเมตร (127/32 นิ้ว) แต่ละลูกมีน้ำหนัก 390 - 445 กรัม จำนวนลูกเหล็กทรงกลมขึ้นอยู่กับชั้น (Grading) ของตัวอย่าง กำหนดไว้ในตารางที่ 27

4) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.1 กรัม

5) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 53 เครื่อง Los Angeles Abrasion สำหรับทดสอบความสึกกร่อนของวัสดุ

(<https://www.matest.com/en/product/a075n-los-angeles-machine>, Retrieved April 25, 2025)

ตารางที่ 27 จำนวนลูกเหล็กทรงกลมที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น

ชั้น	จำนวนลูกเหล็กทรงกลม	น้ำหนักรวม (กรัม)
A	12	5,000 ± 25
B	11	4,586 ± 25
C	8	3,330 ± 20
D	6	2,500 ± 15
E	12	5,000 ± 25
F	12	5,000 ± 25
G	12	5,000 ± 25

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2546)

5.6.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่าง

(1) ถ้าตัวอย่างไม่มีดินเหนียว เช่น กรวดปนทราย หินโม่ เป็นต้น ให้ตากตัวอย่างจนแห้งหรืออบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส

(2) ถ้าตัวอย่างมีดินเหนียวปน หรือมีส่วนละเอียดติดเป็นก้อนใหญ่แน่น ให้นำตัวอย่างไปล้างเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ออก แล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 มาอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส

(3) นำตัวอย่างไปแยกขนาดตามชั้นใน**ตารางที่ 27** ถ้าเข้าได้หลายชั้นให้เลือกใช้ตัวอย่างที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด

การทดสอบ

(1) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ และลูกเหล็กทรงกลมตามจำนวนการทดสอบของแต่ละชั้นใส่เข้าไปในเครื่อง Los Angeles Abrasion หมุนเครื่องด้วยความเร็ว 30 - 33 รอบต่อนาที ให้ได้จำนวนรอบตาม**ตารางที่ 28**

(2) นำตัวอย่างและเหล็กทรงกลมออกจากเครื่อง จากนั้นล้างส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ออก นำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่

(3) ชั่งหาน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือ และบันทึกรายละเอียดการทดสอบในแบบฟอร์มตามภาคผนวก การทดสอบความสึกกร่อน Los Angeles Abrasion test

ตารางที่ 28 น้ำหนักของมวลรวม และจำนวนรอบในการทดสอบ

ขนาดตะแกรง (นิ้ว)		น้ำหนัก (กรัม) และชั้นของตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
3	2 ½	-	-	-	-	2,500±50	-	-
2½	2	-	-	-	-	2,500±50	-	-
2	1 ½	-	-	-	-	5,000±50	5,000±50	-
1 ½	1	1,250±25	-	-	-	-	5,000±25	5,000±25
1	¾	1,250±25	-	-	-	-	-	5,000±25
¾	½	1,250±10	2,500±10	-	-	-	-	-
½	⅜	1,250±10	2,500±10	-	-	-	-	-
⅜	¼			2,500±10	-	-	-	-
¼	เบอร์ 4			2,500±10	-	-	-	-
เบอร์ 4	เบอร์ 8				5,000±10			
น้ำหนักรวมตัวอย่างรวม		5,000±10	5,000±10	5,000±10	5,000±10	10,000±100	10,000±75	10,000±50
จำนวนรอบ		500				1,000		

(ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ, 2546)

5.6.3 การคำนวณ

$$\text{ร้อยละความสึกกร่อน} = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{M_1} \quad \dots \text{สมการที่ 82}$$

เมื่อ M_1 คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ หน่วย กรัม (g)

M_2 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ หน่วย กรัม (g)

5.7 การทดสอบความคงทน (Soundness test)

การทดสอบความคงทน (Soundness) เป็นวิธีการทดสอบหาความต้านทานของมวลรวมต่อการสลายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต ตามมาตรฐาน ASTM C88 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate โดยความคงทนเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญในการพิจารณามวลรวมที่จะนำมาทำคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น สภาวะเปียกสลับแห้ง ร้อนสลับเย็น เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลรวมอย่างมาก ส่งผลให้คอนกรีตเกิดความเสียหายตั้งแต่เกิดการแตกร่อนเป็นแผ่นจนถึงเกิดการวิบัติของโครงสร้างได้

5.7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) วัดความถ่วงจำเพาะของสารละลาย ในช่วง 1.151 - 1.174
- 2) ตะแกรงขนาดต่าง ๆ ดังนี้

2 ½ นิ้ว (63.0 มิลลิเมตร)	3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร)
2 นิ้ว (50.0 มิลลิเมตร)	5/16 นิ้ว (8.0 มิลลิเมตร)
1 ½ นิ้ว (37.5 มิลลิเมตร)	เบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)
1 ¼ นิ้ว (31.5 มิลลิเมตร)	เบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร)
1 นิ้ว (25.0 มิลลิเมตร)	เบอร์ 16 (1.18 มิลลิเมตร)
¾ นิ้ว (19.0 มิลลิเมตร)	เบอร์ 30 (600 มิลลิเมตร)
5/8 นิ้ว (16.0 มิลลิเมตร)	เบอร์ 50 (300 มิลลิเมตร)
1/2 นิ้ว (12.5 มิลลิเมตร)	เบอร์ 100 (600 มิลลิเมตร)
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.1 กรัม
- 4) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส

5.7.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่าง

- 1) วัสดุหยาบ (Coarse aggregate) ใช้ปริมาณและส่วนคละตามตารางที่ 29
- 2) วัสดุละเอียด (Fine aggregate) ใช้ปริมาณและส่วนคละตามตารางที่ 30
- 3) นำวัสดุที่จะใช้ทดสอบมาทำการแบ่งตัวอย่างให้ได้ปริมาณตามการทดสอบขนาดคละ แล้วทำการทดสอบขนาดคละ จากนั้นให้นำค่าเปอร์เซ็นต์ค้ำมาพิจารณาหาปริมาณวัสดุที่จะนำไปใช้ในการทดสอบตามตารางข้างต้น (ถ้าเปอร์เซ็นต์ค้ำของแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่ต้องทำการทดสอบในส่วนที่ค้ำตะแกรงแต่ละกลุ่มนั้น) เมื่อได้ตัวอย่างตามข้อกำหนดแล้วให้นำมาล้างแล้วอบให้แห้ง ชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ โดยตัวอย่างการคำนวณทดสอบวัสดุหยาบและวัสดุละเอียด

แสดงดังตารางที่ 31 และตารางที่ 32 ตามลำดับ และบันทึกรายละเอียดการทดสอบในรูปแบบฟอร์มตามภาคผนวก การทดสอบความคงทน Soundness test

4) เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยใช้สัดส่วน Na_2SO_4 ประมาณ 350 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ละลายทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง แล้วทำการตรวจสอบค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 1.151 – 1.174

ตารางที่ 29 ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างวัสดุหยาบ (ASTM C88)

กลุ่ม	ผ่านตะแกรง	ค้างตะแกรง	ปริมาณที่ใช้แต่ละเบอร์ (กรัม)	ปริมาณที่ใช้รวม (กรัม)
A	2 ½"	2"	3,000 ± 300	5,000 ± 300
	2"	1 ½"	2,000 ± 200	
B	1 ½"	1"	1,000 ± 50	1,500 ± 50
	1"	¾"	500 ± 30	
C	¾"	½"	670 ± 10	1,000 ± 10
	½"	⅜"	330 ± 5	
D	⅜"	เบอร์ 4	300 ± 5	300 ± 5

หมายเหตุ ถ้าไม่สามารถหาวัสดุที่ใช้แต่ละเบอร์ได้ให้ใช้ปริมาณวัสดุที่ใช้รวมเป็นสำคัญ

ตารางที่ 30 ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างวัสดุละเอียด (ASTM C88)

ผ่านตะแกรง	ค้างตะแกรง	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
¾"	เบอร์ 4	100
เบอร์ 4	เบอร์ 8	100
เบอร์ 8	เบอร์ 16	100
เบอร์ 16	เบอร์ 30	100
เบอร์ 30	เบอร์ 50	100

การทดสอบ

- นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างข้างต้น มาแยกใส่ภาชนะแต่ละกลุ่ม
- เทสารละลายโซเดียมซัลเฟตให้ท่วมวัสดุไม่น้อยกว่าครึ่งนิ้ว แล้วแช่วัสดุทิ้งไว้ประมาณ 16 – 18 ชั่วโมง
- รินสารละลายออกโดยให้ผ่านตะแกรงที่ใช้กรอง เพื่อป้องกันการหลุดหายของวัสดุติดไปกับสารละลาย

- 4) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็น
- 5) นำตัวอย่างวัสดุมาแช่สารละลายอีกเป็นรอบที่ 2 ซึ่งสารละลายที่ใช้จะต้องเปลี่ยนใหม่ ทุกครั้งที่ทำการทดสอบ
- 6) นำตัวอย่างมาล้างด้วยสารละลายแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) หรือน้ำสะอาด จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง
- 7) ทำซ้ำ ข้อ 2) ถึงข้อ 6) จนครบ 5 รอบ
- 8) ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรง ตามประเภทการทดสอบ ถ้าเป็นวัสดุละเอียดให้ร่อนผ่านตะแกรงขนาดเดิม ถ้าเป็นวัสดุหยาบ ให้ร่อนผ่านตะแกรงตามกลุ่ม A, B, C และ D ดังนี้
กลุ่ม A ร่อนผ่านตะแกรง $1 \frac{1}{4}$ "
กลุ่ม B ร่อนผ่านตะแกรง $5/8$ "
กลุ่ม C ร่อนผ่านตะแกรง $5/16$ "
กลุ่ม D ร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 5
- 9) นำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงจากข้อ 8) ชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย (% Loss) และร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียรวม (% Loss รวม) ของแต่ละกลุ่มจากสมการที่ 83 และสมการที่ 84 ตามลำดับ

5.7.3 การคำนวณ

1) ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย (% Loss)

$$\% \text{ Loss} = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{M_1} \quad \dots \text{สมการที่ 83}$$

เมื่อ M_1 คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ หน่วย กรัม (g)

M_2 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ หน่วย กรัม (g)

2) ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียรวม (% Loss รวม)

$$\% \text{ Loss รวม} = \frac{\% \text{ ค้างตะแกรง} \times \% \text{ Loss}}{100} \quad \dots \text{สมการที่ 84}$$

ตารางที่ 31 ตัวอย่างการคำนวณทดสอบวัสดุหยาบ (Coarse aggregate)

ตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ ค้างใน ตะแกรง	น้ำหนักวัสดุ ก่อนทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักวัสดุ หลังทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักวัสดุ ที่สูญเสีย (กรัม)	% Loss	% Loss รวม
	(1)	(2)	(3)	(4)=(2)-(3)	(5)=(4)/(2)×100	(6)=(1)×(5)/100
2 ½" - 1 ½"	4.8	0	0	0	1.59	0.08
1 ½" - ¾"	43.7	1510	1486	24	1.59	0.69
¾" - ⅜"	37.5	1005	987	18	1.79	0.67
⅜" - เบอร์ 4	11	300	289	11	3.67	0.40
น้อยกว่าเบอร์ 4	3	0	0	0	3.67	0.11
ขาด						
รวม	100.0					1.95

ตารางที่ 32 ตัวอย่างการคำนวณทดสอบวัสดุละเอียด (Fine aggregate)

ตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ ค้างใน ตะแกรง	น้ำหนักวัสดุ ก่อนทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักวัสดุ หลังทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักวัสดุ ที่สูญเสีย (กรัม)	% Loss	% Loss รวม
	(1)	(2)	(3)	(4)=(2)-(3)	(5)=(4)/(2)×100	(6)=(1)×(5)/100
¾"	0	0	0			
เบอร์ 4	4	0	0		8.00	0.32
เบอร์ 8	12	100	92	8	8.00	0.96
เบอร์ 16	20	100	90	10	10.00	2.00
เบอร์ 30	30	100	88	12	12.00	3.60
เบอร์ 50	18	100	90	10	10.00	1.80
เบอร์ 100	10	100	92	8	8.00	0.80
ขาด	6					
รวม	100.0					9.48

5.8 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง เป็นวิธีการทดสอบหาแรงเฉือนของวัสดุดินทรายและดินเหนียว รวมถึงหินผุบางชนิด เนื่องจากวิธีการทดสอบปฏิบัติได้ง่าย จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength) สูงสุดที่ดินสามารถรับได้โดยไม่วิบัติ

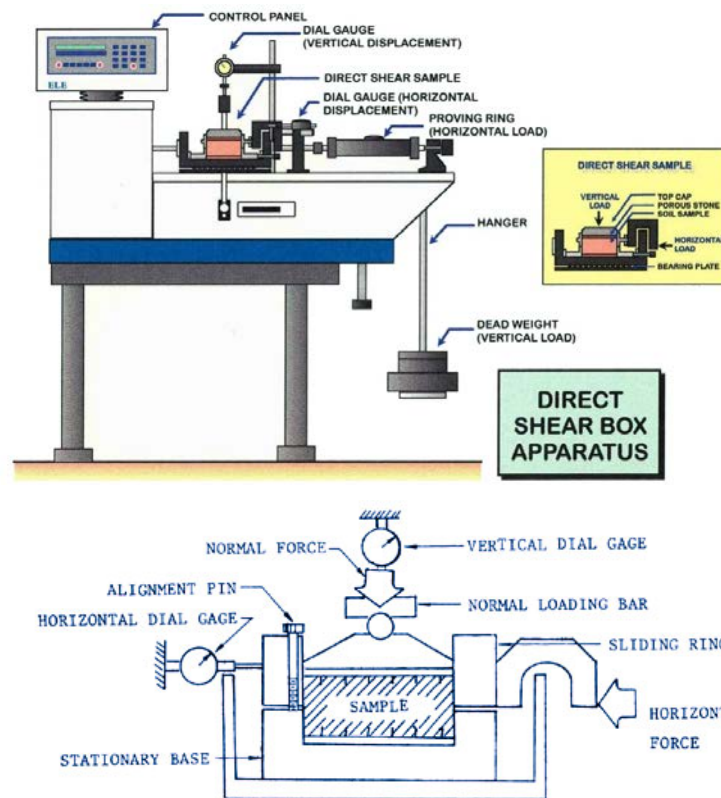
จากกฎของโมร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ณ ระบายวิบัติ จากนั้นนักที่มากกระทำต่อดิน โดยเป็นสัดส่วนกับหน่วยแรงกดตั้งฉาก (Normal stress) และพารามิเตอร์ของดินที่สำคัญ 2 ประการ คือ แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C) และมุมของแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Angle of internal friction, ϕ) ดังสมการที่ 85 โดยแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงกดตั้งฉากให้กับดิน และแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของดินและปริมาณน้ำในมวลดิน การทดสอบนี้จะให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างดินมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบหนึ่ง ๆ ตั้งฉากกับระนาบของการเฉือน แล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงเฉือน จากนั้นวัดค่าโดยใช้วงแหวนวัดแรง (Proving ring) จนกระทั่งดินถูกเฉือนขาดออกจากกัน ตามมาตรฐาน ASTM D3080 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบฐานราก การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด การออกแบบโครงสร้างรับแรงดันด้านข้าง

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad \dots \text{สมการที่ 85}$$

- เมื่อ τ คือ กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength)
 C คือ หน่วยแรงยึดเกาะ (Cohesion)
 σ คือ หน่วยแรงกดตั้งฉาก (Normal stress)
 ϕ คือ มุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction)

5.8.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- 1) เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงแบบฉุดกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 54
- 2) กล่องเก็บตัวอย่าง (Shear box)
- 3) วงแหวนวัดแรง (Proving ring) ขนาดพอเหมาะกับการกำลังของตัวอย่างที่จะทดสอบ
- 4) มาตรวัด (Dial gauge) วัดการเคลื่อนตัว มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร หรือ 0.001 นิ้ว ช่วง 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว
- 5) แผ่นน้ำหนัก (Surcharge weight)
- 6) เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper)
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
- 8) ตู้อบ
- 9) ถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 54 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

5.8.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างดินทราย

- 1) เตรียมตัวอย่างทรายแห้งหรือทรายอิ่มน้ำ (แช่น้ำ 24 ชั่วโมง) ประมาณ 1,000 กรัม
- 2) ชั่งน้ำหนักกล่องเก็บตัวอย่างและวัดขนาดภายในของกล่องเก็บตัวอย่าง ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และความสูงของตัวอย่าง พยายามให้แนวเฉือน (Failure plane) ขาดกลางตัวอย่าง บันทึกรายละเอียดการทดสอบในรูปแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

Direct shear test

- 3) ทำความสะอาดผิวภายในทั้งสองชั้นของกล่องเก็บตัวอย่าง และประกอบเข้าด้วยกันให้แน่นพอสมควร แล้ววาง Plate รองรับด้านล่าง ตามด้วยหินพรุน และ Plate ยึดตัวอย่างดินแบบมีรูระบายน้ำในแนวขวางกับทิศทางการเฉือน

- 4) ใส่ตัวอย่างลงในกล่องเก็บตัวอย่างโดยวิธีโรยเป็นชั้น ๆ ชั้นละประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างดินให้ใกล้เคียงสภาพในสนาม จากนั้นหาน้ำหนักดินในกล่องเก็บตัวอย่าง โดยชั่งน้ำหนักของดินที่เหลือกับภาชนะที่ใส่ดิน

5) ปาดผิวหน้าของดินในกล่องเก็บตัวอย่างให้เรียบ แล้วเอาดินส่วนหนึ่งไปหาความชื้นในดิน (Moisture content) โดยเอาดินใส่ถ้วยอะลูมิเนียมเก็บตัวอย่าง นำไปชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำกลับมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

6) วัดความหนาของตัวอย่างดิน โดยให้วัดความหนา 5 - 10 จุด ให้ทั่วผิวหน้าตัวอย่างดิน แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย (ความหนาของตัวอย่างดินหลังบดอัดและปรับผิวหน้าจนเรียบ จะหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร) แล้วจึงวาง Plate ยึดตัวอย่างดินแบบมีรูระบายน้ำและแผ่นเหล็กด้านบน แล้วจึงตามด้วยแผ่นเหล็กด้านล่าง (Load hand) ตามลำดับ ทับบนผิวหน้าของตัวอย่างดิน

7) ทำความสะอาดกล่องเก็บตัวอย่าง โดยใช้แปรงขนอ่อนปัดทรายที่ติดอยู่ออกให้หมด แล้วจึงนำกล่องเก็บตัวอย่างที่มีตัวอย่างดินบรรจุอยู่เรียบร้อยแล้วไปชั่งน้ำหนัก

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียว

- 1) ชั่งน้ำหนักกล่องแบบดินและวัดขนาดภายในของกล่องแบบดิน ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์
- 2) กดกล่องแบบดินลงบนตัวอย่างดินให้เต็มแบบ ปาดหน้าดินให้เรียบเสมอขอบกล่อง และขีดตัวอย่างดินที่ติดอยู่รอบ ๆ ข้างออก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก
- 3) นำตัวอย่างดินที่เหลือไปหาปริมาณน้ำในดิน
- 4) วางกล่องแบบดินที่บรรจุตัวอย่างดินลงบนกล่องเก็บตัวอย่าง และใช้แท่งกด กดลงบนตัวอย่างดินที่อยู่ในกล่องแบบดินให้ตัวอย่างดินค่อย ๆ เคลื่อนลงไปในช่องบรรจุตัวอย่างดินของกล่องเก็บตัวอย่าง แล้วจึงวาง Plate ยึดตัวอย่างดิน หินพูน และแผ่นเหล็กด้านบน (Load hand) ตามลำดับ มาทับบนผิวหน้าของตัวอย่างดิน

การทดสอบ

1) นำกล่องเก็บตัวอย่างใส่ในเครื่องทดสอบการเคียนโดยตรง ปรับแกนที่จะให้แรงเคียนให้แน่น ติดตั้งมาตรวัดแนวราบ (Horizontal dial gauge) (0.001 mm/Div) สำหรับวัดการเคลื่อนตัวของระยะที่เคียนตามแนวราบ ทำการใส่แรงกด (Normal load) บนแผ่นเหล็กด้านบน ใส่แรงกด (P_v) ให้มีน้ำหนักกดลงบนตัวอย่างดิน โดยถ้าเป็นการทดสอบแนะนำให้ใช้น้ำหนักครั้งแรกเป็น 4 กิโลกรัม คำนวณน้ำหนักที่กดต่อพื้นที่กล่องเก็บตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนักที่ใส่จะเป็น 10 เท่าเมื่อวางบนเครื่องมือทดสอบการเคียนโดยตรงแบบจุดกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

2) ติดตั้งมาตรวัดแนวตั้ง (Vertical dial gauge) (0.001 mm/Div.) บนแรงกด เพื่อวัดค่าระยะการเสียรูปในแนวตั้ง (Vertical displacement) ทั้งนี้ ให้บันทึกค่าเริ่มต้นด้วย จากนั้นขึ้นสกรูที่ยึดกล่องเก็บตัวอย่างทั้งสองข้างออก และปรับเข็มของมาตรวัดทั้งสองให้เข็มชี้ที่เลขศูนย์ (0)

3) หมุนคลายคันหมุนเลื่อนแม่แรง (Jack handle) ลง พร้อมทำการเคียนตัวอย่างโดยให้อัตราการเคียน 0.5 - 2 มิลลิเมตร/นาที ทำการอ่านค่าแรงเคียนจาก Load dial gauge และการเคลื่อน

ตัวแนวดิ่งจากมาตรวัดแนวดิ่ง (ค่าที่อ่านได้น้อยกว่าศูนย์มีค่าเป็นลบ) ทุก ๆ การเคลื่อนตัวในแนวราบของ กล้องเก็บตัวอย่างที่เหมาะสม

4) อ่านค่าวงแหวนวัดแรง จากมาตรวัดแนวนอน เช่นที่ 5, 10 , 20 , 40, 60 , 80 , 100 , 130 , 160 , 200 , 250 , 300 และ 350 Div. เป็นต้น ซึ่งจะสิ้นสุดการทดสอบได้ เมื่อตัวอย่างดินวิบัติ กล่าวคือ ค่าแรงเฉือนที่อ่านได้จาก Load dial gauge มีค่าคงที่หรือลดลงอย่างน้อยสองค่า (การเฉือนจะใช้เวลา 3 - 5 นาที สำหรับตัวอย่างทราย และ 5 - 10 นาที สำหรับตัวอย่างดินเหนียวแบบ Unconsolidated Undrained test (UU) และ Consolidated Undrained test (CU)

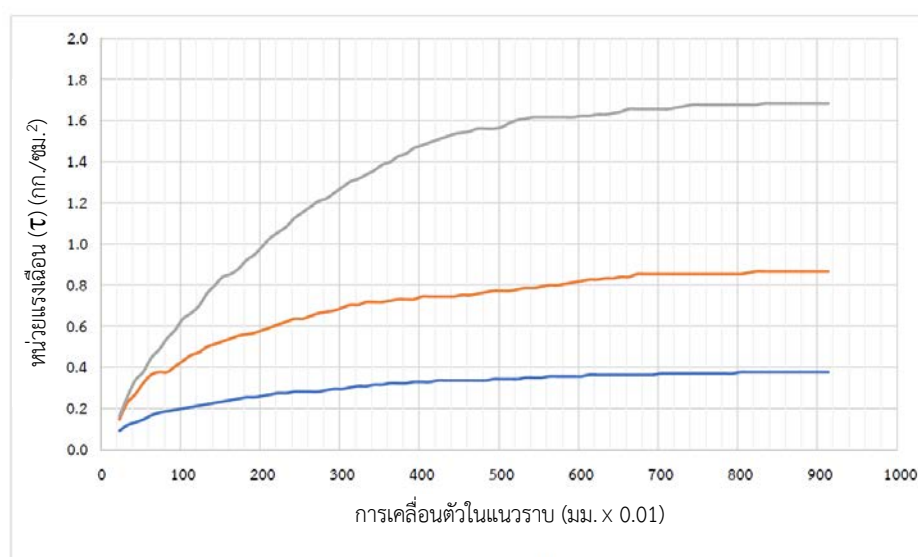
5) หลังจากตัวอย่างดินวิบัติแล้ว ให้นำตัวอย่างดินออกจากกล้องเก็บตัวอย่าง แล้วทำความสะอาด กล้องเก็บตัวอย่างให้เรียบร้อย และทำการเตรียมตัวอย่างดินใหม่ของตัวอย่างดินชนิดเดียวกันนี้

6) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (Shear stress, τ) อยู่ในแกน Y และค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal displacement) อยู่ในแกน X ดังรูปที่ 55

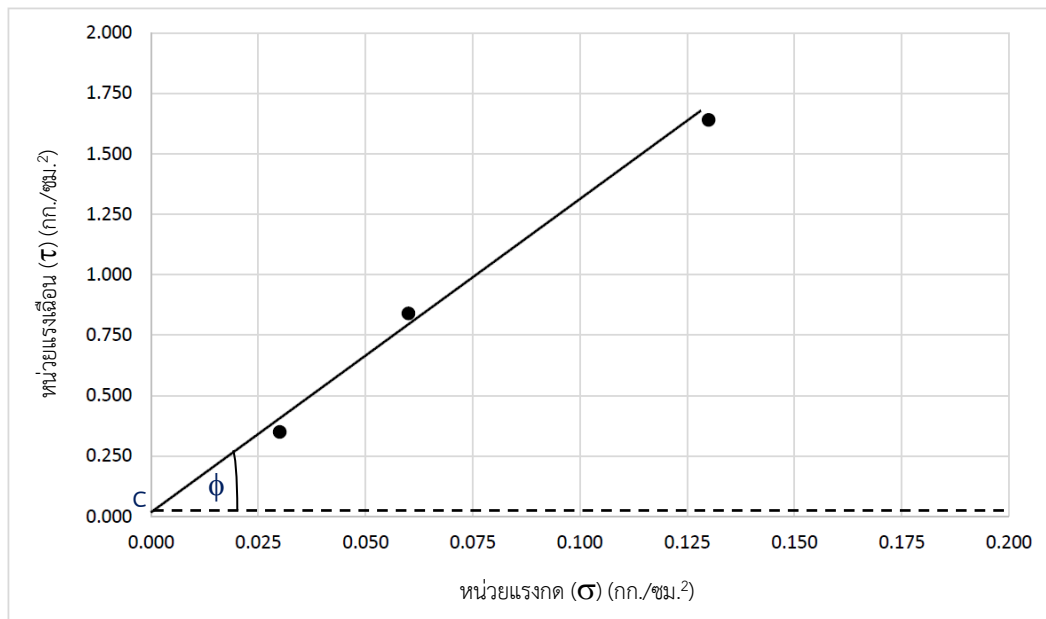
7) อ่านค่าแรงเฉือนสูงสุด (τ_{max}) ของดิน จากจุดสูงสุดในกราฟข้อ 6)

8) ดำเนินการทดสอบเหมือนกับข้อ 1) – 7) อีกอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง โดยใส่แรงกดเพิ่มเป็นสองเท่าของครั้งแรกและครั้งต่อไป ซึ่งควรเพิ่มจากเดิมที่ใส่ไปแล้ว 4 กิโลกรัม เป็น 8 กิโลกรัม และ 16 กิโลกรัม ตามลำดับ

9) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดตั้งฉาก (σ) อยู่ในแกน X และหน่วยแรงเฉือน (τ) อยู่ในแกน Y จากนั้นลากเส้นตรงเฉลี่ยผ่านจุดทั้ง 3 จุด เป็นเส้นกำลัง (Strength envelope) และอ่านค่าที่เส้นตรงตัดแกน Y คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (C) และมุมความลาดเท (Slope) ของเส้นกำลัง คือ มุมเสียดทานภายใน (ϕ) ดังรูปที่ 56



รูปที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (τ) และการเคลื่อนตัวในแนวราบ



รูปที่ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (τ) และหน่วยแรงกด (σ)

5.8.3 การคำนวณ

1) ปริมาณน้ำในดิน (Water content)

$$W = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 86}$$

เมื่อ W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ (%)

W_1 คือ น้ำหนักของดินเปียก หน่วย กรัม (g)

W_2 คือ น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วย กรัม (g)

2) ความหนาแน่นเปียก (Wet density, ρ_w)

$$\rho_w = \frac{W}{V} \quad \dots \text{สมการที่ 87}$$

เมื่อ ρ_w คือ ความหนาแน่นเปียก หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)

W คือ น้ำหนักของดินเปียกที่บดอัดในแบบ หน่วย กรัม (g)

V คือ ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของดินเปียกที่บดอัดในแบบ
หน่วย ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)

3) ความหนาแน่นแห้ง (Dry density, ρ_d)

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + \frac{w}{100}} \quad \dots \text{สมการที่ 88}$$

- เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้ง หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)
 ρ_w คือ ความหนาแน่นเปียก หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)
 W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ (%)

4) หน่วยแรงกดตั้งฉาก (Normal stress, σ)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots \text{สมการที่ 89}$$

- เมื่อ σ คือ หน่วยแรงกดตั้งฉาก หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)
 F คือ น้ำหนักกดทับ (Normal load) หน่วย กิโลกรัม (kg)
 A คือ พื้นที่หน้าตัด หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm^2)

5) หน่วยแรงเฉือน (Shear stress, τ)

$$\tau = \frac{P}{A} \quad \dots \text{สมการที่ 90}$$

$$\tau = \frac{\text{Load reading} \times \text{Load factor}}{\text{Area}} \quad \dots \text{สมการที่ 91}$$

- เมื่อ τ คือ หน่วยแรงเฉือน หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)
 P คือ แรงเฉือน (Shear force) หน่วย กิโลกรัม (kg)
 A คือ พื้นที่หน้าตัด หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm^2)

6) การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

คือ ผลต่างค่าอ่านจากมาตรหน้าปัดแนวตั้ง $\times$ ความละเอียดมาตรหน้าปัด (0.01 มม.)
 หน่วย มิลลิเมตร และใช้เครื่องหมาย (-) สำหรับการขยายตัว และ (+) สำหรับการหดตัว

7) การเคลื่อนที่ในแนวราบ

คือ ผลต่างค่าอ่านจากมาตรหน้าปัดแนวราบ $\times$ ความละเอียดมาตรหน้าปัด (0.01 มม.)
 หน่วย มิลลิเมตร

5.9 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test)

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด เป็นวิธีการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength) จากการหาค่ากำลังต้านทานต่อแรงกดสูงสุดของเนื้อดิน เหมาะสำหรับดินประเภทดินเหนียว ในการทดสอบจะให้แรงกดกับแท่งตัวอย่างดิน จนกระทั่งแท่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ แล้วนำความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด ซึ่งคือค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) ซึ่งเป็นค่าที่มักนำไปใช้ในการออกแบบวิศวกรรมฐานราก และกำหนดสถานะความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency) โดยตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบต้องเป็นตัวอย่างดินที่มีความเชื่อมแน่น สามารถปั้นเป็นรูปได้ การรับแรงของดินแบบมีความเชื่อมแน่นจะเป็นลักษณะใช้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบนี้จะไม่มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดิน การทดสอบจะเสร็จก่อนที่ตัวอย่างดินจะระบายน้ำออกได้ทัน จึงเป็นการทดสอบดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained) และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้เป็นแบบแรงรวม (Total stress) (สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ, 2549) ตามมาตรฐาน ASTM D2166-06 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil

จากกฎของโมร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) ดังสมการที่ 85 กรณีดินเหนียวอ่อน หรือดินเหนียวอยู่ในสภาพอิ่มตัว ไม่มีแรงเสียดทานในเม็ดดิน และไม่มีน้ำไหลออกจากมวลดินขณะทำการทดสอบ (Undrained condition) มุมเสียดทานภายใน (ϕ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ อาจกล่าวได้ว่า

$$\tau = c = \text{Undrained shear strength (} S_u \text{)} \quad \dots \text{สมการที่ 92}$$

เมื่อ τ คือ กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength)

c คือ แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) จึงเป็นการทดสอบวัดค่าแรงกดสูงสุดที่ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ เพื่อนำไปหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) ต่อไป

5.9.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Compression machine) พร้อมมาตรวัด (Dial gauge) ที่อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 57
- 2) เครื่องดันดิน สำหรับดันดินออกจากกระบอกบาง
- 3) Deformation indicator
- 4) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier caliper) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

- 5) กระจกเก็บตัวอย่างดิน
- 6) เครื่องมือตัดแต่งดิน
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.1 กรัม
- 8) ตู้อบ
- 9) ถ้วยอะลูมิเนียมใส่ตัวอย่าง



รูปที่ 57 เครื่องทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Compression machine)

(<https://www.eieinstruments.com/soil-testing-equipment/unconfined-compression-tester-motorised-is-2720-part-x>, Retrieved April 25, 2025)

5.9.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed sample)

1) นำตัวอย่างดินคงสภาพ จากการเก็บตัวอย่างดินซึ่งอาจห่อหุ้มเทียนหรือนำออกจาก กระจกเก็บตัวอย่าง มาตัดแต่งให้เป็นรูปทรงกระบอก โดยขนาดตัวอย่างทดสอบมาตรฐานดังตาราง ที่ 33 ซึ่งอาจใช้ขนาดอื่นได้ โดยให้ความสูงของตัวอย่างดินต้องมากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง การตัดแต่งต้องทำด้วยความระมัดระวังโดยใช้เลื่อยเส้นลวดและเครื่องตัดแต่งตัวอย่างดิน

2) ใช้กระบอกผ่า (Split mold) หุ้มตัวอย่างดินแล้วตัดส่วนล่างและส่วนบนของตัวอย่างให้ได้ความยาวตามต้องการ

3) วัดขนาดของตัวอย่างดินโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ โดยวัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 3 ค่า บริเวณตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างของตัวอย่าง เพื่อนำค่ามาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นบันทึกรายละเอียดการทดสอบในแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined compression test

4) จัดวางตัวอย่างดินลงบนเครื่องทดสอบ จัดให้ได้ศูนย์กลางของแนวคดปกติ โดยมีแผ่นพลาสติกกลมประกบไว้ด้านล่างและด้านบนเพื่อลดความผิดพลาดที่ไม่ต้องการ โดยที่แป้นกดของเครื่องจะต้องสัมผัสตัวอย่างพอดี แล้วจัดมาตรวัดสำหรับวัดการหดตัวให้เข้าที่ โดยปรับค่าเริ่มต้นที่เลขศูนย์

ตารางที่ 33 ขนาดตัวอย่างทดสอบมาตรฐาน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความสูงตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
35	70 – 76
70	140 – 152

การเตรียมตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (Disturbed sample)

นำตัวอย่างดินที่ทดสอบแล้ว หรือตัวอย่างดินคงสภาพ มาทำการบดหรือนวดเข้ากันให้ทั่ว ในกระบอกแบบที่ทาซีฟิ่งหรือน้ำมันสำหรับหล่อลื่นไว้ เพื่อความสะดวกในการดันตัวอย่าง โดยพยายามให้มีโพรงอากาศอยู่ในตัวอย่างน้อยที่สุด กรณีเป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนมากอาจต้องดันตัวอย่างออกก่อน แล้วจึงวัดขนาดจากกระบอกแทน

การทดสอบ

1) วางตัวอย่างดินบนฐานของเครื่องทดสอบ จากนั้นตั้งอัตราการกดของเครื่องมือดังตารางที่ 34

2) ตรวจสอบผิวของแท่นกดต้องสัมผัสกับตัวอย่างดินพอดี พร้อมจัดเครื่องมือวัดการหดตัวและวัดแรงให้ค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

3) เริ่มการกดตัวอย่างโดยให้อัตราการกดคงที่ โดยการเคลื่อนที่แนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.51 - 2.54 มิลลิเมตรต่อนาที (ปกติใช้ 1.27 มิลลิเมตรต่อนาที) ตามความเหมาะสมในช่วงการอ่านต่าง ๆ กัน

4) บันทึกข้อมูลจากกวางแหวนวัดแรงทุก ๆ การหดตัว 0.127 มิลลิเมตร ของตัวอย่าง (หรือใช้ 0.51 มิลลิเมตร กรณีตัวอย่างเป็นดินประาะ)

5) เมื่อแรงในกวางแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วจึงเริ่มลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดินให้อ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (Failure plane) บนตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณี

ไม่มีรอยฉีกปรากฏชัด เช่น ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ ให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงตัวอย่าง เป็นต้น

- 6) วาดรูปลักษณะการเกิดรอยฉีก และวัดมุมที่รอยฉีกทำกับแนวราบ
- 7) นำตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเสร็จแล้วไปชั่งน้ำหนักและเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณปริมาณน้ำในดิน
- 8) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain, ϵ) และแรงเค้นบนตัวอย่างในแนวดิ่ง (Vertical stress, σ) จากนั้นอ่านค่าสูงสุดของแรงเค้นบนตัวอย่างในแนวดิ่ง (σ_{max}) คือ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u)
- 9) คำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) จากสมการที่ 97 และค่าความไวของดิน (Sensitivity) จากสมการที่ 98

ตารางที่ 34 อัตราการกดตัวอย่าง

ความสูงตัวอย่าง (มิลลิเมตร)	อัตราการกด (มิลลิเมตร/นาทีก)
38	1.5
50	2.0
75	3.0
100	4.0

5.9.3 การคำนวณ

1) พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

$$A_o = \frac{A_1 + 2A_m + A_h}{4} \quad \dots \text{สมการที่ 93}$$

- เมื่อ A_o คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm^2)
- A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดด้านบนตัวอย่าง หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm^2)
- A_m คือ พื้นที่หน้าตัดตรงกลางตัวอย่าง หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm^2)
- A_h คือ พื้นที่หน้าตัดด้านล่างตัวอย่าง หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm^2)

2) ความเครียด (Strain)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \dots \text{สมการที่ 94}$$

เมื่อ ϵ คือ ความเครียด

ΔL คือ ระยะการหดตัว หน่วย เซนติเมตร (cm)

L_0 คือ ความยาวเดิมของตัวอย่าง หน่วย เซนติเมตร (cm)

3) พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดสอบ

$$A_c = \frac{A_0}{(1 - \epsilon)} \quad \dots \text{สมการที่ 95}$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดขณะตัวอย่างมีการหดตัว หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm²)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm²)

ϵ คือ ความเครียด

4) แรงเค้นบนตัวอย่างในแนวตั้ง (Vertical stress)

$$\sigma_v = \frac{(P.R.)K}{A_c} \quad \dots \text{สมการที่ 96}$$

เมื่อ σ_v คือ แรงเค้นบนตัวอย่างในแนวตั้ง หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm²)

P.R. คือ ค่าที่อ่านได้จากวงแหวนวัดแรง (Proving ring reading)

K คือ ค่าคงที่ของวงแหวนวัดแรง (Proving ring constant)

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดขณะตัวอย่างมีการหดตัว หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm²)

5) กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u)

$$S_u = \frac{q_u}{2} \quad \dots \text{สมการที่ 97}$$

เมื่อ S_u คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm²)

q_u คือ แรงเค้นสูงสุดในแนวตั้ง หรือกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm²)

6) ความไวของดิน (Sensitivity) กรณีทดสอบตัวอย่างแบบ Remold

$$\text{Sensitivity} = \frac{S_u \text{ (แรงเฉือนตัวอย่างดินคงสภาพ)}}{S_u \text{ (แรงเฉือนตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ)}} \quad \dots \text{สมการที่ 98}$$

โดยดินที่มีความไวตัวมาก ค่า Sensitivity จะมีค่าสูง หมายถึง ดินสูญเสียกำลังรับน้ำหนักมากเมื่อได้รับการกระทบกระเทือน ดังตารางที่ 35 นอกจากนี้ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) สามารถหาความสัมพันธ์ความชื้นเหลว (Consistency) ของดินเหนียวได้ตามตารางที่ 36

ตารางที่ 35 ค่าความไวของดิน (Sensitivity)

Sensitivity	ความไวของดิน
< 4	Normally
4 – 8	Sensitive
> 8	Extra-sensitive

ที่มา : เกษมชาติ, ม.ป.ป.

ตารางที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u), ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และความชื้นเหลวของดินเหนียว (Consistency)

Unconfined compressive strength, q_u (t/m ²)	Undrained shear strength, S_u (t/m ²)	Consistency
< 2.5	< 1.5	Very soft
2.5 - 5.0	1.5 – 2.50	Soft
5.0 - 10.0	2.50 – 5.00	Medium
10.0 - 20.0	5.00 – 10.00	Stiff
20.0 - 40.0	10.00 – 20.00	Very stiff
> 40.0	> 20.00	Hard

(ที่มา : Terzaghi and Peck, 1967 และ Peck et al., 1974)

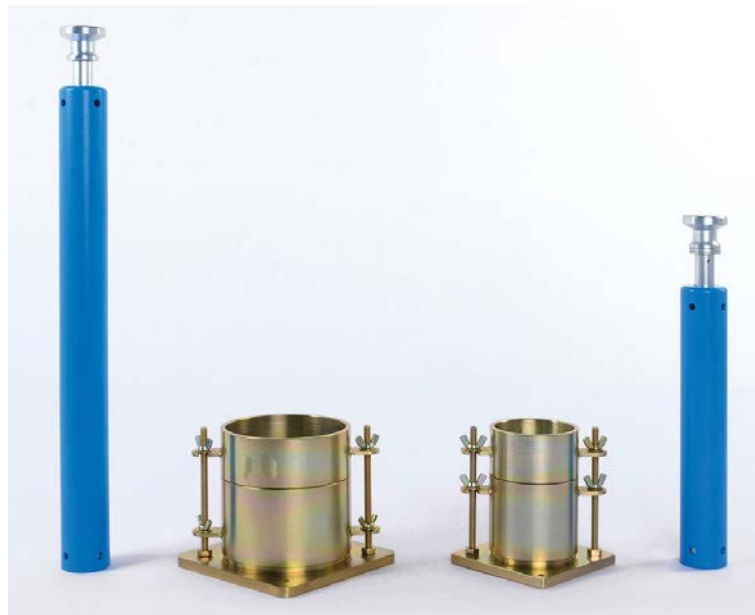
5.10 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

การบดอัดดินเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมกับงานประเภทต่าง ๆ ในเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ดินแน่นหรือทำให้ดินมีความหนาแน่นสูงสุด นอกจากใช้แรงในการบดอัดแล้วยังต้องคำนึงถึงปริมาณความชื้น (ปริมาณน้ำ) และช่องว่างในดิน เมื่อดินรับแรงอัดทางกลหรือแรงกระทำเพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเคลื่อนตัวเข้าหากัน ลดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ปริมาตรมวลดินจึงลดลง ฉะนั้นดินจึงเกิดการยุบและอัดตัว ความหนาแน่นของเม็ดดินจะสูงขึ้น มีกำลังต้านทานแรงเฉือนและรับน้ำหนักได้มากขึ้น การไหลซึมผ่านของน้ำและการหลุดตัวของดินน้อยลง โดยการทดสอบการบดอัดของดิน มี 2 วิธี ได้แก่ Standard proctor test ตามมาตรฐาน ASTM D698-75 และ Modified proctor test ตามมาตรฐาน ASTM D1557-78 เพื่อทดสอบความหนาแน่นของดินที่บดอัดในห้องปฏิบัติการ และหาปริมาณน้ำ ณ สภาวะที่ทำให้ดินบดอัดมีความหนาแน่นสูงสุด

5.10.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กระบอกลดขนาดมาตรฐาน (Standard molds) จำนวน 2 ขนาด ได้แก่
 - 1.1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) และมีปลอก (Collar) สูงประมาณ 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบ
 - 1.2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และมีปลอกสูงประมาณ 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบหรือเจาะรูพรุน ในการทดสอบต้องใช้แท่งโลหะรอง (Spacer disc) รองด้านล่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) โดยไม่ต้องใช้แท่งโลหะรอง แต่ต้องมีฐานทึบหรือแบบขนาดสูงอื่นใดซึ่งเมื่อต้องใช้แท่งโลหะรองแล้ว ได้ความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)
- 2) ค้อน น้ำหนัก 2.249 กิโลกรัม (5.5 ปอนด์) ระยะตก 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว) และค้อนหนัก 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ระยะปล่อยค้อนตก 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) เหนือระดับดินที่ต้องการบดอัด ดังรูปที่ 58
- 3) แท่งโลหะรองรูปทรงกระบอ
- 4) เครื่องดันตัวอย่าง (Sample extruder)
- 5) เครื่องชั่งแบบ Balance ชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม มีความละเอียด 0.001 กิโลกรัม สำหรับชั่งตัวอย่างทดสอบ
- 6) เครื่องชั่งแบบ Scale หรือแบบ Balance ชั่งได้ 1,000 กรัม มีความละเอียด 0.1 กรัม สำหรับหาปริมาณน้ำในดิน

- 7) เตาอบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
- 8) เหล็กปาด (Straight edge) มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร หนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร
- 9) ตะแกรงร่อนขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) และ 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)
- 10) เครื่องผสมตัวอย่าง ได้แก่ ถาด ช้อน พลั่ว เกรียง ค้อนยาง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ หรือใช้เครื่องผสมแบบ Mechanical mixer
- 11) กระจบอบดิน สำหรับใส่ตัวอย่างดินเพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน
- 12) วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ ประกอบด้วย น้ำสะอาด ดิน/หินคลุก หรือ Soil aggregate



รูปที่ 58 กระจบอบกลวงและค้อน สำหรับทดสอบการบดอัด

(https://www.eieinstruments.com/file/eb54d558f5/UTS-0600_Standard_Proctor_Mould.jpg, Retrieved April 25, 2025)

5.10.2 วิธีการทดสอบ

1) การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test)

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดินกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด เมื่อทำการบดอัดดินตามขนาดของโมล โดยวิธี ก, ข, ค และ ง ดังตารางที่ 37 ด้วยค้อนหนัก 2.494 กิโลกรัม (5.5 ปอนด์) ระยะปล่อยค้อนตก 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว)

ตารางที่ 37 ขนาดของโมลและตะแกรง สำหรับทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

วิธี	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโมล (มิลลิเมตร)	ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)
ก	4 นิ้ว (101.6)	3/4 นิ้ว (19.0)
ข	6 นิ้ว (152.4)	3/4 นิ้ว (19.0)
ค	4 นิ้ว (101.6)	เบอร์ 4 (4.75)
ง	6 นิ้ว (152.4)	เบอร์ 4 (4.75)

หมายเหตุ ถ้าไม่ระบุวิธีใดให้ใช้วิธี ก

การเตรียมตัวอย่างขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

1) นำตัวอย่างมาทำให้แห้งด้วยวิธีตากแห้งและทำการแบ่งสี่ (Quartering) หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างแห้งแล้ว (มีน้ำประมาณร้อยละ 2 - 3) นำมาร่อนผ่านตะแกรง 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) และขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแต่ละขนาดที่เตรียมไว้ พร้อมบันทึกรายละเอียดการทดสอบ ในแบบฟอร์ม ตามภาคผนวก การทดสอบการบดอัด Compaction test และทิ้งตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร

3) เทนที่มวลของตัวอย่างที่ทิ้งไป ด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากัน จากนั้นคลุกตัวอย่างทั้งหมดให้เข้ากัน

การเตรียมตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

1) นำตัวอย่างมาทำให้แห้งด้วยวิธีตากแห้ง (มีน้ำประมาณร้อยละ 2 - 3) และทำการแบ่งสี่หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่างและคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

2) หากทดสอบด้วยวิธี ค หรือ ง ให้นำตัวอย่างมาตากแห้งและใช้ค้อนยางทุบให้ก้อนหลุดออกจากกันและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) จากนั้นคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

3) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง หากใช้โมลขนาดเล็ก (4 นิ้ว) ให้ใช้น้ำหนักประมาณ 3,000 กรัม และถ้าใช้โมลขนาดใหญ่ (6 นิ้ว) ให้ใช้น้ำหนักประมาณ 6,000 กรัม สำหรับการทดสอบ 1 ครั้ง

4) เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบไม่น้อยกว่า 4 ครั้ง

การทดสอบ

- 1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโมล เพื่อคำนวณหาปริมาตรของโมล
- 2) ชั่งน้ำหนักโมล และน้ำหนักตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ จากนั้นนำตัวอย่างดินมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน
- 3) เติมน้ำให้ดินขึ้น โดยปกติใช้ปริมาณน้ำเริ่มต้นประมาณ 4% ของน้ำหนักตัวอย่าง และคลุกเคล้าตัวอย่างด้วยมือหรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
- 4) แบ่งตัวอย่างใส่ลงในโมลที่มีปลอกสวมเรียบร้อย โดยให้ดินแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ $\frac{1}{5}$ ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)
- 5) ใช้ค้อนบดอัดดินในโมลให้แน่นเป็นชั้น ๆ ดังนี้
 - การบดอัดแบบมาตรฐาน จำนวน 3 ชั้น - วิธี ก และ ค บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง
- วิธี ข และ ง บดอัดชั้นละ 56 ครั้ง
 - การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จำนวน 5 ชั้น - วิธี ก และ ค บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง
- วิธี ข และ ง บดอัดชั้นละ 56 ครั้ง
- 6) ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าดินให้เรียบเท่าระดับตอนบนของโมล กรณีที่มีหลุมบนหน้าให้เติมดินตัวอย่างและใช้ค้อนทุบให้แน่นพอสมควร
- 7) ชั่งน้ำหนักของดินตัวอย่างและน้ำหนักของโมล จากนั้นลบน้ำหนักของโมลออกก็จะได้น้ำหนักของดินเปียก
- 8) ดันแท่งตัวอย่างออกจากโมล แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง จากนั้นเก็บตัวอย่างตามแนวผ่าใส่ในกระป๋องดิน โดยน้ำหนักดินขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม ส่วนน้ำหนักดินขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม และชั่งน้ำหนักทันที เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณน้ำในดิน
- 9) อบตัวอย่างดินให้แห้ง แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักตัวอย่างดินแห้งกับกระป๋อง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน (Water content) จากสมการที่ 99 คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียก (Wet density, ρ_w) ได้จากสมการที่ 100 และความหนาแน่นแห้ง (Dry density, ρ_d) จากสมการที่ 101
- 10) ดำเนินการตามข้อ 1) – 9) โดยเพิ่มปริมาณน้ำในดินขึ้นอีกครั้งละ 2% จนกว่าความหนาแน่นลดลงหรือไม่เปลี่ยนแปลง จึงหยุดการทดสอบหรืออาจลดน้ำที่ผสมในกรณีเมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ความหนาแน่นลดลง เพื่อให้เขียนกราฟได้

11) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและร้อยละปริมาณน้ำในดิน เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, ρ_{dmax}) โดยปริมาณน้ำที่ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด คือค่า Optimum Moisture Content (OMC) ดังรูปที่ 59

2) การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดินกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด เมื่อทำการบดอัดดินตามขนาดของโมล โดยวิธี ก, ข, ค และ ง ดังตารางที่ 38 ด้วยก้อนหนัก 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ระยะปล่อยค้อนตก 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) สำหรับวิธีการทดสอบและการคำนวณ ใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

ตารางที่ 38 ขนาดของโมลและตะแกรง สำหรับทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

วิธี	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโมล (มิลลิเมตร)	ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)
ก	4 นิ้ว (101.6)	3/4 นิ้ว (19.0)
ข	6 นิ้ว (152.4)	3/4 นิ้ว (19.0)
ค	4 นิ้ว (101.6)	เบอร์ 4 (4.75)
ง	6 นิ้ว (152.4)	เบอร์ 4 (4.75)

หมายเหตุ ถ้าไม่ระบุวิธีใดให้ใช้วิธี ก

5.10.3 การคำนวณ

1) ปริมาณน้ำในดิน (Water content)

$$w = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100 \quad \dots \text{สมการที่ 99}$$

เมื่อ W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ (%)

W_1 คือ น้ำหนักของดินเปียก หน่วย กรัม (g)

W_2 คือ น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วย กรัม (g)

2) ความหนาแน่นเปียก (Wet density, ρ_w)

$$\rho_w = \frac{W}{V} \quad \dots \text{สมการที่ 100}$$

เมื่อ ρ_w คือ ความหนาแน่นเปียก หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)

W คือ น้ำหนักของดินเปียกที่บดอัดในโมล หน่วย กรัม (g)

V คือ ปริมาตรของโมล หรือปริมาตรของดินเปียกที่บดอัดในโมล

หน่วย ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)

3) ความหนาแน่นแห้ง (Dry density, ρ_d)

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + \frac{w}{100}}$$

...สมการที่ 101

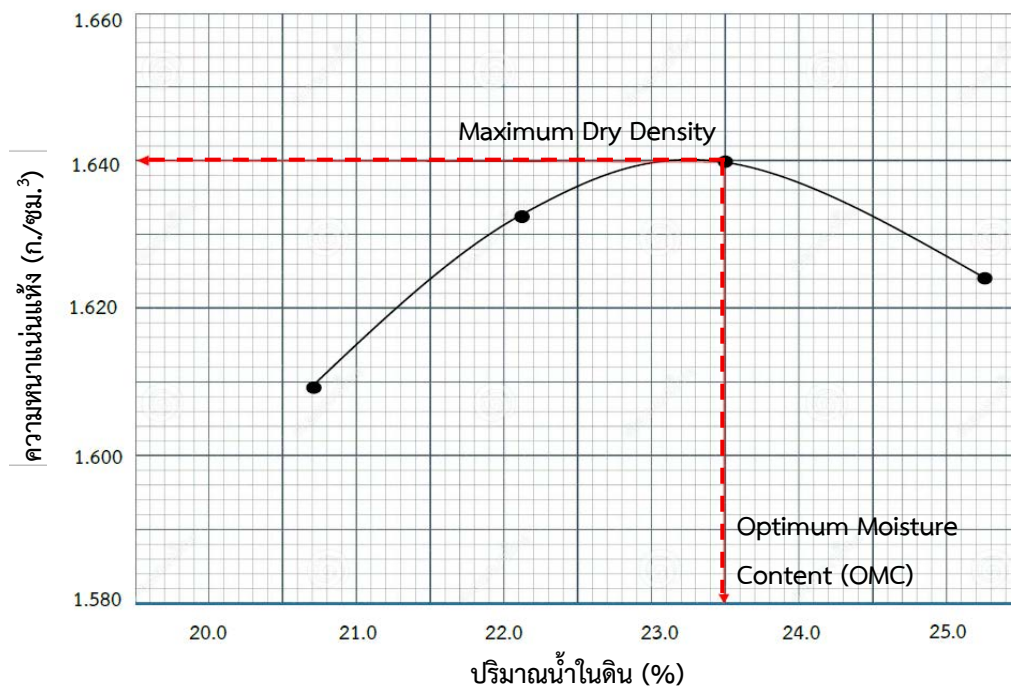
เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้ง หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)

ρ_w คือ ความหนาแน่นเปียก หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)

W คือ ปริมาณน้ำในดิน หน่วย ร้อยละ (%)

ทั้งนี้ หากได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สามารถนำไปหาค่า Relative Compaction (RC) หรือ % Compaction ของดินที่มีความชื้นแน่น เช่น ดินเหนียว ได้ดังนี้

$$\% \text{ Compaction} = \frac{\text{ความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการบดอัดดินในสนาม}}{\text{ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ}} \times 100 \text{ ...สมการที่ 102}$$



รูปที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดิน

5.11 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability test)

การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินในห้องปฏิบัติการเป็นวิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน (Coefficient of permeability) ซึ่งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของดินในการยอมให้น้ำไหลผ่านมวลดิน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดดิน ขนาดช่องว่างของเม็ดดิน การจัดเรียงตัวของโครงสร้างดิน และความสม่ำเสมอของเนื้อดิน โดยถ้าน้ำไหลผ่านมวลดินได้ง่ายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่ามาก แสดงถึงมวลดินมีช่องว่างมากหรืออยู่ในสภาพหลวม ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าน้อย แสดงถึงมวลดินมีความหนาแน่นมากทำให้น้ำซึมผ่านได้ยาก โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินในห้องปฏิบัติการมี 2 วิธี คือ การทดสอบแบบวิธีระดับน้ำคงที่ (Constant head test) สำหรับทดสอบดินเม็ดหยาบ และการทดสอบแบบวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Variable head test) สำหรับทดสอบดินเม็ดละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68(2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)

ในปี ค.ศ. 1856 ดาร์ซี (Darcy) ได้ค้นพบหลักการไหลซึมของน้ำผ่านทราย โดยความเร็วการไหลซึมของน้ำผ่านทรายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) หรือ $V \propto i$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = ki$$

...สมการที่ 103

เมื่อ V คือ ความเร็วการไหลซึม

k คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

i คือ ความลาดชันทางชลศาสตร์ หรือสัดส่วนระหว่างผลต่างของระดับน้ำที่ไหลผ่าน (Total Head) และความยาวการไหล ($\Delta h/L$)

5.11.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ชุดทดสอบอัตราการซึมผ่าน (Permeameters)
- 2) กระจกบรรจุดิน (Mold)
- 3) อุปกรณ์อัดดิน เช่น ค้อนยาง เหล็กกระทิง
- 4) เครื่องดูดอากาศ (Vacuum Pump)
- 5) กระจกตวงน้ำ (Measuring Cylinder)
- 6) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
- 8) นาฬิกาจับเวลา

5.11.2 วิธีการทดสอบ

การเตรียมการทดสอบและตัวอย่างดิน

1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของกระบอกบรรจุตัวอย่างดิน เพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (A) จากนั้นประกอบอุปกรณ์โดยวางวัสดุรอง (ตะแกรงหรือหินปูน) ไว้ด้านล่าง วางสปริงและหินปูนไว้ด้านบน แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกค่าในแบบฟอร์มตามภาคผนวก การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability test)

2) เตรียมตัวอย่างดินกรณีเป็นดินทรายให้กำหนดความหนาแน่นสำหรับดินเหนียวคงสภาพโดยใช้วิธีเขี่ยดินตัวอย่างใส่ในกระบอกบรรจุตัวอย่างดิน และกรณีเป็นดินเหนียวหรือดินลูกรังบดอัด ต้องปล่อยให้ตัวอย่างดินชุ่มน้ำประมาณ 12 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างดินทรายสามารถทดสอบได้ทันที

3) นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้บรรจุลงในกระบอกบรรจุตัวอย่างดินเป็นชั้น ๆ ชั้นละประมาณ 1.5 เซนติเมตร และใช้อุปกรณ์บดอัดดินให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติมากที่สุด โดยให้ผิวหน้าตัวอย่างดินต่ำกว่าขอบกระบอกบรรจุตัวอย่างดินประมาณ 2.5 เซนติเมตร และปรับผิวหน้าดินให้เรียบ

4) นำหินปูนวางทับบนผิวหน้าตัวอย่างดินและกดให้แน่น วางสปริงและใส่ฝาครอบยึดให้แน่น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกค่า

การทดสอบแบบวิธีระดับน้ำคงที่ (Constant head test)

1) ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยต่อสายยางจากหลอดวัดระดับน้ำ (Manometer) เข้ากระบอกบรรจุตัวอย่างดิน จากนั้นวัดระยะระหว่างทางเข้าทั้งสอง (L) และเปิดน้ำเข้ากระบอกตัวอย่าง

2) ไล่ฟองอากาศ โดยนำท่อยางจากถังน้ำด้านบนต่อเข้าวาล์วทางด้านล่างของกระบอกตัวอย่าง จากนั้นค่อย ๆ เปิดวาล์วให้น้ำไหลขึ้นด้านบน และเปิดวาล์วด้านข้างไล่อากาศในหลอดวัดระดับน้ำทั้งสองข้างด้วยการเคาะเบา ๆ จนกระทั่งฟองอากาศลอยขึ้นจนหมด

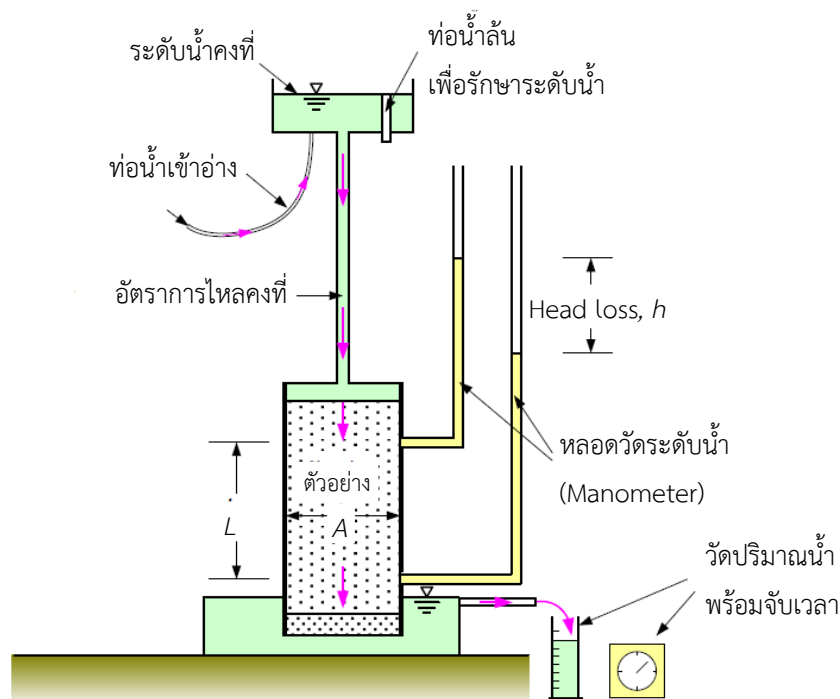
3) ปิดวาล์วด้านล่าง ถอดสายยางออกแล้วนำไปต่อวาล์วด้านบนของตัวอย่าง จากนั้นเปิดวาล์วให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างทางด้านบน และอ่านระดับน้ำในหลอดวัดระดับน้ำ จนกระทั่งระดับน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 60

4) เริ่มการทดสอบโดยเปิดวาล์วทางน้ำออกให้อัตราการไหลคงที่ แล้วจับเวลาเป็นวินาที พร้อมนำกระบอกตวงมารองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน โดยวัดปริมาณน้ำ 4 – 5 ครั้งในช่วงเวลาที่กำหนดเอง เช่น 15, 20, 25, 30 วินาที พร้อมจดบันทึกปริมาณน้ำ (Q) และอุณหภูมิของน้ำ (t) เมื่อน้ำไหลออกไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหรือมีปริมาณเท่ากันตลอดในเวลาที่กำหนด แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำคงที่

5) ระหว่างปล่อยน้ำเข้าตัวอย่าง ต้องคอยเติมน้ำให้ระดับน้ำพอดีกับระดับท่อน้ำล้น ตลอดเวลาการทดสอบ

6) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบระดับน้ำคงที่ (k_T) จากสมการที่ 104 และปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ณ อุณหภูมิห้องทดลองเป็น ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (k_{20}) จากสมการที่ 106

7) ทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ณ อุณหภูมิห้องทดลอง และ ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 60 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบวิธีระดับน้ำคงที่ (พรพจน์ ต้นแสง, 2554)

การทดสอบแบบวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Variable head test)

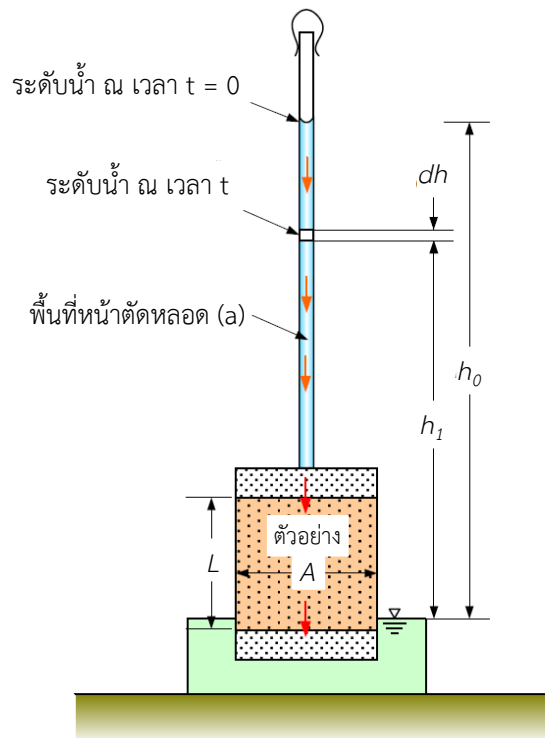
1) ไล่ฟองอากาศและทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการนำตัวอย่างดินไปแช่น้ำ พร้อมกับใช้เครื่องดูดอากาศออก สำหรับดินที่มีการซึมน้ำต่ำต้องแช่ตัวอย่างในน้ำประมาณ 24 ชั่วโมง

2) เริ่มการทดสอบโดยเปิดวาล์วน้ำเข้าในหลอดวัดระดับน้ำ ให้ระดับน้ำในหลอดสูงขึ้นจนใกล้เคียงหลอดที่ระดับ h_0

3) เปิดวาล์วให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง จากนั้นจับเวลาที่น้ำลดจากระดับ h_0 ถึง h_1 และวัดอุณหภูมิของน้ำ พร้อมจดบันทึก

4) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหลอดวัดระดับน้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด (a) จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบระดับน้ำแปรเปลี่ยน (k_T) จากสมการที่ 105 และปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินเนื่องจากอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (k_{20})

5) ทำการทดสอบซ้ำอีก 3 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ณ อุณหภูมิห้องทดลอง และ ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 61 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (พรพจน์ ต้นแสง, 2554)

5.11.1 การคำนวณ

1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน แบบระดับน้ำคงที่

$$k_T = \frac{QL}{Aht}$$

...สมการที่ 104

- เมื่อ k_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ณ อุณหภูมิห้องทดลอง หน่วย เซนติเมตรต่อวินาที (cm/sec)
- Q คือ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³)
- L คือ ความยาวของตัวอย่างดิน หน่วย เซนติเมตร (cm)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่น้ำไหลผ่าน หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm²)
- h คือ ผลรวมของความแตกต่างของระดับน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง (Total head) หน่วย เซนติเมตร (cm)
- t คือ เวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง หน่วย วินาที (sec)

2) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน แบบระดับน้ำแปรเปลี่ยน

$$k_T = \frac{2.3aL}{A \Delta t} \times \log \frac{h_0}{h_1} \quad \dots \text{สมการที่ 105}$$

- เมื่อ k_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ณ อุณหภูมิห้องทดลอง หน่วย เซนติเมตรต่อวินาที (cm/sec)
- a คือ พื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดระดับน้ำ (Manometer) หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm²)
- L คือ ความยาวของตัวอย่างดิน หน่วย เซนติเมตร (cm)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่น้ำไหลผ่าน หน่วย ตารางเซนติเมตร (cm²)
- Δt คือ เวลาที่น้ำลดระดับจาก h_0 ถึง h_1 หน่วย วินาที (sec)
- h_0 คือ ระดับน้ำขณะเริ่มทดสอบ หน่วย เซนติเมตร (cm)
- h_1 คือ ระดับน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ หน่วย เซนติเมตร (cm)

3) การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน

$$k_{20} = k_T \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad \dots \text{สมการที่ 106}$$

- เมื่อ k_{20} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (C°)
- k_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ณ อุณหภูมิห้องทดลอง
- $\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$ คือ อัตราส่วนความหนืดของน้ำ ณ อุณหภูมิห้องทดลอง และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หาได้จากตารางที่ 39

ตารางที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$ และอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$
0	1.779	25	0.906
4	1.555	30	0.808
10	1.299	40	0.670
15	1.133	50	0.550
20	1.000	60	0.468

(ที่มา : พรพจน์ ต้นเส็ง, 2554)

บทที่ 6

การรายงานผลการสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา

ในการสำรวจทางธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา ต้องมีการจัดทำรายงานที่ครอบคลุมเนื้อหาตั้งแต่วัตถุประสงค์ของการสำรวจ การศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เคยมีผู้ศึกษามาก่อน ข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่โครงการ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะธรณีวิทยา ลักษณะอุทกธรณีวิทยา ลักษณะและรูปแบบของโครงการก่อสร้าง เป็นต้น ขั้นตอนการดำเนินงาน รวมถึงวิธีการดำเนินงานสำรวจและทดสอบทั้งในภาคสนามและห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์และสรุปผลการสำรวจ ตลอดจนผลการทดสอบทางด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา ซึ่งการสำรวจแบ่งเป็น 2 ประเภท ประกอบด้วย การสำรวจเบื้องต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ และการสำรวจขั้นรายละเอียด เพื่อวางแผนการวางโครงการและออกแบบโครงการ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการสำรวจที่แตกต่างกัน การสำรวจขั้นรายละเอียดจะทำการสำรวจและทดสอบถึงขั้นตอนการประเมินปริมาณสำรองของวัสดุแหล่งวัสดุ

องค์ประกอบของรายงานการสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา ควรประกอบด้วย หัวข้อและรายละเอียดของข้อมูล ดังต่อไปนี้

6.1 บทนำ

ครอบคลุมที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตการสำรวจ และข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่โครงการ

6.2 ลักษณะทั่วไปและธรณีวิทยาฐานราก

จากการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นและศึกษาข้อมูลจากผู้ที่เคยศึกษามาก่อน บริเวณพื้นที่โครงการ และพื้นที่ใกล้เคียง ประกอบด้วยข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะธรณีวิทยา และลักษณะอุทกธรณีวิทยา ดังนี้

6.2.1 ลักษณะภูมิประเทศ อาศัยข้อมูลจากแผนที่ภูมิประเทศ ของกรมแผนที่ทหาร และภาพถ่ายทางอากาศ หรือจากรายงานการศึกษาเดิม พร้อมจัดทำแผนที่ภูมิประเทศบริเวณพื้นที่โครงการ

6.2.2 ลักษณะธรณีวิทยา อาศัยข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจ และจากการสำรวจธรณีวิทยาผิวดินในภาคสนาม หรือจากรายงานการศึกษาเดิม ประกอบด้วยรายละเอียดของชนิดหิน (Lithology) การเรียงลำดับชั้นหิน (Stratigraphy) ตลอดจนโครงสร้างทางธรณีวิทยา (Geological structure) เช่น รอยเลื่อน รอยแตก โพรง เป็นต้น การจำแนกคุณภาพหินฐานราก (Qualification of rock foundation) จากลักษณะหินโผล่ที่พบหรือข้อมูลหลุมเจาะสำรวจ ข้อมูลแผ่นดินไหวและปรากฏการณ์การเคลื่อนไหวทางธรณีวิทยา (Dynamic geological

phenomena) เช่น ดินถล่ม การกัดเซาะ เป็นต้น พร้อมจัดทำแผนที่ธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โครงการ ขนาดมาตราส่วน 1 : 5,000 มาตราส่วน 1 : 1,000 หรือตามความเหมาะสมของโครงการ

6.2.3 ลักษณะอุทกธรณีวิทยา อาศัยข้อมูลจากแผนที่อุทกธรณีวิทยา ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ประกอบด้วยรายละเอียดของข้อมูลชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) ปริมาณน้ำที่คาดว่าจะพัฒนาได้ (Expected well yield) และคุณภาพน้ำบาดาล (Groundwater quality) พร้อมจัดทำแผนที่อุทกธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โครงการ

ทั้งนี้ แผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา และแผนที่อุทกธรณีวิทยา ควรจัดทำให้มีขนาดมาตราส่วนเดียวกัน และครอบคลุมพื้นที่โครงการ รวมถึงพื้นที่ใกล้เคียง

6.3 การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา

การสำรวจธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยาในภาคสนาม ประกอบด้วยวิธีการสำรวจพื้นผิว และการสำรวจใต้พื้นผิว มีรายละเอียด ดังนี้

6.3.1 การสำรวจพื้นผิว (Surface investigation) ประกอบด้วยข้อมูลสภาพธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยาเบื้องต้น และข้อมูลในภาคสนามอย่างละเอียด จากการสำรวจลักษณะหินโผล่ ทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ พร้อมจัดทำแผนที่ธรณีวิทยา ขนาดมาตราส่วนตามความเหมาะสมของโครงการ เพื่อวางแผนและกำหนดขอบเขตการสำรวจ ที่แน่นอน รวมถึงกำหนดจุดเจาะสำรวจ

6.3.2 การสำรวจใต้พื้นผิว (Subsurface investigation) ประกอบด้วยข้อมูลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ เช่น การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน และการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีเรดาร์ยังลึก เป็นต้น การเจาะสำรวจ เช่น การเจาะเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือหมุน การเจาะแบบฉีดล้าง เป็นต้น

ทั้งนี้ การสำรวจแต่ละโครงการจะใช้วิธีการสำรวจแบบใดบ้างนั้น ขึ้นกับความเหมาะสมและระดับความละเอียดของข้อมูลที่ต้องการ

6.4 การทดสอบทางวิศวกรรมธรณีวิทยา

6.4.1 การทดสอบในภาคสนาม ได้แก่ การตอกทดสอบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) เพื่อทดสอบกำลังรับน้ำหนักของชั้นดิน

6.4.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินและหิน ได้แก่ การทดสอบหาการกระจายขนาดผลของเม็ดดิน การทดสอบแอมพลิจูดการบีบอัด การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์

6.5 ผลการสำรวจและทดสอบ

6.5.1 สรุปปริมาณงานที่ได้สำรวจและทดสอบ

6.5.2 ผลการสำรวจและผลการทดสอบ ควรประกอบด้วยข้อมูล ดังนี้

1) แผนที่ธรณีวิทยาแสดงชนิดของหินโพลีบริเวณพื้นผิว ตำแหน่งการสำรวจ ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจและทดสอบ

2) รูปตัดขวางแสดงข้อมูลจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ (ถ้ามี)

3) ธรณีวิทยาหลุมเจาะ (Geological log of boreholes) แสดงรายละเอียดการบรรยายชนิดของดินและหิน พร้อมคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินและหิน ตามความลึกเจาะ

4) รูปตัดขวางธรณีวิทยาฐานราก (Geological profiles)

5) แหล่งวัสดุก่อสร้าง โดยแสดงตำแหน่ง ชนิด ขนาด ปริมาณสะสม และราคา พร้อมผลการทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรม ฯลฯ

6) รูปถ่ายขณะทำการสำรวจ เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจ หลุมเจาะสำรวจ หลุมทดสอบ แนวสำรวจ และตัวอย่างดินหรือหิน

7) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินและหินทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งจำแนกชนิด คุณสมบัติ และคุณภาพชั้นดินและหินฐานราก

6.6 สรุปผล ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

6.6.1 สรุปผลการสำรวจและทดสอบธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีวิทยา เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบกระจายน้ำหรือปรับปรุงโครงการต่อไป

6.6.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบระบบกระจายน้ำหรือปรับปรุงโครงการ เช่น ข้อจำกัดของการสำรวจและทดสอบพร้อมข้อเสนอแนะ การปรับปรุงแก้ไขฐานราก แนะนำการออกแบบฐานราก การก่อสร้าง ตลอดจนแนะนำการสำรวจเพิ่มเติม หรือหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่จำเป็นต่อการก่อสร้างหรือออกแบบเพิ่มเติม เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน. (2553). *มาตรฐานรายละเอียดและคุณลักษณะทางวิศวกรรมงานหินทิ้ง หินก่อ หินเรียง หินเรียงยาแนว*. กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2555). *คู่มือการสำรวจทำแผนที่ธรณีวิทยา*. กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2566). *การสำรวจด้วยวิธีสัญญาณเรดาร์ (Ground Penetrating Radar, GPR)*. สืบค้นเมื่อ 16 สิงหาคม 2566, จาก <https://www.dmr.go.th/เทคโนโลยีธรณี/การสำรวจธรณีฟิสิกส์/การสำรวจด้วยวิธีสัญญาณเรดาร์-ground-penetrating-radar-gpr/>
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2546). *คู่มือข้อกำหนดรายละเอียดงานทดสอบและวิเคราะห์ตะกอน, คู่มือการทดสอบและวิเคราะห์วัสดุด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ, คู่มืองานสำรวจและทดสอบด้านวิศวกรรมธรณีวิทยา, คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*. กรุงเทพมหานคร: สำนักวิจัย พัฒนาและอุทกวิทยา กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2556). *การควบคุมงานโครงการอนุรักษ์ พัฒนาและฟื้นฟูแหล่งน้ำ*. สระบุรี: สำนักงานทรัพยากรน้ำภาค 2 กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2557). *คู่มือการสำรวจออกแบบโครงการพัฒนาและอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำ*. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรน้ำ และกลุ่มการวิจัยและพัฒนาแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2560). *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรช่างควบคุมงานก่อสร้างโครงการพัฒนาและอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำ วิชา ประเภทของโครงการพัฒนาและอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำ*. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรน้ำ.
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2560). *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรช่างสำรวจเพื่อการออกแบบโครงการพัฒนาและอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำ*. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2560). *เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรช่างวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ คู่มือปฏิบัติงานควบคุมคุณภาพวัสดุและมาตรฐานการทดสอบวัสดุ*. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรน้ำ. (2566). *คู่มือสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ด้วยเครื่องมือ Geomative*. กรุงเทพมหานคร: กองพัฒนาแหล่งน้ำ 1 กรมทรัพยากรน้ำ.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- เกษมชาติ ศรีวัลย์. (ม.ป.ป.). *SOIL MECHANIC LABORATORY ปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์* (CE352). กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์. (2546). *น้ำบาดาล*. เชียงใหม่: ภาควิชาธรณีวิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ทองเด่น สุภาพ. (2556). *การทดสอบการหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น* (*Relative Density of Cohesionless Soils*). สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน.
- พรพจน์ ต้นเส้ง. (2554). *ปฐพีกลศาสตร์ (SOIL MECHANICS)*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกุล. (2558). *คู่มือวิศวกรรมฐานราก (FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK)*. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- เพ็ญตา สาตรักษ์. (2550). *ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ผิวดิน (Exploration geophysics)*. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สัมพันธ์ สิงหราชวรพันธ์. (2545). *ธรณีวิทยาวิศวกรรม Engineering Geology*. เชียงใหม่: ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุกิจ นามพิชญ์, ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, เอกรัตน์ รวยรวย, ศุภสิทธิ พงศ์ศิweiseสธิตย์ และสุธิ ปิยะพิพัฒน์. (2549). *คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ Soil Mechanics Laboratory*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ
- สุชาติ ทองเงิน. (2557). *การวิเคราะห์เสถียรภาพของที่ลาด บริเวณกิโลเมตรที่ 6 ทางหลวงหมายเลข 1252 (ช่วงกอม-ปางแฟน) บ้านแม่ตอน ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่* (*Slope Stability Analysis at Kilometer 6 Highway 1252 (Khuang Kom-Pang Fan) Ban Mae Ton, Tambon Thep Sadet, Doi Saket District, Chiang Mai Province* (รายงานการค้นคว้าอิสระปริญญาตรี). ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุรัชย์ สุนันทพงศ์ศักดิ์ และประเสริฐ บุญรักษา. (2543). *การหาความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลอง Cam Clay พารามิเตอร์ กับค่า Plasticity Index ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ*. รายงานฉบับที่ วพ. 183. ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- สุริยะ ทองมณี. (2558). *ENGINEERING SOIL TESTS*. Volume I. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- อัมพรรค์ วรรณโกมล. (2551). *การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (Geophysics Exploration)*. นครราชสีมา: สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2021). *Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements (AASHTO T 222-81)*. AASHTO, Washington, D.C.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (1958). *ASTM standards*. Philadelphia, Pa.
- American Society of Testing Materials (ASTM). (1992). *Test method of specific gravity of soils (ASTM D854-92)*.
- American Society of Testing Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D854-14)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Asia Testing Equipment Co., Ltd.. (n.d.). *Ground Penetrating Radar (เครื่องมือหยั่งความลึกด้วยสัญญาณเรดาร์)*. Retrieved August 16, 2023, from <https://www.asiatest.co.th/Ground-Penetrating-Radar>
- Bowles, J. E. (2012). *Engineering Properties of Soils and their Measurements*. 4th edition. McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi.
- Daniels, J. (2000). *Ground Penetrating Radar Fundamentals*. Department of Geological Sciences, The Ohio State University. doi:10.4133/1.2921864.
- EXE. (n.d.). *กระบวนการเจาะสำรวจดินโดยวิธีฉีดล้าง (Wash Boring)*. Retrieved September 15, 2023, <https://www.exesoiltest.com/wash-boring-method/>
- EXE. (2019). *การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample)*. Retrieved September 12, 2023, from <https://www.exesoiltest.com/undisturbed-sample/>
- EXE. (2019). *การเก็บตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample)* Retrieved September 12, 2023, from <https://www.exesoiltest.com/disturbed-sample/>
- Humboldt Mfg. Co. (n.d.). *Atterberg Limits (Liquid Limit Testing)*. Retrieved August 16, 2023, from <https://www.humboldtmfg.com/astm-liquid-limit-atterberg.html>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Johnssss. (2015). *Geotechnical and Foundation Engineering 2.4.3. Standard Penetration Test ASTM D1586-11*. Retrieved September 15, 2023, from <http://foundationeng.blogspot.com/>
- Loke, M.H. (1998). *RES2DINV ver. 3.4 for Windows 3.1 and 95 Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-squares method*. Shenzhen China: ST Geomative Co., Ltd.
- Markus. (2017). *A Closer Look At 3D Resistivity Surveys*. Retrieved August 16, 2023, from <https://www.agiusa.com/3d-resistivity-survey>
- Meyerhof, G.C. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.82, No.SM1. p.1-19.
- Michaud, L.D. (2016). *How to Perform a Sieve Analysis*. Retrieved September 15, 2023, from https://www.911metallurgist.com/blog/perform-test_sieves-analysis.
- Olafsdottir, E.A. (2017). *Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils*. Retrieved August 16, 2023, from <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cgj-2016-0302>
- Park, C. B., R. D. Milller, and J. Xia, (1999). *Multi-channel analysis of surface waves: Geophysics*, p. 800-808.
- Park Seismic LLC. (n.d.). *Seismic Survey*. Retrieved August 16, 2023, from <https://www.parkseismic.com/whatisseismicsurvey/>
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation Engineering*, New York: John Wiley & Sons.
- Singh, S. (2021). *Shrinkage Limit Test*. Retrieved August 16, 2023, from <https://www.civilengineeringweb.com/2021/04/shrinkage-limit-test.html>
- ST Geomative Co., Ltd. (2019). *GD-10 Series Connection Description (Starter Edition)*. Shenzhen China: ST Geomative Co., Ltd.
- ST Geomative Co., Ltd. (n.d.). *GD-10 Series D.C. Geo-electrical System GD-10 Supreme 2D/3D User's Manual*. Shenzhen China: ST Geomative Co., Ltd.
- SunCam. (n.d.). *Stormwater Retention - Field and Laboratory Test Methods*. Retrieved September 15, 2023, from <https://s3.amazonaws.com/suncam/docs/039.pdf>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Edition, New York: John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons.
- Vaskou, P. P. et al. (2019). *ISRM Suggested Method for the Lugeon Test*. Retrieved September 15, 2023, from https://www.researchgate.net/publication/335850513_ISRM_Suggested_Method_for_the_Lugeon_Test.

รายชื่อคณะกรรมการจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบชั้นดินชั้นหินทางธรณีวิทยา

และวิศวกรรมธรณีวิทยา

ตามคำสั่งกองพัฒนาแหล่งน้ำ 1 ที่ 5/2566 ลงวันที่ 6 กรกฎาคม 2566

และคำสั่งกองพัฒนาแหล่งน้ำ 1 ที่ 1/2567 ลงวันที่ 26 มกราคม 2567

รายชื่อ	ตำแหน่ง	สังกัด	หน้าที่
1. นายประยุทธ์ ไกรปราบ	ผู้อำนวยการกองพัฒนาแหล่งน้ำ 1	กพน.1	ประธานที่ปรึกษา
2. นายวรภัต ธรรมประทีป	ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านระบบ การพัฒนาแหล่งน้ำ	กพน.1	ที่ปรึกษา
3. นายธีระเดช ศุรุติ	ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี	กพน.1	หัวหน้าคณะทำงาน
4. นายเอกรัตน์ อาชีวะ	ผู้อำนวยการส่วนสำรวจและออกแบบ	กพน.1	คณะทำงาน
5. นางสาวสุชาดา ทองเงิน	นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ	กพน.1	คณะทำงาน
6. นายจิริกิตต์ อุปเวียง	นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ	กวพ.	คณะทำงาน
7. นายวรวัฒน์ เมืองชื่น	นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ	กพน.1	คณะทำงาน
8. นางสาวณิชารีย์ เวียงมูล	นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ	กพน.1	คณะทำงานและเลขานุการ
9. นางสาวสุภาวดี นกเสวก	นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ	กพน.1	คณะทำงานและผู้ช่วย เลขานุการ



คำสั่งกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑

ที่ ๕ / ๒๕๖๖

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบชั้นดินชั้นหินทางธรณีวิทยา และวิศวกรรมธรณีวิทยา

.....

ตามคำสั่งกรมทรัพยากรน้ำ ที่ ๕๓๙/๒๕๖๕ ลงวันที่ ๙ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๕ ได้กำหนดโครงสร้างการแบ่งงานและอำนาจหน้าที่ความรับผิดชอบ ของหน่วยงานภายในกรมทรัพยากรน้ำ ตามกฎกระทรวงแบ่งส่วนราชการกรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. ๒๕๖๕ ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ๑๓๙ ตอนที่ ๖๑ ก ลงวันที่ ๓ ตุลาคม ๒๕๖๕ ได้เพิ่มภารกิจส่วนวิศวกรรมธรณีในกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑

ดังนั้น เพื่อให้การปฏิบัติราชการของกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑ เกิดผลสัมฤทธิ์ เป็นไปตามเป้าหมายแนวทาง แผนปฏิบัติราชการกรมทรัพยากรน้ำ ซึ่งกำหนดให้กองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑ พัฒนาและจัดทำมาตรฐานข้อกำหนด หลักเกณฑ์ และคู่มือด้านการพัฒนาและบริหารจัดการแหล่งน้ำ จึงขอแต่งตั้งคณะกรรมการจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบชั้นดินชั้นหินทางธรณีวิทยา และวิศวกรรมธรณีวิทยา โดยมีองค์ประกอบ หน้าที่และอำนาจ ดังนี้

องค์ประกอบ

- | | |
|---|-------------------------------|
| ๑) นายประยุทธ์ ไกรปราบ | ประธานที่ปรึกษา |
| ผู้อำนวยการกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑ | |
| ๒) นายวรภัต ธรรมประทีป | ที่ปรึกษา |
| ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านระบบการพัฒนาแหล่งน้ำ | |
| ๓) นายธีระเดช คุรุวุฒิ | หัวหน้าคณะกรรมการ |
| ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี | |
| ๔) นายเอกรัตน์ อาชีวะ | คณะกรรมการ |
| ผู้อำนวยการส่วนสำรวจและออกแบบ | |
| ๕) นางสาวสุชาดา ทองเงิน | คณะกรรมการ |
| นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ | |
| ๖) นายจิรกิตติ อุปเวียง | คณะกรรมการ |
| นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ | |
| กองวิจัย พัฒนาและอุทกวิทยา | |
| ๗) นางสาวณิชารีย์ เวียงมูล | คณะกรรมการและเลขานุการ |
| นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ | |
| ๘) นางสาวสุภาวดี นกเสวก | คณะกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ | |

/หน้าที่และ...

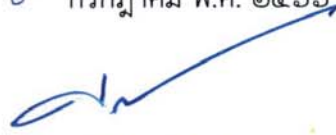
หน้าที่และอำนาจ

๑) ให้คณะกรรมการจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบชั้นดินชั้นหินทางธรณีวิทยา และวิศวกรรมธรณีวิทยา พร้อมหลักเกณฑ์ข้อกำหนด รวมถึงขั้นตอนการปฏิบัติงาน ให้เป็นรูปแบบมาตรฐาน สอดคล้องกับหลักวิชาการ ให้แล้วเสร็จภายใน ๖๐ วันทำการ

๒) ปฏิบัติงานอื่น ๆ ตามที่ได้รับมอบหมาย

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๖ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๖๖



(นายประยุทธ์ ไกรปราบ)
ผู้อำนวยการกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑



คำสั่งกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑

ที่ ๑ /๒๕๖๗

เรื่อง ปรับปรุงคำสั่งคณะกรรมการจัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบชั้นดินชั้นหินทางธรณีวิทยา
และวิศวกรรมธรณีวิทยา ของกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑

.....

อนุสนธิคำสั่งกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑ ที่ ๕/๒๕๖๖ ลงวันที่ ๖ กรกฎาคม ๒๕๖๖ เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการ
จัดทำคู่มือสำรวจและทดสอบชั้นดินชั้นหินทางธรณีวิทยา และวิศวกรรมธรณีวิทยา ของกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑

เพื่อให้การปฏิบัติราชการของกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑ เกิดผลสัมฤทธิ์ เป็นไปตามเป้าหมาย
แนวทางแผนปฏิบัติราชการกรมทรัพยากรน้ำ จึงมีคำสั่งแต่งตั้ง นายวรวัฒน์ เมืองชื่น นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ
เป็นคณะกรรมการเพิ่มเติม นอกเหนือจากนี้ให้เป็นไปตามคำสั่งเดิมทุกประการ

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒๖ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗

(นายประยุทธ์ ไกรปราบ)

ผู้อำนวยการกองพัฒนาแหล่งน้ำ ๑

ภาคผนวก

แบบบันทึกข้อมูล



Geologic log of test pit or auger hole

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :						หลุมที่ :		วันที่เริ่มเจาะ :		
ตำแหน่ง :						ตัวอย่างดินที่ :		วันที่แล้วเสร็จ :		
พิกัด :E.....N						เส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะ :มม.		ผู้บันทึก :		
ค่าระดับความสูง :ม.รทก.						ความลึกรวม :ม.		แผนที่ :จาก.....		
Method	Support	Water	Note-sample tests	Depth (m.)	Graphic	Symbol	Description of materials Soil type, plasticity or particle characteristic, color, secondary and minor composition	Moisture	Consistency/ Relative density	Structures and additional observations
<u>Method</u> AS auger screwing AD auger drilling TP test pitting W wash boring CT cable tool	<u>Support</u> C casing M mud <u>Water</u> v water level on date shown > water inflow < water outflow	<u>Notes – samples and tests</u> U undisturbed sample D disturbed sample N standard penetration test figure = result N* SPT + sample Nc cone penetrometer		<u>Classification symbols and soil descriptions based on unified soil classification system</u>			<u>Moisture</u> D dry M moist W wet	<u>Consistency/Relative density</u> VS very soft Fb friable S soft VL very loose F firm L loose St stiff MD moderately dense Vsf very stiff D dense H hard VD very dense		



Geologic log of test pit or auger hole

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :ห้วยลำลิ้น อ.งหรา จ.พัทลุง.....						หลุมที่ :HA-4.....		วันที่เริ่มเจาะ :18 มีนาคม 2543.....			
ตำแหน่ง :ลาดเนินด้านหลังโรงไฟฟ้า.....						ตัวอย่างดินที่ :		วันที่แล้วเสร็จ :			
พิกัด :E.....N						เส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะ :75.....ม.ม.		ผู้บันทึก :W.Jesda.....			
ค่าระดับความสูง :110.....ม.รทก.						ความลึกรวม :3.00.....ม.		แผ่นที่ :1.....จาก.....1.....			
Method	Support	Water	Note-sample tests	Depth (m.)	Graphic	Symbol	Description of materials Soil type, plasticity or particle characteristic, color, secondary and minor composition	Moisture	Consistency/ Relative density	Structures and additional observations	
				1.0		SC	(0.00-0.20 m.) : TOP SOIL; gray, dark brown, clay and fine sand mixed, poorly graded, low plasticity.	M	F		
						SC	(0.20-1.00 m.) : CLAYEY SAND ; yellowish brown, medium to very coarse sand and quartz grained, poorly graded, angular to subangular.	M	MD to D		
				2.0		MH	(1.00-3.00 m.) : ELASTIC SILT with SAND ; reddish brown, yellowish brown and light gray, silt mixed by coarse to very coarse sand and rock fragments, poorly graded, angular to subangular.	M to W	D to VD		
3.0											
<u>Method</u>		<u>Support</u>		<u>Notes – samples and tests</u>		<u>Classification symbols and soil descriptions based on unified soil classification system</u>		<u>Moisture</u>		<u>Consistency/Relative density</u>	
AS auger screwing		C casing		U undisturbed sample				D dry		VS very soft Fb friable	
AD auger drilling		M mud		D disturbed sample				M moist		S soft VL very loose	
TP test pitting		<u>Water</u>		N standard penetration test				W wet		F firm L loose	
W wash boring		v water level on		figure = result						St stiff MD moderately dense	
CT cable tool		date shown		N* SPT + sample						Vsf very stiff D dense	
		> water inflow		Nc cone penetrometer						H hard VD very dense	
		< water outflow									



การตอกทดสอบมาตรฐาน
Standard Penetration Test (SPT)

โครงการ : หลุมเจาะที่ :
 ตำแหน่ง : พิกัด : แผ่นที่ : จาก.....
 ความลึกรวม : ม.ระดับน้ำใต้ดิน : ม.ค่าระดับความสูง : ม.รทก.
 วันที่เริ่ม : วันที่แล้วเสร็จ : ชนิดกระบอกเก็บตัวอย่าง :
 ดัมน้ำหนัก : กก. ระยะเวลาตักน้ำหนัก : ชม.
 หัวน้ำข้างเจาะ : ผู้บันทึกข้อมูล:

[illegible]

Note : 1. N' = Blows on sample converted to standard ixe. hammer weight = 140 lb.

2. Relative density of soil : Loose : $N' = 0-10$, Medium : $N' = 10-30$, Dense : $N' = 30-50$, Very dense : $N' \Rightarrow 50$

3. $N' = 50/x$ indicates x cm. penetrated with 50 blows, thus pen. resistance will have to be extrapolated for 30 cm.



กรมทรัพยากรน้ำ

การทดสอบมาตรฐาน Standard Penetration Test (SPT)

โครงการ :โครงการอนุรักษ์ฟื้นฟูคลองผันน้ำ วิทยาลัยเกษตรสวรรค์โลก (อาคารตักน้ำ).....หลุมเจาะที่ :BH-5.....
ตำแหน่ง :ต.ย่านยาว อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย..... พิกัด :47Q 590787 191186.....แผนที่ :1.....จาก.....1.....
ความลึกรวม :15.50.....ม.ระดับน้ำใต้ดิน :ม.ค่าระดับความสูง :50.....ม.รทก.
วันที่เริ่ม :10 กุมภาพันธ์ 2560.....วันที่แล้วเสร็จ :11 กุมภาพันธ์ 2560.....ชนิดกระบอกเก็บตัวอย่าง : ...OD 22" ,ID 1 3/4"....
ตึมน้ำหนัก :63.5.....กก. ระยะยกตึมน้ำหนัก :76.2.....ชม.
หัวหน้าช่างเจาะ : ผู้บันทึกข้อมูล:

Depth below ground surface (m.)	Blow on sample (N)			Blow on sample (N')	Relative density of soil	Penetration Resistance (N'/30 cm.)				Classification and description of material		
						20	40	60	80			
0.55-1.00	5	10	10	20	medium	●					Clay; CL: (0.00-1.00 m.) gray, yellowish brown mottled, slightly to moderately plastic, stiff.	
1.10-1.55	1	1	2	3	loose	●					Silty clay; ML: (1.00-1.40 m.) yellowish brown, moist, slightly plastic.	
1.55-2.00	3	3	3	6	loose	●					Clay; CL: (1.40-1.85 m.) gray, yellowish brown mottled, slightly to moderately plastic, stiff.	
3.00-3.45	3	5	5	10	medium	●					Silty sand; SM: (1.85-3.30 m.) brown to dark brown, very fine to fine sand, subangular to subrounded, loose, wet, some of silt.	
4.00-4.45	3	7	9	16	medium	●					Clay; CL: (3.30-4.20 m.) grayish brown, black mottled, moderately to highly plastic, stiff.	
5.00-5.45	7	10	12	22	medium	●					Clay; CL: (4.20-7.10 m.) yellowish brown, yellowish mottled, moist, moderately to highly plastic, stiff.	
6.00-6.45	7	8	15	23	medium	●					Lateritic soil; GC: (7.10-7.44 m.) yellowish brown and rusty red, black mottled, size of grain 3-5 mm.	
6.45-6.90	5	11	19	30	dense	●					Stop by Laterite Layer. Bottom of Hole 7.44 m.	
7.00-7.44	15	34	50/ 14cm	>84	dense					●		

Note : 1. N' = Blows on sample converted to standard ixe. hammer weight = 140 lb.

2. Relative density of soil : Loose : N' = 0-10 , Meduim : N' = 10-30 , Dense : N' = 30-50 , very dense : N' => 50

3. N' = 50/x indicates x cm. penetrated with 50 blows , thus pen. resistance will have to be extrapolated for 30 cm.



Permeability test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ทดสอบ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : ผู้ทดสอบ : หลุมเจาะที่ :
 ประเภทของดิน : ผู้ตรวจสอบ : ความลึก :ม.

[illegible]



Permeability test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :อ่างเก็บน้ำวังปลา..... วันที่ทดสอบ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง :ต.วังพญา อ.บึงสามพัน จ.เพชรบูรณ์..... ผู้ทดสอบ : หลุมเจาะที่ :DWP-1.....
 ประเภทของดิน : ผู้ตรวจสอบ : ความลึก :ม.

[illegible]



Plate bearing test

โครงการ : วันที่ : พิกัด :
 ตำแหน่ง : น้ำหนักที่ออกแบบ (ตัน/ม.²) : ความลึก/ระดับที่ทดสอบ (ม.) :
 ประเภทของดิน : น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด (ตัน/ม.²) : ผู้ทดสอบ :
 ขนาดแผ่นเหล็กทดสอบ (มม.) : ผู้ตรวจสอบ :

[illegible]



กรมทรัพยากรน้ำ

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน

Plate bearing test

โครงการ :	วันที่ :	พิกัด :
ตำแหน่ง :	น้ำหนักที่ออกแบบ (ตัน/ม.^2) :	ความลึก/ระดับที่ทดสอบ (ม.) :
ประเภทของดิน :	น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด (ตัน/ม.^2) :	ผู้ทดสอบ :
ขนาดแผ่นเหล็กทดสอบ (มม.) :	ผู้ตรวจสอบ :	

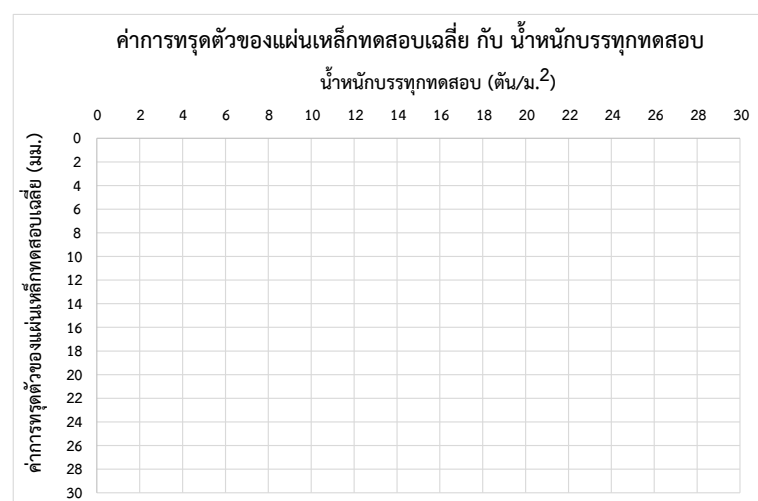
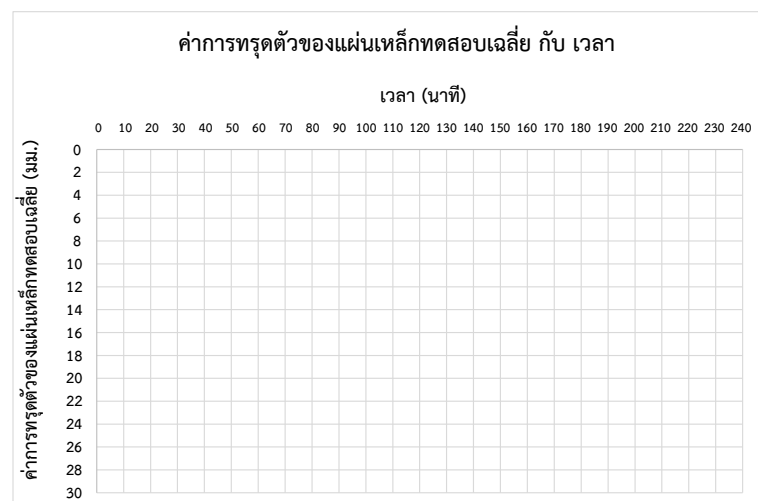
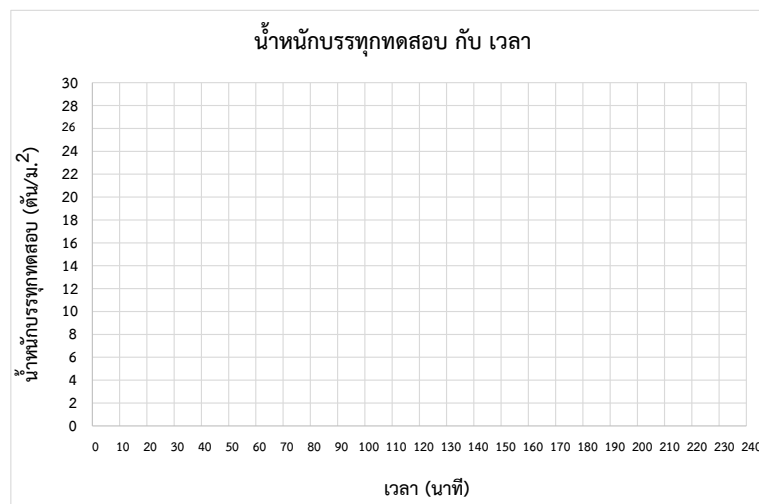




Plate bearing test

โครงการ : วันที่ : พิกัด :
 ตำแหน่ง : น้ำหนักที่ออกแบบ (ตัน/ม.²) : ความลึก/ระดับที่ทดสอบ (ม.) :
 ประเภทของดิน : น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด (ตัน/ม.²) : ผู้ทดสอบ :
 ขนาดแผ่นเหล็กทดสอบ (มม.) : ผู้ตรวจสอบ :

[illegible]

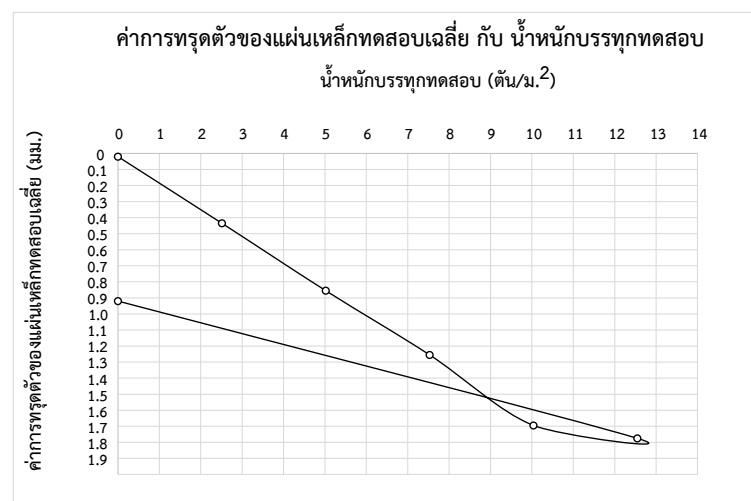
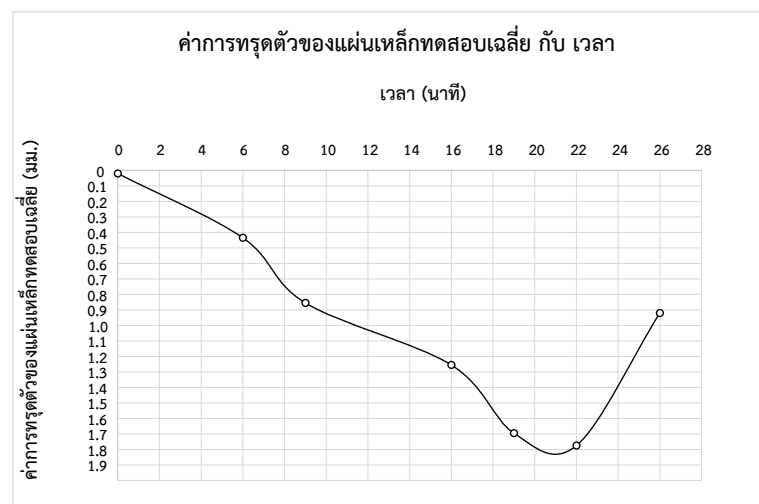
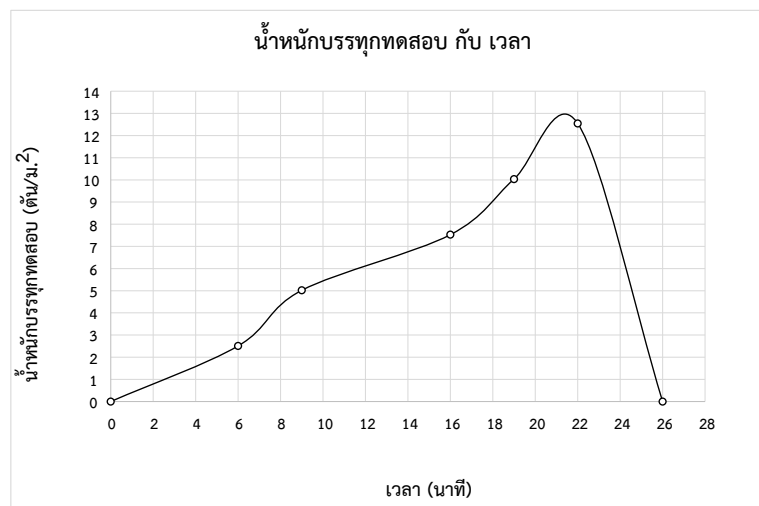


กรมทรัพยากรน้ำ

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน

Plate bearing test

โครงการ :	วันที่ :	พิกัด :
ตำแหน่ง :	น้ำหนักที่ออกแบบ (ตัน/ม. ²) :	ความลึก/ระดับที่ทดสอบ (ม.) :
ประเภทของดิน :	น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด (ตัน/ม. ²) :	ผู้ทดสอบ :
ขนาดแผ่นเหล็กทดสอบ (มม.) :	ผู้ตรวจสอบ :	





การทดสอบการกระจายขนาดผลของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน

Sieve analysis

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ :
ตำแหน่ง : พิกัด : ประเภทของดิน :
น้ำหนักของตัวอย่างดิน (ก.) : หลุมเจาะที่ : ตัวอย่างที่ :
ความลึก (ม.) : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

ตะแกรงขนาด/เบอร์	ช่องเปิดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักตะแกรง (ก.)	น้ำหนักตะแกรง + น้ำหนักดินที่ค้าง (ก.)	น้ำหนักดินที่ค้าง (ก.)	น้ำหนักดิน ที่ค้างตะแกรง (%)	น้ำหนักดิน ที่ค้างตะแกรง สะสม (%)	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง (%)
3/4 in	19						
1/2 in	12.5						
3/8 in	9.5						
4	4.75						
10	2.00						
20	0.84						
40	0.425						
60	0.25						
140	0.15						
200	0.075						
ลาด	-						
น้ำหนักรวม =							

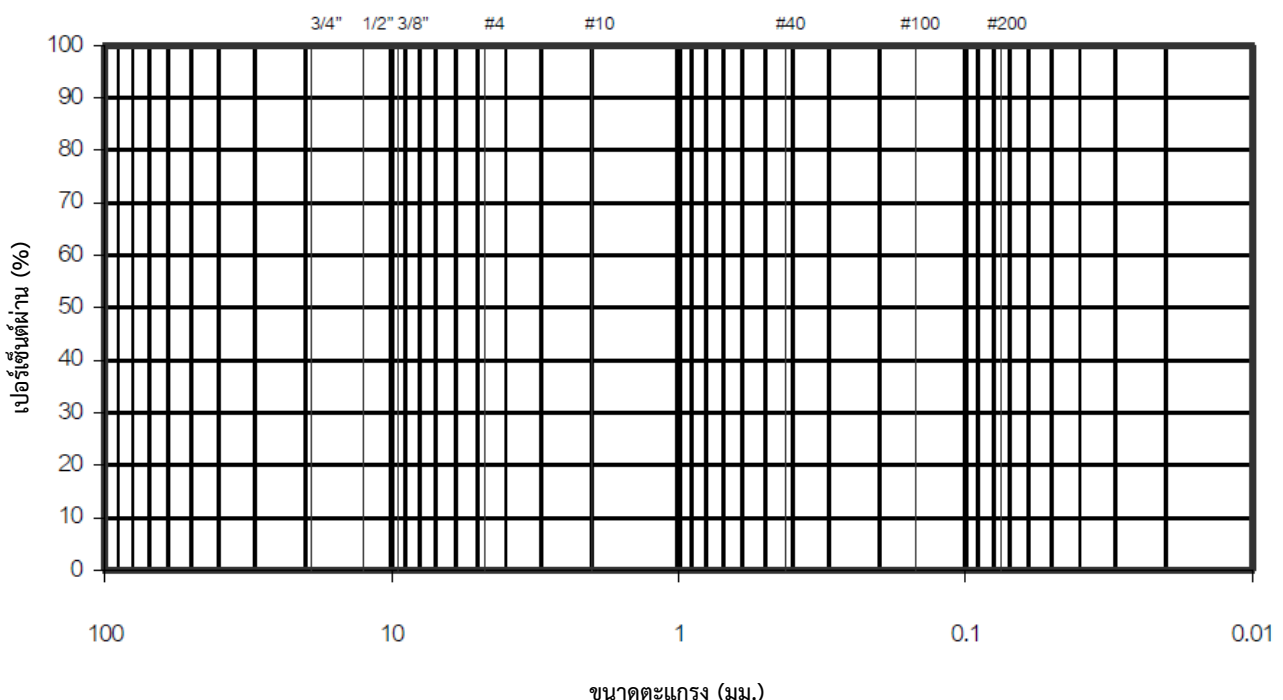
Remark : Criteria of well grade as follow

- For Sand $C_u > 6$ and $C_c = 1 - 3$
- For Gravel $C_u > 4$ and $C_c = 1 - 3$

D60 =	มม.
D30 =	มม.
D10 =	มม.

Coefficient of uniformity , $C_u =$
Coefficient of curvature , $C_c =$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์ผ่าน





การทดสอบหาการกระจายขนาดผลของเม็ดดิน โดยวิธีตะแกรงร่อน

Sieve analysis

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :บ่อเก็บน้ำราชมงคล..... วันที่ : กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547.....

ตำแหน่ง :วิทยาเขตวังไกลกังวล..... พิกัด : ประเภทของดิน :

น้ำหนักของตัวอย่างดิน (ก.) :1007..... หลุมเจาะที่ :1..... ตัวอย่างที่ :1.....

ความลึก (ม.) :1..... ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

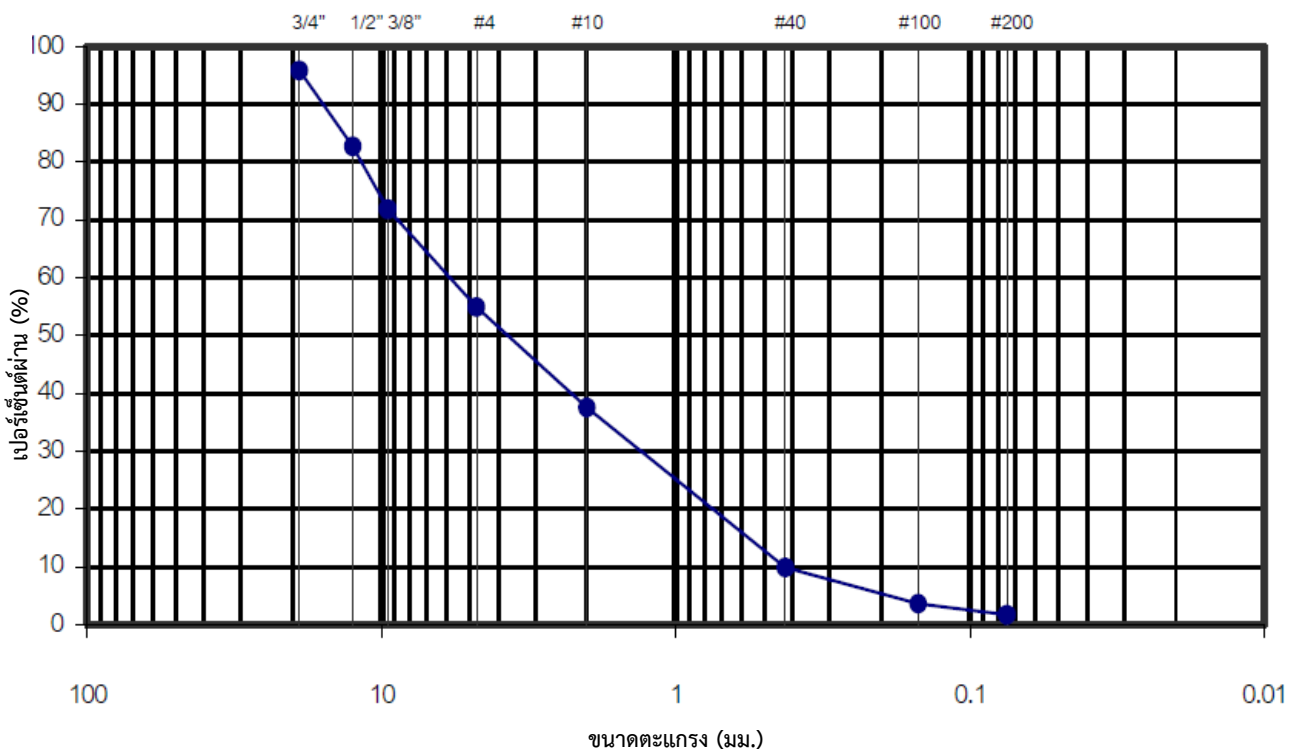
ตะแกรงขนาด/เบอร์	ช่องเปิดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักตะแกรง (ก.)	น้ำหนักตะแกรง + น้ำหนักดินที่ค้าง (ก.)	น้ำหนักดินที่ค้าง (ก.)	น้ำหนักดินที่ค้างตะแกรง (%)	น้ำหนักดินที่ค้างตะแกรง สะสม (%)	ส่วนที่ผ่านตะแกรง (%)
3/4 in	19	660.7	705.6	44.9	4.17	4.17	95.83
1/2 in	12.5	633.3	774.7	141.4	13.13	17.3	82.7
3/8 in	9.5	630.8	747.8	117	10.86	28.16	71.84
4	4.75	616.9	798.9	182	16.9	45.06	54.94
10	2.00	418.3	605.9	187.6	17.42	62.48	37.52
20	0.84						
40	0.425	512.6	810	297.4	27.61	90.09	9.91
60	0.25						
140	0.15	475.9	543.5	67.6	6.28	96.37	3.63
200	0.075	474.3	494.9	20.6	1.91	98.28	1.72
ถัด	-	381.1	399.7	18.6	1.73	100	-0.01
น้ำหนักรวม =							

Remark : Criteria of well grade as follow

- For Sand $C_u > 6$ and $C_c = 1 - 3$
- For Gravel $C_u > 4$ and $C_c = 1 - 3$

D60 =	6.265	มม.
D30 =	1.485	มม.
D10 =	0.430	มม.

Coefficient of uniformity , C_u =	14.57
Coefficient of curvature , C_c =	0.82

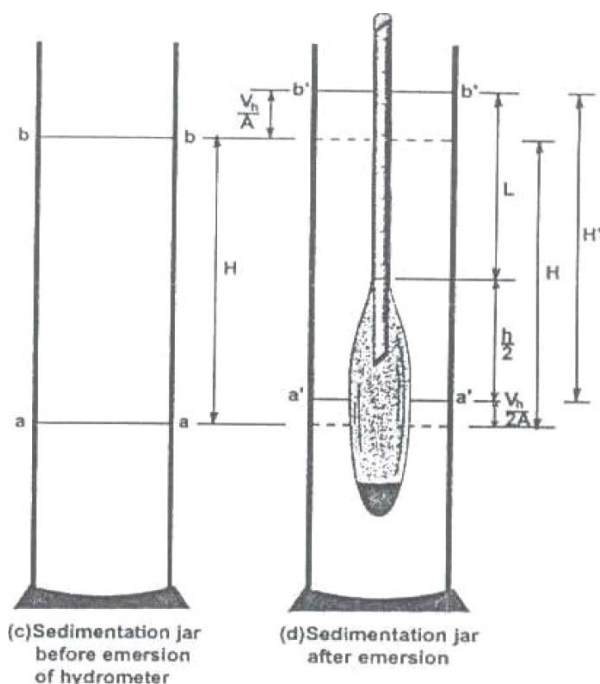




Hydrometer analysis

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :



Type of hydrometer	
Hydrometer no.	
Sedimentary jar diameter (cm)	
Initial reading of graduate (cm ³)	
After hydrometer immersion reading (cm ³)	
Specific gravity of soil (G_s)	
Percent finer than no.200	
Dry weight of sample (g)	
Meniscus correction	
Temperature correction	
Dispersion correction	

Hydrometer reading	Length from tip to hydrometer (L+ h), cm	Hydrometer bulb length (h), cm	Hydrometer reading r
1.0000			
1.0100			
1.0200			
1.0300			

[illegible]

ค่า K สำหรับการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดเม็ดดินโดยไฮโดรมิเตอร์

อุณหภูมิ	Specific gravity of soil particle							
°C	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.0151	0.0148	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0136
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134
18	0.0148	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
19	0.0145	0.0143	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0131
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131	0.0129
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127
22	0.1400	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128	0.0126
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0125	0.0123
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0122
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122	0.0120
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0119
28	0.0130	0.0126	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119	0.0117
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.0120	0.0118	0.0116
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0118	0.0117	0.0115

ค่า Factor a เมื่อเม็ดดินมีค่า Specific gravity ต่างๆ

G _s	2.85	2.80	2.75	2.70	2.65	2.60	2.55	2.50
a	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.04

ค่า Effective depth สำหรับ Hydrometer มาตรฐาน 152H และกระบอกตวงมาตรฐานขนาด 1000 cc (จาก มาตรฐาน ASTM D 422)

Reading	Depth	Reading	Depth	Reading	Depth	Reading	Depth
1	16.1	16	13.7	31	11.2	46	8.8
2	16.0	17	13.5	32	11.1	47	8.6
3	15.8	18	13.3	33	10.9	48	8.4
4	15.6	19	13.2	34	10.7	49	8.3
5	15.5	20	13.0	35	10.6	50	8.1
6	15.3	21	12.9	36	10.4	51	7.9
7	15.2	22	12.7	37	10.2	52	7.8
8	15.0	23	12.5	38	10.1	53	7.6
9	14.8	24	12.4	39	9.9	54	7.4
10	14.7	25	12.2	40	9.7	55	7.3
11	14.5	26	12.0	41	9.6	56	7.1
12	14.3	27	11.9	42	9.4	57	7.0
13	14.2	28	11.7	43	9.2	58	6.8
14	14.0	29	11.5	44	9.1	59	6.6
15	13.8	30	11.4	45	8.9	60	6.5

หมายเหตุ : L1 = 10.5 cm. เมื่อ R = 0 g/litre และ L1 = 2.3 cm. เมื่อ R = 50 g/litre

ค่า Specific gravity viscosity ของน้ำ

อุณหภูมิ °C	G _w	G _w viscosity ของน้ำ (Poises)
4	1	0.01567
16	0.99897	0.01111
17	0.9988	0.01083
18	0.99862	0.01056
19	0.99844	0.0103
20	0.99823	0.01005
21	0.99802	0.00981
22	0.9978	0.00985
23	0.99757	0.00936
24	0.99733	0.00914
25	0.99708	0.00894
26	0.99682	0.00874
27	0.99655	0.00855
28	0.99627	0.00836
29	0.99598	0.00818
30	0.99568	0.00801

ค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อน เนื่องจากอุณหภูมิ, C_t

อุณหภูมิ °C	Corelation factor, C _t
15	- 1.10
16	- 0.90
17	- 0.70
18	- 0.50
19	- 0.30
20	0.00
21	+ 0.20
22	+ 0.40
23	+ 0.70
24	+ 1.00
25	+ 1.30
26	+ 1.65
27	+ 2.00
28	+ 2.50
29	+ 3.05
30	+ 3.80

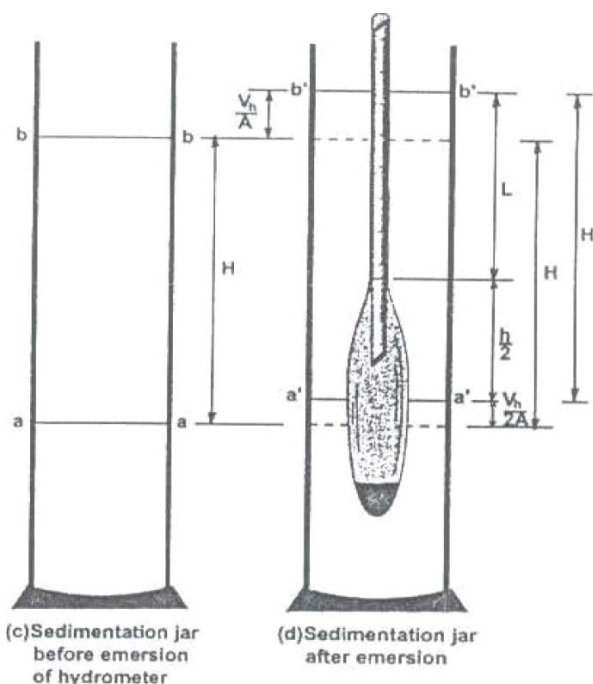


การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์

Hydrometer analysis

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :บ่อเก็บน้ำราชมงคล..... วันที่ :24 กุมภาพันธ์ 2547..... ตัวอย่างที่ :1.....
 ตำแหน่ง :วิทยาเขตวังไกลกังวล..... หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....
 ประเภทของดิน :ผู้ทดสอบ :ผู้ตรวจสอบ :



Type of hydrometer	151H
Hydrometer no.	3496
Sedimentary jar diameter (cm)	5.82
Initial reading of graduate (cm ³)	800
After hydrometer immersion reading (cm ³)	870
Specific gravity of soil (G _s)	2.68
Percent finer than no.200	28.99
Dry weight of sample (g)	50
Meniscus correction	0.5
Temperature correction	0
Dispersion correction	0

Hydrometer reading	Length from tip to hydrometer (L+ h), cm	Hydrometer bulb length (h), cm	Hydrometer reading r
1.0000	24.5	14	1.00
1.0100	21.8	14	1.01
1.0200	19.1	14	1.02
1.0300	16.4	14	1.03

Date	Time	Elapse time (min)	151H r	151H R=1000 (r-1)	152H R	Temp. (°C)	Rc	% Finer	H (cm)	K	D (mm)	%F'
24/4/47	10.1	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
		0.25	1.03	30	-	29	30.5	97.3095	9.265	0.012192	0.074221	28.21
		0.5	1.024	24	-	29	24.5	78.1667	10.885	0.012192	0.056886	22.66
		1	1.0195	19.5	-	29	20	63.8095	12.1	0.012192	0.04241	18.5
		2	1.0158	15.8	-	29	16.3	52.0048	13.099	0.012192	0.031202	15.08
	10.14	2	1.0157	15.7	-	29	16.2	51.6857	11.806	0.012192	0.029622	14.98
	10.19	5	1.012	12	-	29	12.5	39.881	12.805	0.012192	0.019511	11.56
	10.24	10	1.0102	10.02	-	29	10.7	34.1381	13.291	0.012192	0.014056	9.9
	10.34	20	1.009	9	-	29	9.5	30.3095	13.615	0.012192	0.010059	8.79
	10.54	40	1.0082	8.2	-	29	8.7	27.7571	13.831	0.012192	0.007169	8.05
	11.34	80	1.0073	7.3	-	29	7.8	24.8857	14.074	0.012192	0.005114	7.21
	13.14	180	1.0068	6.8	-	29	7.3	23.2905	14.209	0.012192	0.003425	6.75
	14.14	240	1.0066	6.6	-	29	7.1	22.6524	14.263	0.012192	0.002972	6.57
	17.14	420	1.0064	6.4	-	29	6.9	22.0143	14.317	0.012192	0.002251	6.38
25/4/47	9.44	1410	1.0063	6.3	-	29.5	6.8	21.6952	14.344	0.012197	0.001223	6.29
30/4/47	6.32	9858	1.0062	6.2	-	29.5	6.7	21.3762	14.371	0.012197	0.000463	6.2



การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก

Atterberg's limits

กรมทรัพยากรน้ำ

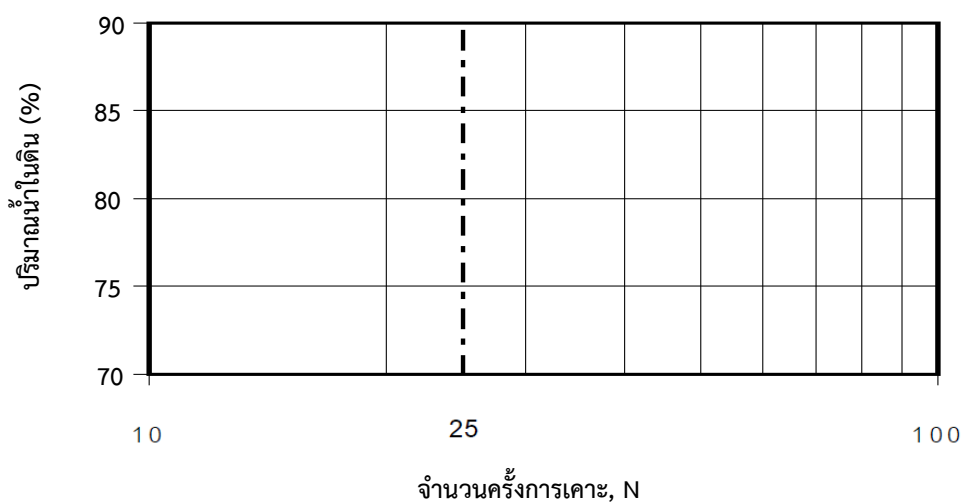
โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

ตารางบันทึกข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดความเหลวของดิน (Liquid Limit determination)

กระป๋องดินหมายเลข	1	2	3	4	5
จำนวนครั้งการเคาะ					
น้ำหนักกระป๋อง+ดินขึ้น (ก.)					
น้ำหนักกระป๋อง+ดินแห้ง (ก.)					
น้ำหนักกระป๋อง (ก.)					
น้ำหนักของน้ำ (ก.)					
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)					
ปริมาณน้ำในดิน (%)					

ตารางบันทึกข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit determination)

กระป๋องดินหมายเลข	1	2	3	4	5
น้ำหนักกระป๋อง+ดินขึ้น (ก.)					
น้ำหนักกระป๋อง+ดินแห้ง (ก.)					
น้ำหนักกระป๋อง (ก.)					
น้ำหนักของน้ำ (ก.)					
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)					
ปริมาณน้ำในดิน (%)					
ขีดจำกัดพลาสติก (%)					





การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก

Atterberg's limits

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :	วันที่ :	ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง :	หลุมเจาะที่ :	ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน :	ผู้ทดสอบ :	ผู้ตรวจสอบ :

ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองหาขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit determination)

การทดลองครั้งที่	1	2	3	4	5
ถ้วยหมายเลข					
น้ำหนักดินขึ้น + ถ้วย (ก.)					
น้ำหนักของถ้วย (ก.)					
น้ำหนักดินแห้ง + ถ้วย (ก.)					
น้ำหนักปรอท + ถ้วย (ก.)					
น้ำหนักปรอท + ถาด (ก.)					
น้ำหนักถาด (ก.)					
น้ำหนักดินขึ้น (ก.)					
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)					
น้ำหนักปรอท (ก.)					
ปริมาตรปรอท (ซม. ³)					
น้ำหนักปรอทหลังกดดิน (ก.)					
ปริมาตรของดินแห้ง (ซม. ³)					
ขีดจำกัดหดตัว (%)					
ขีดจำกัดหดตัวเฉลี่ย (%)					

สรุปผลการทดสอบ

Natural water content :		%	
Liquid Limit (LL) :	%	Plasticity Index (PI) :	Flow Index (FI) : Liquidity
Plastic Limit (PL) :	%	Toughness Index (TI) :	Index (LI) :



การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก

Atterberg's limits

กรมทรัพยากรน้ำ

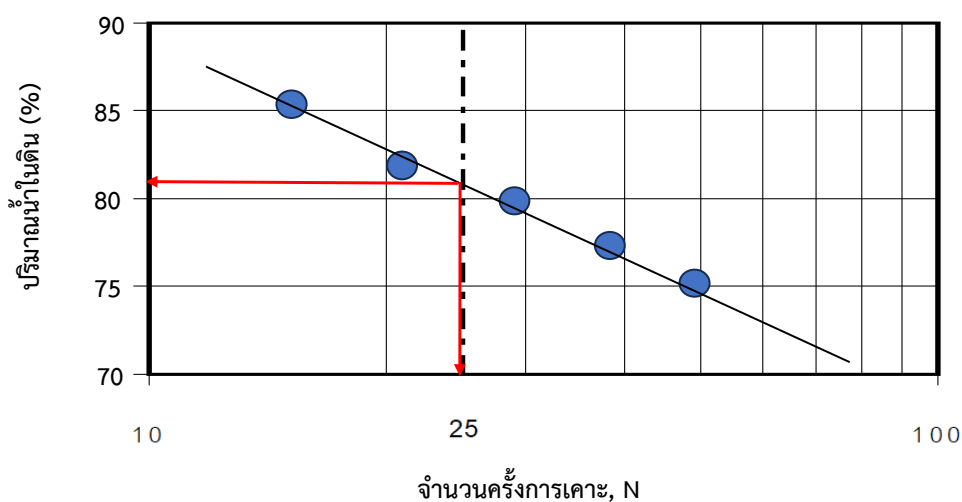
โครงการ :TU Complex..... วันที่ :12-Jul-94..... ตัวอย่างที่ :ST-1.....
ตำแหน่ง :Rangsit..... หลุมเจาะที่ :BH-1..... ความลึก (ม.) :2.00-5.00.....
ประเภทของดิน :Soft clay..... ผู้ทดสอบ :ผู้ตรวจสอบ :

ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองหาขีดจำกัดความเหลวของดิน (Liquid Limit determination)

กระป๋องดินหมายเลข	1	2	3	4	5
จำนวนครั้งการเคาะ	49	40	29	22	16
น้ำหนักกระป๋อง+ดินขึ้น (ก.)	19.47	19.77	21.01	22.72	19.26
น้ำหนักกระป๋อง+ดินแห้ง (ก.)	14.78	14.82	15.39	16.31	14.38
น้ำหนักกระป๋อง (ก.)	8.51	8.43	8.38	8.49	8.64
น้ำหนักของน้ำ (ก.)	4.69	4.95	5.62	6.41	4.88
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)	6.27	6.39	7.01	7.82	5.74
ปริมาณน้ำในดิน (%)	74.80	77.46	80.17	81.97	85.02

ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit determination)

กระป๋องดินหมายเลข	1	2	3	4	5
น้ำหนักกระป๋อง+ดินขึ้น (ก.)	32.5	26.7			
น้ำหนักกระป๋อง+ดินแห้ง (ก.)	27.4	23.1			
น้ำหนักกระป๋อง (ก.)	10.2	10.5			
น้ำหนักของน้ำ (ก.)					
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)					
ปริมาณน้ำในดิน (%)					
ขีดจำกัดพลาสติก (%)					





การทดสอบขีดจำกัดแอตเทอร์เบิร์ก

Atterberg's limits

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :TU Complex..... วันที่ :12-Jul-94..... ตัวอย่างที่ :ST-1.....
ตำแหน่ง :Rangsit..... หลุมเจาะที่ :BH-1..... ความลึก (ม.) :2.00-5.00.....
ประเภทของดิน :Soft clay..... ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองหาขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit determination)

การทดลองครั้งที่	1	2	3	4	5
ถ้วยหมายเลข	C-1	C-2			
น้ำหนักดินขึ้น + ถ้วย (ก.)	35.84	45.45			
น้ำหนักของถ้วย (ก.)	12.73	22.97			
น้ำหนักดินแห้ง + ถ้วย (ก.)	26.31	37.75			
น้ำหนักปรอท + ถ้วย (ก.)	208.68	204.24			
น้ำหนักปรอท + ถาด (ก.)					
น้ำหนักถาด (ก.)					
น้ำหนักดินขึ้น (ก.)					
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)	13.58	14.78			
น้ำหนักปรอท (ก.)	195.95	181.27			
ปริมาตรปรอท (ซม. ³)	14.41	13.33			
น้ำหนักปรอทหลังกดดิน (ก.)	111.89	123.98			
ปริมาตรของดินแห้ง (ซม. ³)					
ขีดจำกัดหดตัว (%)					
ขีดจำกัดหดตัวเฉลี่ย (%)					

สรุปผลการทดสอบ

Natural water content :			%	
Liquid Limit (LL) :	81	%	Plasticity Index (PI) :	51.89
Plastic Limit (PL) :	29.11	%	Toughness Index (TI) :	Flow Index (FI) : Liquidity Index (LI) :



การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

Specific gravity test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

ข้อมูลการสอบเทียบ

ครั้งที่	น้ำหนัก ขวดพลาสติก+น้ำ (ก.)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

น้ำหนักขวดพลาสติก+ น้ำ (ก.)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ข้อมูลการทดสอบ

การทดสอบครั้งที่	1	2	3	4	5	6
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						
2. น้ำหนักขวดพลาสติก+น้ำ (ก.)						
3. น้ำหนักขวดพลาสติก+น้ำ+ดิน (ก.)						
4. หมายเลขภาชนะ						
5. น้ำหนักดินแห้ง+ภาชนะ (ก.)						
6. น้ำหนักภาชนะ (ก.)						
7. น้ำหนักดินแห้ง (ก.)						
ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (G_s)						
ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเฉลี่ย						



การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

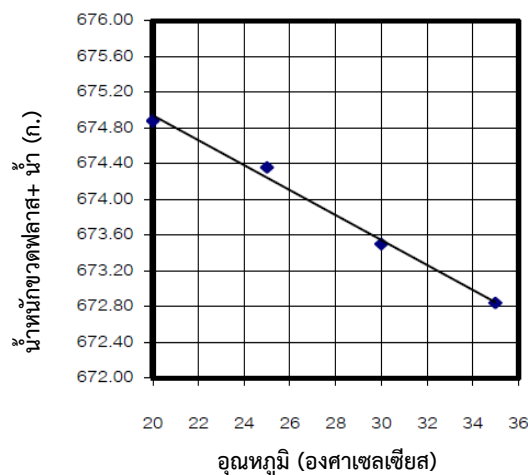
Specific gravity test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :Test..... วันที่ :11/12/2547..... ตัวอย่างที่ :1.....
ตำแหน่ง :kkw..... หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.6.....
ประเภทของดิน :Silty clay..... ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

ข้อมูลการสอบเทียบ

ครั้งที่	น้ำหนัก ขวดพลาสติก+น้ำ (ก.)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	672.84	35
2	673.5	30
3	674.36	25
4	674.88	20



ข้อมูลการทดสอบ

การทดสอบครั้งที่	1	2	3	4	5	6
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30	28				
2. น้ำหนักขวดพลาสติก+น้ำ (ก.)	673.54	673.82				
3. น้ำหนักขวดพลาสติก+น้ำ+ดิน (ก.)	705.86	706.5				
4. หมายเลขภาชนะ	A1	A2				
5. น้ำหนักดินแห้ง+ภาชนะ (ก.)	313.8	289.4				
6. น้ำหนักภาชนะ (ก.)	263.5	238.5				
7. น้ำหนักดินแห้ง (ก.)	50.3	50.9				
ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (G_s)	2.787	2.783				
ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเฉลี่ย	2.785					



การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์

Relative density test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

Primary Input Parameter

ความสูงโมล (H)		ซม.
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในโมล (ID)		ซม.
พื้นที่หน้าตัดภายในโมล (a)		ซม. ²
ปริมาตรโมล ($V_C = H * a$)		ซม. ³
น้ำหนักโมล (W_1)		ก.
ความหนาแน่นแผ่นน้ำหนัก (T_p)		ซม.
ความละเอียดของ Dial gauge (D_p) (1 div./0.01 mm)		

Minimum Density

น้ำหนักดินแห้ง+น้ำหนักโมล (W_{dmin})		ก.
น้ำหนักดินแห้ง (W_S)		ก.
ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ($\rho_{dmin} = (W_S/V_S)*10^3$)		กก./ม. ³

Maximum Density (Dry Method)

R_{i1}		div
R_{f1}		div
R_{i2}		div
R_{f2}		div
น้ำหนักดินแห้ง + โมล (W_{dmax})		ก.
$(R_{i1} - R_{f1}) * D_p$		มม.
$(R_{i2} - R_{f2}) * D_p$		มม.
Average ($R_i - R_f$)		ซม.
$H_S = H - T_p - \text{Average } (R_i - R_f)$		ซม.
$V_S = H_S * a$		ซม. ³
$W_S = W_{dmax} - W_1$		ก.
ความหนาแน่นสูงสุด ($\rho_d = (W_S/V_S)*10^3$)		กก./ม. ³

Maximum Density (Wet Method)

R_{i1}		div
R_{f1}		div
R_{i2}		div
R_{f2}		div
น้ำหนักดินขึ้น + โมล (W_{wmax})		ก.
$(R_{i1} - R_{f1}) * D_p$		มม.
$(R_{i2} - R_{f2}) * D_p$		มม.
Average ($R_i - R_f$)		ซม.
$H_S = H - T_p - \text{Average } (R_i - R_f)$		ซม.
$V_S = H_S * a$		ซม. ³
$W_S = W_{wmax} - W_1$		ก.
ความหนาแน่นสูงสุด ($\rho_w = (W_S/V_S)*10^3$)		กก./ม. ³

Maximum Dry Density (Wet Method)

น้ำหนักกระบอก+ดินขึ้น (W_{cw})		ก.
น้ำหนักกระบอก+ดินแห้ง (W_{cd})		ก.
น้ำหนักกระบอก (W_c)		ก.
น้ำหนักน้ำ ($W_w = W_{cw} - W_{cd}$)		ก.
น้ำหนักดินแห้ง ($W_S = W_{cd} - W_a$)		ก.
ปริมาณน้ำในดิน ($W = (W_w/W_S)*100$)		%
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\rho_{dmax} = \rho_w / (1 + (W/100))$)		กก./ม. ³

Relative Density (Dr)

ความหนาแน่นในสนาม (ρ_d)		กก./ม. ³
ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด (ρ_{dmin})		กก./ม. ³
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ρ_{dmax}) จาก Wet Method		กก./ม. ³

$Dr = \frac{\rho_{dmax} (\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d (\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} * 100$		%
--	--	---



การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์

Relative density test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : นายทองเด่น สุภาพ นายปิยะ ศิริปัน....ผู้ตรวจสอบ :

Primary Input Parameter

ความสูงโมล (H)	15.52	ซม.
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในโมล (ID)	15.24	ซม.
พื้นที่หน้าตัดภายในโมล (a)	182.41	ซม. ²
ปริมาตรโมล ($V_C = H * a$)	2,831.00	ซม. ³
น้ำหนักโมล (W_1)	3,550.00	ก.
ความหนาแน่นแผ่นน้ำหนัก (T_p)	1.27	ซม.
ความละเอียดของ Dial gauge (D_p) (1 div./0.01 mm)	0.01	

Minimum Density

น้ำหนักดินแห้ง+น้ำหนักโมล (W_{dmin})	7,958.50	ก.
น้ำหนักดินแห้ง (W_S)	4,408.50	ก.
ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ($\rho_{dmin} = (W_S/V_S)*10^3$)	1,557.22	กก./ม. ³

Maximum Density (Dry Method)

R_{i1}	4,740.00	div
R_{f1}	2,188.00	div
R_{i2}	4,749.00	div
R_{f2}	2,381.00	div
น้ำหนักดินแห้ง + โมล (W_{dmax})	7,711.00	ก.
$(R_{i1} - R_{f1}) * D_p$	25.52	มม.
$(R_{i2} - R_{f2}) * D_p$	23.68	มม.
Average ($R_i - R_f$)	2.46	ซม.
$H_S = H - T_p - \text{Average } (R_i - R_f)$	11.79	ซม.
$V_S = H_S * a$	2,150.61	ซม. ³
$W_S = W_{dmax} - W_1$	4,161.00	ก.
ความหนาแน่นสูงสุด ($\rho_d = (W_S/V_S)*10^3$)	1,934.80	กก./ม. ³

Maximum Density (Wet Method)

R_{i1}	4,652.00	div
R_{f1}	2,870.00	div
R_{i2}	4,646.00	div
R_{f2}	3,441.00	div
น้ำหนักดินขึ้น + โมล (W_{wmax})	8,589.00	ก.
$(R_{i1} - R_{f1}) * D_p$	17.82	มม.
$(R_{i2} - R_{f2}) * D_p$	12.05	มม.
Average ($R_i - R_f$)	1.49	ซม.
$H_S = H - T_p - \text{Average } (R_i - R_f)$	12.76	ซม.
$V_S = H_S * a$	2,327.55	ซม. ³
$W_S = W_{wmax} - W_1$	5,039.00	ก.
ความหนาแน่นสูงสุด ($\rho_w = (W_S/V_S)*10^3$)	2,165	กก./ม. ³

Maximum Dry Density (Wet Method)

น้ำหนักกระบอก+ดินขึ้น (W_{cw})	398.30	ก.
น้ำหนักกระบอก+ดินแห้ง (W_{cd})	354.70	ก.
น้ำหนักกระบอก (W_c)	43.76	ก.
น้ำหนักน้ำ ($W_w = W_{cw} - W_{cd}$)	43.60	ก.
น้ำหนักดินแห้ง ($W_S = W_{cd} - W_a$)	310.94	ก.
ปริมาณน้ำในดิน ($W = (W_w/W_S)*100$)	14.02	%
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\rho_{dmax} = \rho_w / (1 + (W/100))$)	1,898.79	กก./ม. ³

Relative Density (Dr)

ความหนาแน่นในสนาม (ρ_d)	1,650.00	กก./ม. ³
ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด (ρ_{dmin})	1,557.22	กก./ม. ³
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ρ_{dmax}) จาก Wet Method	1,898.79	กก./ม. ³

$Dr = \left(\frac{\rho_{dmax} (\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d (\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} * 100 \right)$	31.26	%
---	-------	---



กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

สำหรับโครงสร้างที่มีด้านแคบที่สุด 6 - 12.5 เซนติเมตร											
ประเภท	ขนาดตะแกรง		น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	เหล็กทรงกลม		ทดสอบประเภท	น้ำหนัก ก่อน ทดสอบ (กรัม)	วัสดุหลังทดสอบ			
	ผ่าน	ค้าง		(ลูก)	(กรัม)			น้ำหนัก 100 รอบ (กรัม)	% สึกกร่อน 100 รอบ	น้ำหนัก 500 รอบ (กรัม)	% สึกกร่อน 500 รอบ
A	1½"	1"	1,250	12	5,000 ±25		5,000				
	1"	¾"	1,250								
	¾"	½"	1,250								
	½"	⅜"	1,250								
B	¾"	½"	2,500	11	4,586 ±25		5,000				
	½"	⅜"	2,500								
C	⅜"	¼"	2,500	8	3,330 ±25		5,000				
	¼"	เบอร์ 4	2,500								
D	เบอร์ 4	เบอร์ 8	5,000	6	2500 ±25		5,000				
สำหรับงานโครงสร้างที่มีด้านแคบที่สุด 15 เซนติเมตร หรือมากกว่าขึ้นไป											
ประเภท	ขนาดตะแกรง		น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	เหล็กทรงกลม		ทดสอบประเภท	น้ำหนัก ก่อน ทดสอบ (กรัม)	วัสดุหลังทดสอบ			
E	3"	2½"	2,500	12	5,000 ±25		10,000				
	2½"	2"	2,500								
	2"	1½"	5,000								
F	2"	1½"	5,000	12	5,000 ±25		10,000				
	1½"	1"	5,000								
G	1½"	1"	5,000	12	5,000 ±25		10,000				
	1"	¾"	5,000								

หมายเหตุ : เมื่อทดสอบได้จำนวนรอบที่ต้องการแล้ว ร่อนวัสดุนำค่าน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12 มาคำนวณ

ร้อยละความสึกกร่อน = (น้ำหนักก่อนทดสอบ - น้ำหนักหลังทดสอบ) × 100 / น้ำหนักก่อนทดสอบ



การทดสอบความสึกกร่อน Los Angeles Abrasion test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :ก่อสร้างถนนคอนกรีตเสริมเหล็กสายบ้านศรี..... วันที่ : ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง :ต.สำโรง อ.โมนไทย จ.นครราชสีมา..... หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน :ผู้ทดสอบ :กรมทางหลวงชนบท.....ผู้ตรวจสอบ : ..กรมทางหลวงชนบท.

สำหรับโครงสร้างที่มีด้านแคบที่สุด 6 - 12.5 เซนติเมตร											
ประเภท	ขนาดตะแกรง		น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	เหล็กทรงกลม		ทดสอบประเภท	น้ำหนัก ก่อน ทดสอบ (กรัม)	วัสดุหลังทดสอบ			
	ผ่าน	ค้าง		(ลูก)	(กรัม)			น้ำหนัก 100 รอบ (กรัม)	% สึกกร่อน 100 รอบ	น้ำหนัก 500 รอบ (กรัม)	% สึกกร่อน 500 รอบ
A	1½”	1”	1,250	12	5,000 ±25		5,000				
	1”	¾”	1,250								
	¾”	½”	1,250								
	½”	⅜”	1,250								
B	¾”	½”	2,500	11	4,586 ±25		5,000	4,750	5	3,752	24.96
	½”	⅜”	2,500								
C	⅜”	¼”	2,500	8	3,330 ±25		5,000				
	¼”	เบอร์ 4	2,500								
D	เบอร์ 4	เบอร์ 8	5,000	6	2500 ±25		5,000				
สำหรับงานโครงสร้างที่มีด้านแคบที่สุด 15 เซนติเมตร หรือมากกว่าขึ้นไป											
ประเภท	ขนาดตะแกรง		น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	เหล็กทรงกลม		ทดสอบประเภท	น้ำหนัก ก่อน ทดสอบ (กรัม)	วัสดุหลังทดสอบ			
E	3”	2½”	2,500	12	5,000 ±25		10,000				
	2½”	2”	2,500								
	2”	1½”	5,000								
F	2”	1½”	5,000	12	5,000 ±25		10,000				
	1½”	1”	5,000								
G	1½”	1”	5,000	12	5,000 ±25		10,000				
	1”	¾”	5,000								
หมายเหตุ : เมื่อทดสอบได้จำนวนรอบที่ต้องการแล้ว ร่อนวัสดุนำค่าน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12 มาคำนวณ											
ร้อยละความสึกกร่อน = (น้ำหนักก่อนทดสอบ - น้ำหนักหลังทดสอบ) × 100 / น้ำหนักก่อนทดสอบ											

[illegible]

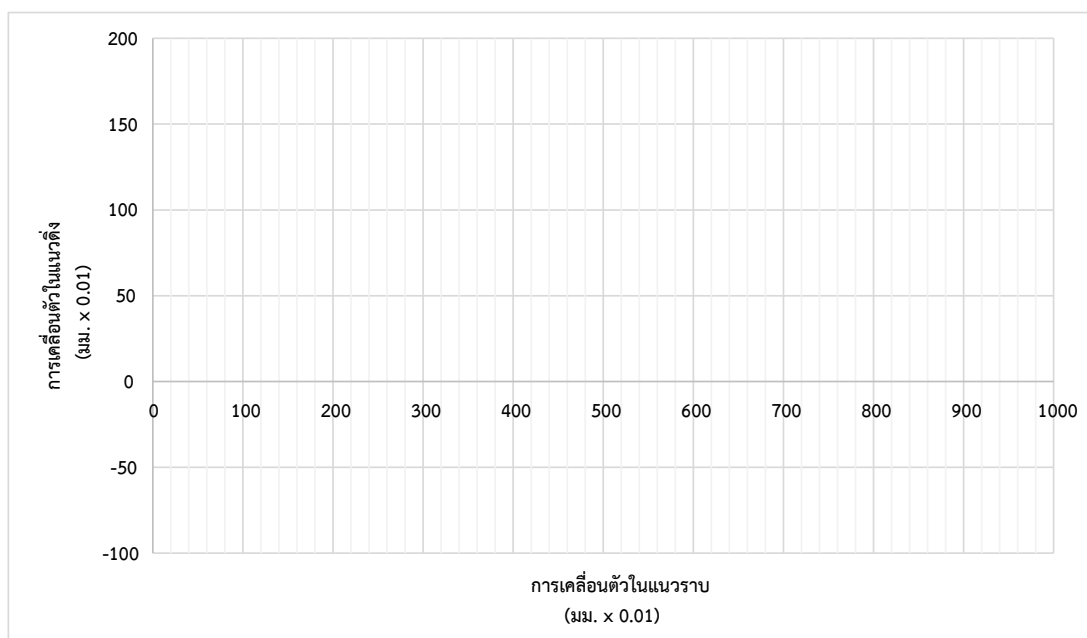
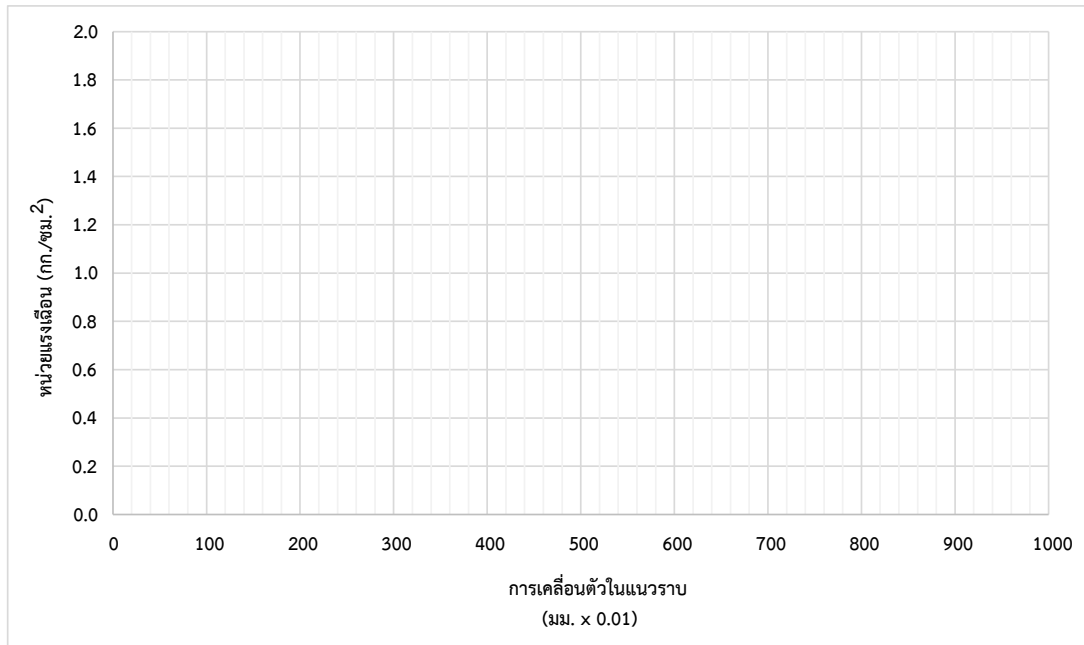


การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

Direct shear test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :





การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

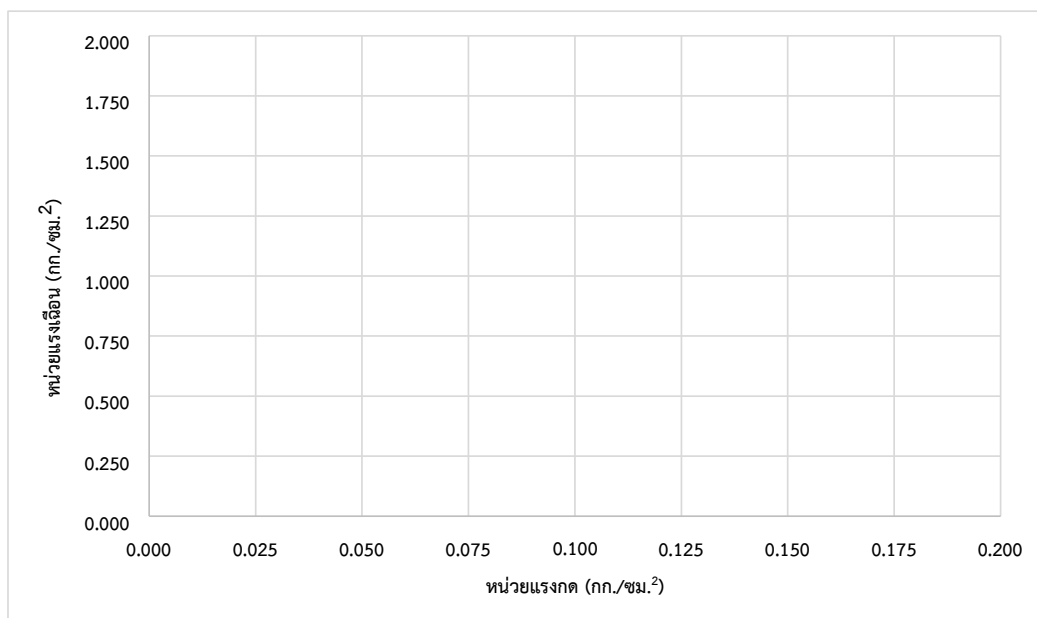
Direct shear test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :

Result Data

การทดสอบครั้งที่	ปริมาณน้ำในดิน (%)	หน่วยแรงกด (กก./ซม. ²)	หน่วยแรงเฉือน (กก./ซม. ²)



แรงยึดเกาะ (c) =

มุมเสียดทานภายใน (ϕ) =



การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

Direct shear test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :ก่อสร้างหอเก็บน้ำถ้ำสูง..... วันที่ :14/12/2547..... ตัวอย่างที่ :1.....

ตำแหน่ง :วิทยาเขตวังไกลกังวล..... หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....

ประเภทของดิน :Sandy Clay..... ผู้ทดสอบ :นายนิพนธ์ บุญรุ่ง..... ผู้ตรวจสอบ :นายชูศักดิ์ ศิริรัตน์..

วงแหวนปรับเทียบหมายเลข : 12055	ค่าคงที่วงแหวนปรับเทียบ (K) : 0.3862 kg/Div	ชนิดการทดสอบ : CU Test
--------------------------------	---	------------------------

Sample Data

ขนาดแบบแรงเฉือนเหลี่ยม (ซม.)	-	ภาชนะหมายเลข	C1	C2	C3
ขนาดแบบแรงเฉือนกลม (ซม.)	6.04	น้ำหนักภาชนะ (ก.)	13.8	20.1	20.8
ความสูง (ซม.)	1.94	น้ำหนักดินขึ้น+ภาชนะ (ก.)	149.5	20.8	156.9
น้ำหนักกล่องแรงเฉือน (ก.)	2100.00	น้ำหนักดินแห้ง+ภาชนะ (ก.)	95.6	102.5	102.4
น้ำหนักกล่องแรงเฉือน+ดิน (ก.)	2230.22	น้ำหนักกวด (กก.)	0.912	1.832	3.655
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)	28.65	หน่วยน้ำหนักกวด (กก./ซม. ²)	0.03	0.06	0.13
ปริมาตร (ซม. ³)	55.58	น้ำหนักน้ำ (ก.)	53.9	52.8	54.5
น้ำหนักดิน (ก.)	130.22	น้ำหนักดินแห้ง (ก.)	81.8	82.4	81.6
ความหนาแน่นเปียก (ตัน/ม. ³)	2.34	ปริมาณน้ำในดิน (%)	65.89	64.08	66.79
ความหนาแน่นแห้ง (ตัน/ม. ³)	1.41	ปริมาณน้ำในดินเฉลี่ย (%)	65.59		

Penetration Data

การเคลื่อนตัว ในแนวราบ (x 0.01)	การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (x 0.01)			ค่าที่อ่านจาก Proving Ring (Div)			แรงเฉือน (P) (กก.)			หน่วยแรงเฉือน S=P/A (กก./ซม. ²)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sample No.												
10	56	58	136	5	9	10	1.93	3.48	3.86	0.07	0.12	0.13
20	58	61	140	7	15	17	2.7	5.79	6.57	0.09	0.20	0.23
30	61.5	64	143	8	18	23	3.09	6.95	8.88	0.11	0.24	0.31
40	64	66	148	9	22	26	3.48	8.5	10.04	0.12	0.30	0.35
50	67	68	151	10.5	25	31	4.06	9.66	11.97	0.14	0.34	0.42
60	69	70	155	11.5	26	35	4.44	10.04	13.13	0.15	0.35	0.46
70	70	72	157	12	26	38	4.63	10.04	14.68	0.16	0.35	0.51
80	71	73.5	160	12.5	28	41	4.83	10.81	15.83	0.17	0.38	0.55
90	73	75	162	13	30	45	5.02	11.59	17.38	0.18	0.40	0.61
100	74	76	165	13.5	32	47	5.21	12.36	18.15	0.18	0.43	0.63
110	75	77	166	14	33	51	5.41	12.74	19.17	0.19	0.44	0.67
120	76	78	168	15.5	35	54	5.6	13.52	20.85	0.20	0.47	0.73
130	77	78	170	15	36	57	5.79	13.9	22.01	0.20	0.49	0.77
140	78	79	172	15.5	37	60	5.99	14.29	23.17	0.21	0.50	0.81

Penetration Data

การเคลื่อนตัว ในแนวราบ (x 0.01)	การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (x 0.01)			ค่าที่อ่านจาก Proving Ring (Div)			แรงเฉือน (P) (กก.)			หน่วยแรงเฉือน S=P/A (กก./ซม. ²)		
Sample No.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
150	78.5	79.5	173	16	38	61	6.18	14.68	23.56	0.22	0.51	0.82
160	79	80	174	16.5	39	63	6.37	15.06	24.33	0.22	0.53	0.85
170	80	82	175.5	17	39.5	68	6.57	15.25	25.49	0.23	0.53	0.89
180	80.5	83	176	17	40	71	6.57	15.45	26.26	0.23	0.54	0.92
190	84	83.5	178	17.5	41	74	6.76	15.83	27.42	0.24	0.55	0.96
200	84	84	178	18	42	76	6.95	16.22	28.58	0.24	0.57	1.00
210	84.5	85	179	18.5	43	78	7.14	16.61	29.35	0.25	0.58	1.02
220	82	86	180	18.5	44	81	7.14	16.99	30.12	0.25	0.59	1.05
230	82.5	86	181	19	45	83	7.34	17.38	31.28	0.26	0.61	1.09
240	82.5	86	182	19	45	85	7.34	17.38	32.05	0.26	0.61	1.12
250	83	86.5	183	19	46	87	7.34	17.77	32.83	0.26	0.62	1.15
260	83	86.5	183.5	19	47	88	7.34	18.15	33.60	0.26	0.63	1.17
270	83	87	184	19.5	47.5	90	7.53	18.34	33.99	0.26	0.64	1.19
280	83	87	185	20	48	92	7.72	18.54	34.76	0.27	0.65	1.21
290	83.5	87.5	185.5	20	49	94	7.72	18.92	35.53	0.27	0.66	1.24
300	83.5	87.5	186	20.5	50	95	7.92	19.31	36.3	0.28	0.67	1.27
310	84	87.5	187	21	50	96.5	8.11	19.31	36.69	0.28	0.67	1.28
320	84	87.5	187.5	21	51	98	8.11	19.7	37.27	0.28	0.69	1.30
330	84	87.5	188	21.5	51	100	8.30	19.7	37.85	0.29	0.69	1.32
340	84	87.5	188	21.5	51	101	8.30	19.7	38.62	0.29	0.69	1.35
350	84	87.5	189	22	51.5	103	8.50	19.89	39.01	0.30	0.69	1.36
360	84	87.5	189	22	52	104	8.50	20.08	39.78	0.30	0.70	1.39
370	84	87.5	190	22	52	106	8.50	20.08	40.16	0.30	0.70	1.40
380	84	87.5	190	22.5	52.5	107	8.69	20.08	40.94	0.30	0.70	1.43
390	84	87	190.5	22.5	53	108	8.69	20.47	41.32	0.30	0.71	1.44
400	84	87	191	22.5	53	109	8.69	20.47	41.71	0.30	0.71	1.46
410	84	86.5	191	23	53	110	8.88	20.47	42.1	0.31	0.71	1.47
420	84	86.5	191	23	53	111	8.88	20.47	42.48	0.31	0.71	1.48
430	84.5	86	192	23	53	111.5	8.88	20.47	42.87	0.31	0.71	1.50
440	84.5	86	192	23	53.5	112	8.88	20.66	43.06	0.31	0.72	1.50
450	84.5	86	192	23	53.5	112	8.88	20.66	43.25	0.31	0.72	1.51
460	84.5	86	192	23	54	113	8.88	20.85	43.64	0.31	0.73	1.52
470	84.5	86	192	23	54.5	113	8.88	21.05	43.64	0.31	0.73	1.52
480	84.5	86	192.5	23.5	55	113	9.08	21.24	43.64	0.32	0.74	1.52
490	84.5	86	193	23.5	55	113.5	9.08	21.24	43.83	0.32	0.74	1.53
500	84.5	86	193	23.5	55	115	9.08	21.24	44.41	0.32	0.74	1.55
510	84.5	85.5	193	23.5	55.5	116	9.08	21.43	44.8	0.32	0.75	1.56

Penetration Data

การเคลื่อนตัว ในแนวราบ (x 0.01)	การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (x 0.01)			ค่าที่อ่านจาก Proving Ring (Div)			แรงเฉือน (P) (กก.)			หน่วยแรงเฉือน S=P/A (กก./ซม. ²)		
Sample No.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
520	84.5	85.5	193	24	56	116.5	9.27	21.63	44.99	0.32	0.75	1.57
530	84.5	85.5	193	24	56	117	9.27	21.63	45.19	0.32	0.75	1.58
540	84.5	85.5	193	24	56.5	117	9.27	21.82	45.19	0.32	0.76	1.58
550	84.5	85	193.5	24.5	57	117	9.46	22.01	45.19	0.33	0.77	1.58
560	84.5	85	193.5	24.5	57	117	9.46	22.01	45.19	0.33	0.77	1.58
570	84.5	85	193.5	24.5	57.5	117	9.46	22.21	45.19	0.33	0.78	1.58
580	84.5	85	193.5	24.5	58	117	9.46	22.4	45.19	0.33	0.78	1.58
590	84.5	85	193.5	24.5	58.5	117.5	9.46	22.59	45.38	0.33	0.79	1.58
600	84.5	85	193.5	25	59	117.5	9.66	22.79	45.38	0.34	0.80	1.58
610	84.5	84	194	25	59	118	9.66	22.79	45.57	0.34	0.80	1.59
620	84.5	84	194	25	59.5	118	9.66	22.98	45.57	0.34	0.80	1.59
630	84.5	84	194	25	59.5	118.5	9.66	22.98	45.75	0.34	0.80	1.60
640	84.5	84	194	25	60	119	9.66	23.17	45.96	0.34	0.81	1.60
650	84.5	84	194	25	60	120	9.66	23.17	46.34	0.34	0.81	1.62
660	84.5	84	194	25	61	120	9.66	23.56	46.34	0.34	0.82	1.62
670	84.5	84	194	25	61	120	9.66	23.56	46.34	0.34	0.82	1.62
680	84.5	84	194	25	61	120	9.66	23.56	46.34	0.34	0.82	1.62
690	84.5	84	194	25.5	61	120	9.85	23.56	46.34	0.34	0.82	1.62
700	84.5	84	194	25.5	61	120	9.85	23.56	46.34	0.34	0.82	1.62
710	84.5	84	194	25.5	61	120.5	9.85	23.56	46.54	0.34	0.82	1.62
720	84.5	84	194	25.5	61	121	9.85	23.56	46.73	0.34	0.82	1.63
730	84.5	84	194	25.5	61	121.5	9.85	23.56	46.92	0.34	0.82	1.64
740	84.5	84	194	25.5	61	121.5	9.85	23.56	46.92	0.34	0.82	1.64
750	84.5	84	194.5	25.5	61	121.5	9.85	23.56	46.92	0.34	0.82	1.64
760	85	84	194.5	25.5	61	121.5	9.85	23.56	46.92	0.34	0.82	1.64
770	85	84	194.5	25.5	61	121.5	9.85	23.56	46.92	0.34	0.82	1.64
780	85	84	195	25.5	61	121.5	9.85	23.56	46.92	0.34	0.82	1.64
790	85	84	195	26	61	121.5	10.04	23.56	46.92	0.35	0.82	1.64
800	85	84	195	26	61.5	121.5	10.04	23.75	46.92	0.35	0.83	1.64
810	85	83.5	195	26	62	121.5	10.04	23.94	46.92	0.35	0.84	1.64
820	85	83.5	195.5	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
830	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
840	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
850	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
860	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
870	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
880	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
890	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64
900	85	83	196	26	62	122	10.04	23.94	47.12	0.35	0.84	1.64

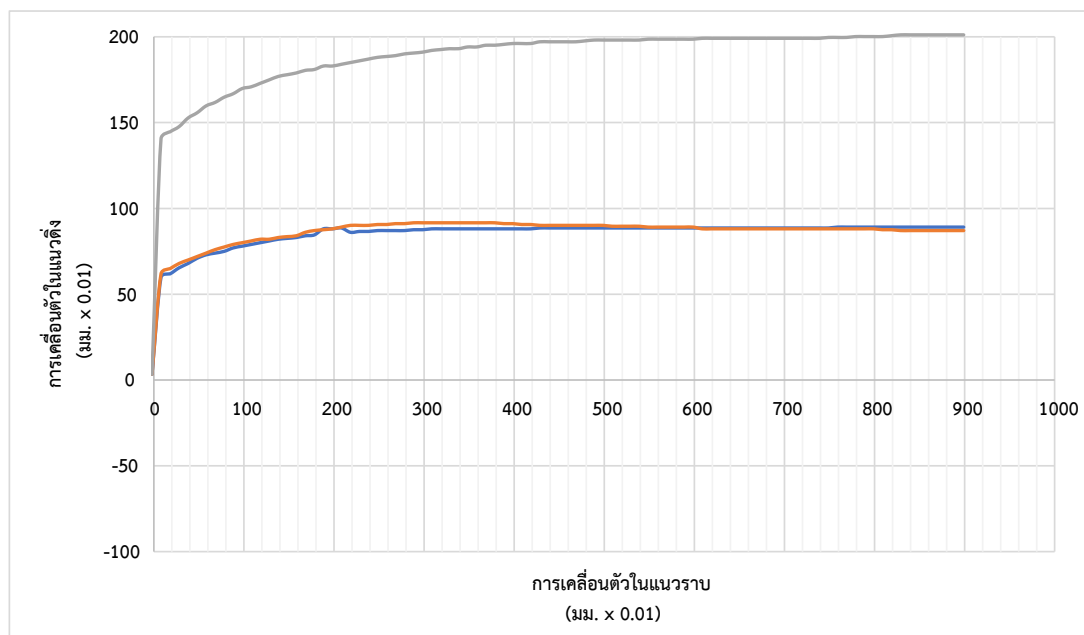
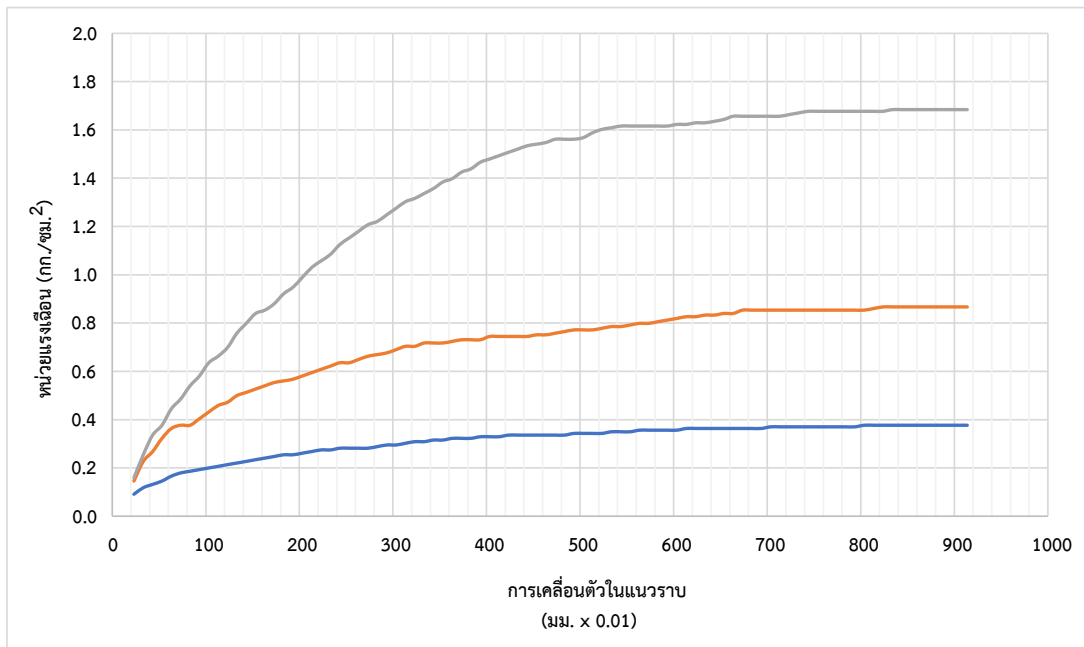


การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

Direct shear test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :ก่อสร้างหอเก็บน้ำดังสูง..... วันที่ :14/12/2547..... ตัวอย่างที่ :1.....
ตำแหน่ง :วิทยาเขตวังไกลกังวล..... หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....
ประเภทของดิน :Sandy Clay..... ผู้ทดสอบ :นายนิพนธ์ บุญรุ่ง..... ผู้ตรวจสอบ :นายชูศักดิ์ ศีรีรัตน์..





การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

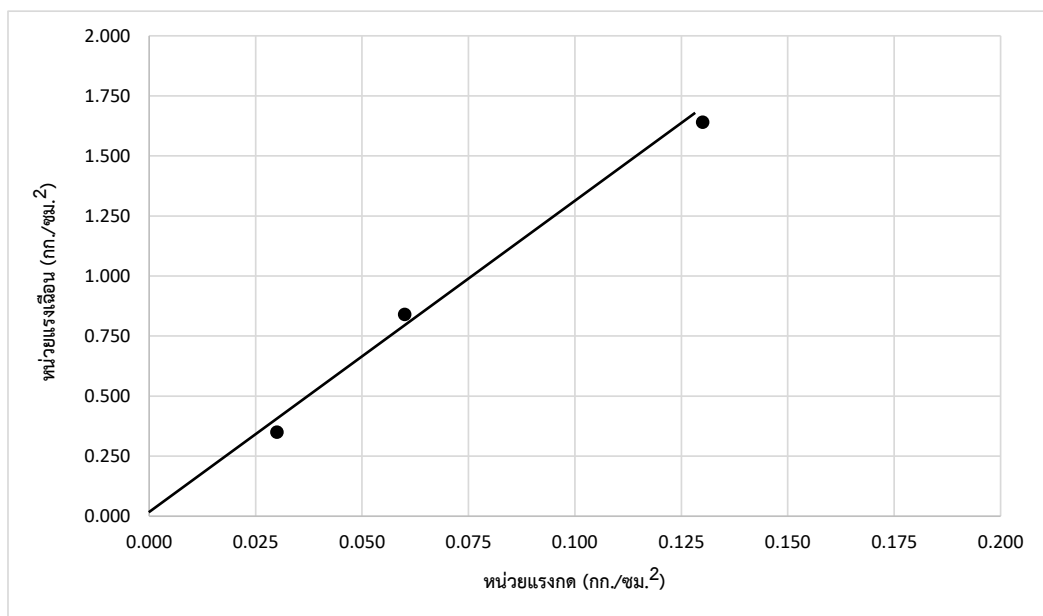
Direct shear test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :ก่อสร้างท่อเก็บน้ำดังสูง..... วันที่ :14/12/2547..... ตัวอย่างที่ :1.....
ตำแหน่ง :วิทยาเขตวังไกลกังวล..... หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....
ประเภทของดิน :Sandy Clay..... ผู้ทดสอบ :นายนิพนธ์ บุญรุ่ง..... ผู้ตรวจสอบ :นายชูศักดิ์ ศิริรัตน์..

Result Data

การทดสอบครั้งที่	ปริมาณน้ำในดิน (%)	หน่วยแรงกด (กก./ซม. ²)	หน่วยแรงเฉือน (กก./ซม. ²)
1	53.90	0.03	0.35
2	52.80	0.06	0.84
3	54.50	0.13	1.64



แรงยึดเกาะ (c) =	0.016	มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 85.476 °
------------------	-------	--



โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :
 Proving ring no. : Proving ring constant (K) : Kg/div Loading rate : mm./min

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		น้ำหนัก (ก.)	
ความสูง (มม.)		ปริมาณน้ำในดิน (%)	
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)		ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	
ปริมาตร (ซม. ³)		ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		น้ำหนัก (ก.)	
ความสูง (มม.)		ปริมาณน้ำในดิน (%)	
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)		ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	
ปริมาตร (ซม. ³)		ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	

[illegible]



Unconfined compression test

ข้อมูลการทดสอบ (ต่อ)

[illegible]



การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

Unconfined compression test

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :
 Proving ring no. : Proving ring constant (K) : Kg/div Loading rate : mm./min

ข้อมูลตัวอย่างดินคงสภาพ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		น้ำหนัก (ก.)	
ความสูง (มม.)		ปริมาณน้ำในดิน (%)	
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)		ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	
ปริมาตร (ซม. ³)		ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	

ข้อมูลการทดสอบ

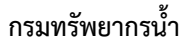
[illegible]



Unconfined compression test

ข้อมูลการทดสอบ (ต่อ)

[illegible]



Unconfined compression test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ : วันที่ : ตัวอย่างที่ :
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ : ความลึก (ม.) :
 ประเภทของดิน : ผู้ทดสอบ : ผู้ตรวจสอบ :
 Proving ring no. : Proving ring constant (K) : Kg/div Loading rate : mm./min

ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		น้ำหนัก (ก.)	
ความสูง (มม.)		ปริมาณน้ำในดิน (%)	
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)		ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	
ปริมาตร (ซม. ³)		ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	

ข้อมูลการทดสอบ

[illegible]



Unconfined compression test

ข้อมูลการทดสอบ (ต่อ)

[illegible]

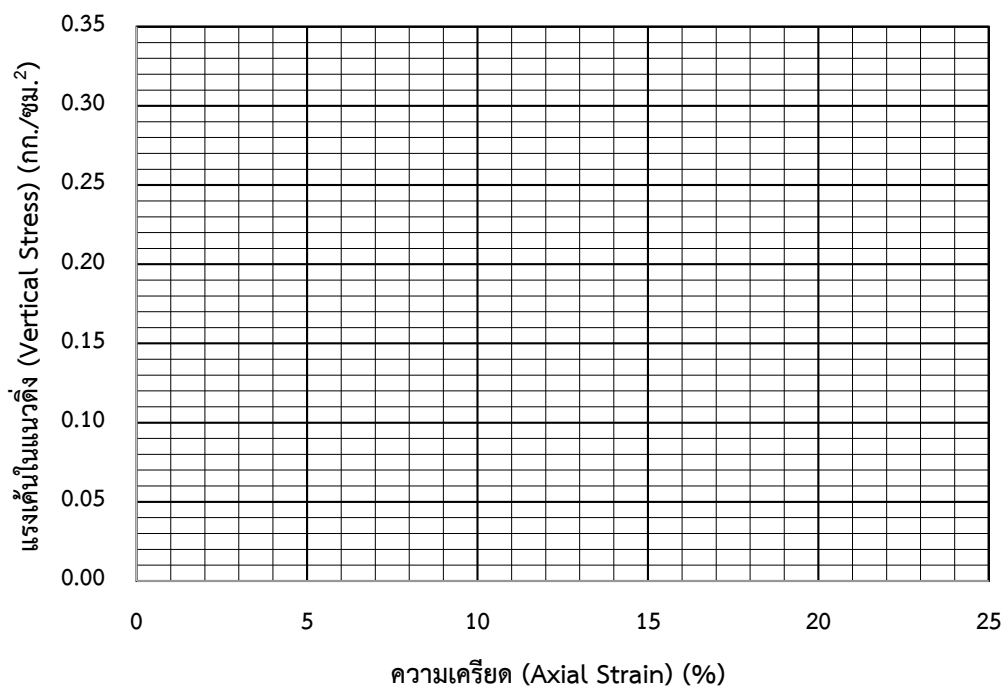


กรมทรัพยากรน้ำ

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined compression test

โครงการ :	วันที่ :	ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง :	หลุมเจาะที่ :	ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน :	ผู้ทดสอบ :	ผู้ตรวจสอบ :

ตัวอย่างดินคงสภาพ		ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ	
Unconfined Compressive Strength :	กก./ชม. ²	Unconfined Compressive Strength :	กก./ชม. ²
Undrained Shear Strength :	กก./ชม. ²	Undrained Shear Strength :	กก./ชม. ²
Strain at Failure :	%	Strain at Failure :	%
Sensitive :			





การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

Unconfined compression test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :	ถึงเก็บน้ำทอสูง.....	วันที่ :	24/11/2547.....	ตัวอย่างที่ :	1.....
ตำแหน่ง :	หลุมเจาะที่ :	1.....	ความลึก (ม.) :	1.....	
ประเภทของดิน :	Silty Clay.....	ผู้ทดสอบ :	นส.ยลวลิ บุญจันทร์.....	ผู้ตรวจสอบ :	นายชูศักดิ์ ศิริรัตน์.
Proving ring no. :	138596.....	Proving ring constant (K) :	0.164.....	Kg/div	Loading rate :
					0.0800.....mm./min

ข้อมูลตัวอย่างดินคงสภาพ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	35	น้ำหนัก (ก.)	142.55
ความสูง (มม.)	70	ปริมาณน้ำในดิน (%)	36.7
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)	9.62	ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	2.12
ปริมาตร (ซม. ³)	67.34	ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	1.55

ข้อมูลตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	35	น้ำหนัก (ก.)	145.22
ความสูง (มม.)	72	ปริมาณน้ำในดิน (%)	36.8
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)	9.62	ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	2.1
ปริมาตร (ซม. ³)	69.26	ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	1.54

ข้อมูลการทดสอบ

ตัวอย่างดินคงสภาพ		ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ	
การเคลื่อนตัวใน แนวตั้ง (div)	ค่าที่อ่านได้จาก Proving Ring (div)	การเคลื่อนตัวใน แนวตั้ง (div)	ค่าที่อ่านได้จาก Proving Ring (div)
20	4	20	2
40	8	40	4
60	11	60	5
80	14	80	6.5
100	15	100	7
120	17	120	7.5
140	18	140	7.8
160	19		
180	20		
200	20		
220	20		
240	20		
260	20		
280	20		
300	20		
320	20		



Unconfined compression test

กรมทรัพยากรน้ำ

ข้อมูลการทดสอบ (ต่อ)

[illegible]



การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

Unconfined compression test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :	ถึงเก็บน้ำหอสู่.....	วันที่ :	24/11/2547.....	ตัวอย่างที่ :	1.....
ตำแหน่ง :	หลุมเจาะที่ :	1.....	ความลึก (ม.) :	1.....	
ประเภทของดิน :	Silty Clay.....	ผู้ทดสอบ :	นส.ยลวดี บุญจันทร์.....	ผู้ตรวจสอบ :	นายชูศักดิ์ ศิริรัตน์.
Proving ring no. :	138596.....	Proving ring constant (K) :	0.164.....	Kg/div	Loading rate :
					0.0800.....mm./min

ข้อมูลตัวอย่างดินคงสภาพ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	35	น้ำหนัก (ก.)	142.55
ความสูง (มม.)	70	ปริมาณน้ำในดิน (%)	36.7
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)	9.62	ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	2.12
ปริมาตร (ซม. ³)	67.34	ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	1.55

ข้อมูลการทดสอบ

การเคลื่อนตัว ในแนวดิ่ง (div)	ค่าที่อ่านได้จาก Proving Ring (div)	ดินทรุดตัว (มม.)	ความเครียด	ความเครียด (%)	พื้นที่หน้าตัด แก้ไข (ซม. ²)	น้ำหนัก (กก.)	แรงเค้น ในแนวดิ่ง (กก./ซม. ²)
20	4	20 × 0.01 = 0.20	0.2/70 = 0.0029	0.0029 × 100 = 0.29	9.62/(1-0.0029) = 9.65	4 × 0.164 = 0.66	0.07
40	8	0.40	0.0057	0.57	9.68	1.31	0.14
60	11	0.60	0.0086	0.86	9.70	1.8	0.19
80	14	0.80	0.0114	1.14	9.73	2.3	0.24
100	15	1.00	0.0143	1.43	9.76	2.46	0.25
120	17	1.20	0.0171	1.71	9.79	2.79	0.28
140	18	1.40	0.0200	2.00	9.82	2.95	0.30
160	19	1.60	0.0229	2.29	9.85	3.12	0.32
180	20	1.80	0.0257	2.57	9.87	3.28	0.33
200	20	2.00	0.0286	2.86	9.90	3.28	0.33
220	20	2.20	0.0314	3.14	9.93	3.28	0.33
240	20	2.40	0.0343	3.43	9.96	3.28	0.33
260	20	2.60	0.0371	3.71	9.99	3.28	0.33
280	20	2.80	0.0400	4.00	10.02	3.28	0.33
300	20	3.00	0.0429	4.29	10.05	3.28	0.33
320	20	3.20	0.0457	4.57	10.08	3.28	0.33
340	20	3.40	0.0486	4.86	10.11	3.12	0.31
360	20	3.60	0.0514	5.14	10.14	3.12	0.31
380	20	3.80	0.0543	5.43	10.17	3.12	0.31
400	19	4.00	0.0571	5.71	10.20	3.12	0.31



Unconfined compression test

โครงการ :ถังเก็บน้ำหอสุง..... วันที่ :24/11/2547..... ตัวอย่างที่ :1.....
 ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....
 ประเภทของดิน :Silty Clay.....ผู้ทดสอบ :นส.ยลวลิ บุญพันธ์.....ผู้ตรวจสอบ :นายชูศักดิ์ ศีรีรัตน์.....
 Proving ring no. :235874..... Proving ring constant (K) :0.169.....Kg/div Loading rate :0.0800.....mm./min

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	35	น้ำหนัก (ก.)	145.22
ความสูง (มม.)	72	ปริมาณน้ำในดิน (%)	36.8
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)	9.62	ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)	2.1
ปริมาตร (ซม. ³)	69.26	ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)	1.54

[illegible]



การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

Unconfined compression test

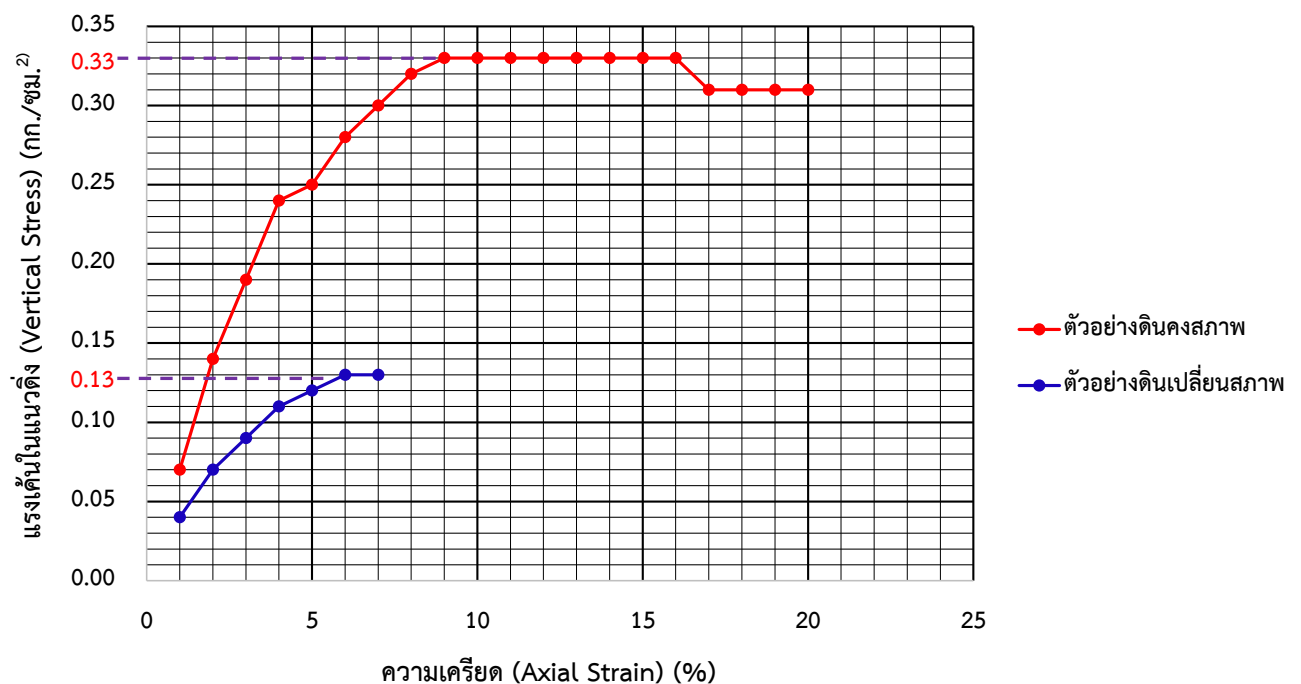
กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :ถึงเก็บน้ำหอสุง..... วันที่ :24/11/2547..... ตัวอย่างที่ :1.....

ตำแหน่ง : หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....

ประเภทของดิน :Silty Clay..... ผู้ทดสอบ :นส.ยลลล บัญชี..... ผู้ตรวจสอบ :นายชูศักดิ์ ศิริรัตน์.....

ตัวอย่างดินคงสภาพ		ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ	
Unconfined Compressive Strength :	0.33 กก./ซม. ²	Unconfined Compressive Strength :	0.13 กก./ซม. ²
Undrained Shear Strength :	0.17 กก./ซม. ²	Undrained Shear Strength :	0.07 กก./ซม. ²
Strain at Failure :	4.46%	Strain at Failure :	1.78%
Sensitive :	2.43		





การทดสอบการบดอัด Compaction test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :	วันที่ :	ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง :	หลุมเจาะที่ :	ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน :	ผู้ทดสอบ :	ผู้ตรวจสอบ :

☐ Standard test	☐ Modified test	จำนวนครั้งที่บดอัดต่อชั้น :	จำนวนชั้นของการบดอัด :
น้ำหนักก้อน :		ความสูงโมล : ซม.	ปริมาตรโมล : ซม. ³

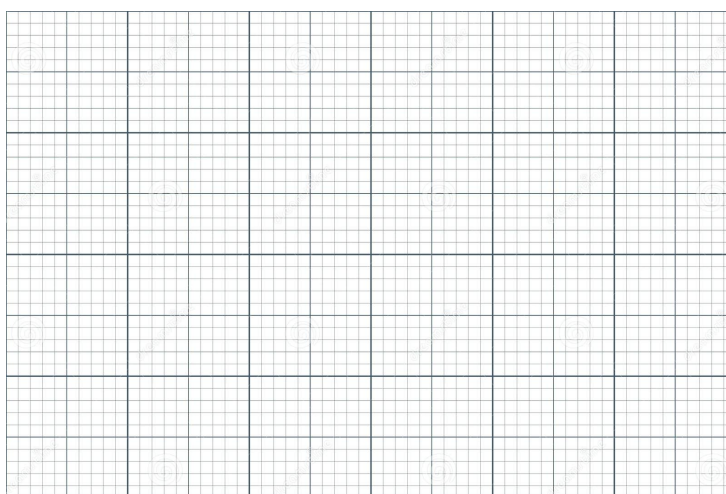
ตารางบันทึกผลการทดสอบหาปริมาณน้ำในดิน

การทดสอบครั้งที่	1	2	3	4
หมายเลขกระป๋องดิน				
น้ำหนักกระป๋องดิน+ดินเปียก (ก.)				
น้ำหนักกระป๋องดิน+ดินแห้ง (ก.)				
น้ำหนักกระป๋องดิน (ก.)				
น้ำหนักของน้ำ (ก.)				
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)				
ปริมาณน้ำในดิน (%)				

ตารางบันทึกผลการทดสอบหาความหนาแน่น

Assume Water Content (%)				
น้ำหนักดิน+โมล (ก.)				
น้ำหนักโมล (ก.)				
ปริมาณน้ำในดิน (%)				
น้ำหนักดินในโมล (ก.)				
ความหนาแน่นเปียก (ก./ซม. ³)				
ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม. ³)				

ความหนาแน่นแห้ง (ก./ซม.³)



ปริมาณน้ำในดิน (%)

ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) :ก./ซม.³

ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum Moisture Content, O.M.C) :%



การทดสอบการบดอัด Compaction test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :	TU Complex.....	วันที่ :	12-Jul-1994.....	ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง :	Rangsit.....	หลุมเจาะที่ :	ความลึก (ม.) :	
ประเภทของดิน :	Clayey sand.....	ผู้ทดสอบ :	Weeraya Sae-Tia.....	ผู้ตรวจสอบ :
		Weeraya Sae-Tia.....		

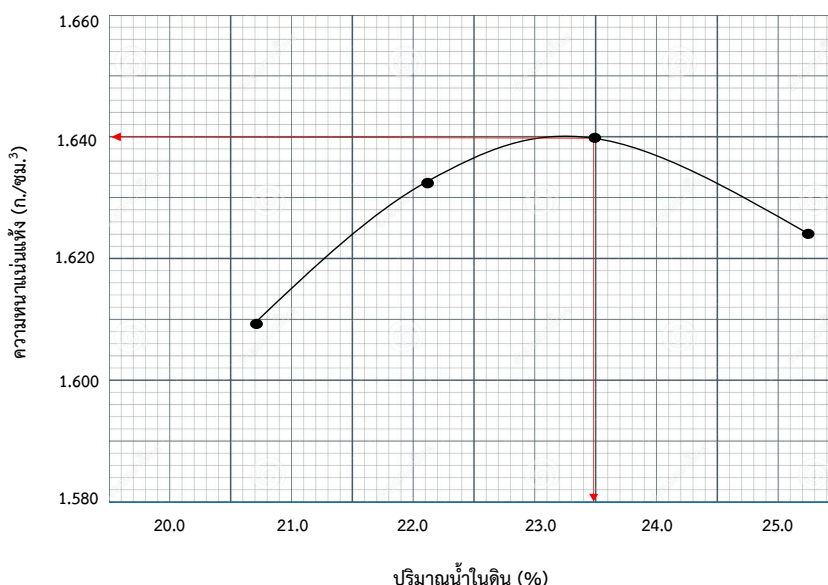
☒ Standard test	☐ Modified test	จำนวนครั้งที่บดอัดต่อชั้น :	จำนวนชั้นของการบดอัด :
น้ำหนักก้อน :	กก.	ความสูงโมล :	ชม.
		ปริมาตรโมล :	946.9.....(ชม. ³)

ตารางบันทึกผลการทดสอบหาปริมาณน้ำในดิน

การทดสอบครั้งที่	1	2	3	4
หมายเลขกระป๋องดิน				
น้ำหนักกระป๋องดิน+ดินเปียก (ก.)	28.52	37.12	31.98	35.35
น้ำหนักกระป๋องดิน+ดินแห้ง (ก.)	25.4	32.5	28.2	30.4
น้ำหนักกระป๋องดิน (ก.)	10.22	11.5	12.1	10.8
น้ำหนักของน้ำ (ก.)	3.12	4.62	3.78	4.95
น้ำหนักดินแห้ง (ก.)	15.18	21	16.1	19.6
ปริมาณน้ำในดิน (%)	20.55	22	23.48	25.26

ตารางบันทึกผลการทดสอบหาความหนาแน่น

Assume Water Content (%)				
น้ำหนักดิน+โมล (ก.)	1981.8	2034.83	2067.9	2071.76
น้ำหนักโมล (ก.)	150.5	150.5	150.5	150.5
ปริมาณน้ำในดิน (%)	20.55	22	23.48	25.26
น้ำหนักดินในโมล (ก.)	1831.3	1884.33	1917.4	1921.26
ความหนาแน่นเปียก (ก./ชม. ³)	1.934	1.990	2.025	2.029
ความหนาแน่นแห้ง (ก./ชม. ³)	1.604	1.631	1.640	1.620



ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) :1.64.....ก./ชม.³

ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum Moisture Content, O.M.C) :23.5.....%



การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน

Permeability test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :บ่อเก็บน้ำราชมงคล..... วันที่ :9 กันยายน พ.ศ. 2547..... ตัวอย่างที่ :1.....

ตำแหน่ง :วิทยาเขตวังไกลกังวล..... หลุมเจาะที่ :1..... ความลึก (ม.) :1.....

ประเภทของดิน :ทราย..... ผู้ทดสอบ :นายนาวัน สุดถนอม..... ผู้ตรวจสอบ :นายชูศักดิ์ ศิริรัตน์.....

ข้อมูลตัวอย่างดิน

เส้นผ่านศูนย์กลาง	10.10	ซม.	น้ำหนักของดิน + โมล เริ่มแรก	3760	ก.
ความสูง	11.65	ซม.	น้ำหนักของดิน + โมล สุดท้าย	1245	ก.
พื้นที่หน้าตัด	80.078	ซม. ²	น้ำหนักของดิน	2515	ก.
ปริมาตร	932.909	ซม. ³			

การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head)

การทดสอบครั้งที่	ความยาวตัวอย่าง (L, ซม.)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างระดับน้ำ (h, ซม.)	ปริมาณน้ำ (Q, ซม. ³)	เวลา (t, วินาที)	k _T (ซม./วินาที)	μ _T / μ ₂₀	k ₂₀ (ซม./วินาที)
1	20	30.5	12	121	68	0.03703	0.7876	0.02916
2	20	30.5	12	145	76	0.03971	0.7876	0.03128
3	20	30.5	12	136	75	0.03774	0.7876	0.02972
4	20	30.5	12	128	70	0.03806	0.7876	0.02998
5								
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิทดลอง, k _T						0.03814		ซม./วินาที
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิมาตรฐาน 20 องศาเซลเซียส, k ₂₀						0.03004		ซม./วินาที

การทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลง (Variable head)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดทดสอบ (Burette)	2.523 ซม.	พื้นที่หน้าตัดภายในของหลอดทดสอบ Burette	5.00 ซม. ²
---	-----------	---	-----------------------

การทดสอบครั้งที่	ความยาวตัวอย่าง (L, ซม.)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างระดับน้ำ (h, ซม.)		เวลา (t, วินาที)	k _T (ซม./วินาที)	μ _T / μ ₂₀	k ₂₀ (ซม./วินาที)
			h ₀	h ₁				
1	20	30.5	100	80	1300	0.000214	0.7876	0.000169
2	20	30.5	100	80	1312	0.000212	0.7876	0.000167
3	20	30.5	100	80	1325	0.000210	0.7876	0.000165
4	20	30.5	100	80	1320	0.000211	0.7876	0.000166
5								
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิทดลอง, k _T						0.000212		ซม./วินาที
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิมาตรฐาน 20 องศาเซลเซียส, k ₂₀						0.000167		ซม./วินาที



การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน

Permeability test

กรมทรัพยากรน้ำ

โครงการ :	วันที่ :	ตัวอย่างที่ :
ตำแหน่ง :	หลุมเจาะที่ :	ความลึก (ม.) :
ประเภทของดิน :	ผู้ทดสอบ :	ผู้ตรวจสอบ :

ข้อมูลตัวอย่างดิน

เส้นผ่านศูนย์กลาง	ชม.	น้ำหนักของดิน + โมล เริ่มแรก	ก.
ความสูง	ชม.	น้ำหนักของดิน + โมล สุดท้าย	ก.
พื้นที่หน้าตัด	ชม. ²	น้ำหนักของดิน	ก.
ปริมาตร	ชม. ³		

การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head)

การทดสอบ ครั้งที่	ความยาวตัวอย่าง (L, ชม.)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างระดับน้ำ (h, ชม.)	ปริมาณน้ำ (Q, ชม ³)	เวลา (t, วินาที)	k _T (ชม./วินาที)	μ _T / μ ₂₀	k ₂₀ (ชม./วินาที)
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิทดลอง, k _T								ชม./วินาที
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิมาตรฐาน 20 องศาเซลเซียส, k ₂₀								ชม./วินาที

การทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลง (Variable head)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดทดสอบ (Burette)	ชม.	พื้นที่หน้าตัดภายในของหลอดทดสอบ Burette	ชม. ²
---	-----	---	------------------

การทดสอบ ครั้งที่	ความยาวตัวอย่าง (L, ชม.)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างระดับน้ำ (h, ชม.)		เวลา (t, วินาที)	k _T (ชม./วินาที)	μ _T / μ ₂₀	k ₂₀ (ชม./วินาที)
			h ₀	h ₁				
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิทดลอง, k _T								ชม./วินาที
ค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านที่อุณหภูมิมาตรฐาน 20 องศาเซลเซียส, k ₂₀								ชม./วินาที