

บทที่ 1

การวิเคราะห์ลักษณะของสถานที่ก่อสร้าง (Site Characterization)

1.1 คำนำ (Introduction)

การออกแบบฐานรากอาคารนั้น มีความแตกต่างจากการออกแบบส่วนอื่นๆ ของอาคาร เนื่องจากการออกแบบส่วนอื่นๆ สามารถใช้ข้อมูลวัสดุที่มีจำหน่ายทั่วไป แล้วกำหนดเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการใช้ได้ แต่ในการออกแบบฐานรากต้องใช้ข้อมูลของดินที่จะรองรับอาคาร วิศวกรไม่สามารถกำหนดคุณสมบัติของดินได้เอง ต้องศึกษาสภาพของดินให้เข้าใจ คุณสมบัติและพฤติกรรมก่อนออกแบบ ในบทนี้จะเน้นการสำรวจและเก็บข้อมูลเพื่องานฐานราก ดินเป็นหลัก สำหรับการสำรวจโดยละเอียดนั้น สามารถศึกษาได้ในหนังสือ “แนวทางการตรวจสอบชั้นดินเพื่องานฐานราก” (คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี, 2545)

การวิเคราะห์ลักษณะของสถานที่ก่อสร้างในที่นี้ หมายถึงการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลด้าน วิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Site Investigation) เพื่อทำความเข้าใจคุณลักษณะของชั้น ดิน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว ถึงแม้การสำรวจนี้จะเป็นเรื่องที่สำคัญมาก แต่บางหน่วยงานให้ ความสำคัญน้อยเนื่องจากต้องการประหยัดค่าใช้จ่าย ดังนั้น ควรเข้าใจว่า “คุณค่าของการสำรวจ เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณามากกว่าราคาของการสำรวจ” ข้อมูลที่ดีจะช่วยให้การออกแบบเป็นไปโดย ถูกต้อง ลดอัตราส่วนปลอดภัยลงได้ นั่นคือทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง อีกทั้งสามารถ คาดคะเนปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้างและหาทางแก้ไขไว้ล่วงหน้าได้

Gabriel (2001) ได้ระบุว่า การประเมินการสำรวจสถานที่ก่อสร้างนั้น ต้องพิจารณา ตัว ประกอบของความสำเร็จวิกฤติ (Critical Success Factor) 5 ประการ และดัชนีชี้วัดความสำเร็จ (Key Performance Indicator) 7 ประการ

ตัวประกอบของความสำเร็จวิกฤติประกอบด้วย

- 1) การระบุแหล่งหรือต้นตอของการวิบัติของดิน
- 2) การกำหนดวิธีการจัดการที่ดีสำหรับความเสี่ยงของดิน
- 3) การบ่งบอกคุณค่าที่ดีของงานสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์
- 4) ใช้กระบวนการที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถปรับปรุงได้อย่างต่อเนื่อง
- 5) การให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง น่าเชื่อถือ และแนะนำการจัดการข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับดัชนีชี้วัดความสำเร็จต้องประเมินจากหัวข้อต่อไปนี้

- 1) การเตรียมตัว ได้แก่การศึกษาข้อมูลก่อนสำรวจจริง และการเดินสำรวจ

- 2) การออกแบบ

- 3) การดำเนินการด้านสัญญาก่อสร้าง
- 4) การบริหารโครงการทั้งด้านคุณภาพและความเสี่ยง
- 5) การให้คำปรึกษา
- 6) การรายงานผลที่เป็นข้อเท็จจริง
- 7) ผลสำเร็จของโครงการ ได้แก่ ความพึงพอใจและการตอบรับของลูกค้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการสำรวจ (Investigation Objective)

การสำรวจชั้นดินมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อประเมินความเหมาะสมของพื้นที่โครงการ
- 2) เพื่อให้การออกแบบเป็นไปโดยประหยัดและถูกต้อง ทั้งงานหลักของโครงการ งานก่อสร้างชั่วคราว งานปรับปรุงคุณภาพดิน และการควบคุมน้ำใต้ดิน
- 3) เพื่อการวางแผนการก่อสร้างที่ดีที่สุด ทั้งการเลือกวิธีก่อสร้าง การคาดคะเนและแก้ไข ปัญหาที่อาจจะเกิด
- 4) เพื่อการออกแบบที่ดีขึ้นหากมีปัญหาการวิบัติเกิดขึ้น
- 5) เพื่อทราบแหล่งวัสดุที่สามารถนำมาใช้ในโครงการ
- 6) เพื่อเลือกพื้นที่สำหรับเก็บกองวัสดุและทิ้งของเสีย
- 7) เพื่อประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างดินที่มีอยู่ เช่น เขื่อน และเชิงลาดของภูเขา
- 8) เพื่อประเมินความเปลี่ยนแปลงของชั้นดินและสภาพแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างหรือเกิดตามธรรมชาติในอนาคต

1.3 การวางแผนการสำรวจ (Investigation Plan)

การสำรวจลักษณะชั้นดินนั้น ผู้ที่วางแผนต้องรู้อย่างชัดเจนว่าสิ่งที่ต้องการคืออะไร นั่นหมายถึงว่าต้องเข้าใจในลักษณะงานก่อสร้างที่จะดำเนินการอย่างชัดเจน ดังนั้น ผู้ที่จะทำหน้าที่วางแผนการสำรวจจึงควรเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในงาน ขั้นตอนของการสำรวจควรมีขั้นตอนดังนี้ (Simons, Menzies and Matthews, 2002)

1.3.1 ประเมินความต้องการของโครงการ (Requirement's Evaluation)

การวางแผนการสำรวจนั้น จะต้องทราบว่าโครงการนั้นมีลักษณะงานอย่างไรซึ่งจะมีผลต่อการวางแผน ตัวอย่างเช่น โครงการก่อสร้างเขื่อนต้องการผลการเจาะสำรวจชั้นดินที่ลึกกว่าโครงการก่อสร้างถนน เป็นต้น

1.3.2 ศึกษาข้อมูลเดิม เรียกอีกอย่างว่าเป็นการศึกษาที่โต๊ะ (Desk Study)

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ การคาดคะเนสภาพของพื้นที่ การใช้พื้นที่ในอดีตและปัจจุบัน และเส้นทางคมนาคมเข้าสู่พื้นที่โครงการ ข้อมูลในขั้นตอนนี้มีประโยชน์ในการวางแผนและการออกแบบโครงการมาก ตัวอย่างเช่น การเจาะสำรวจชั้นดินเพื่อการก่อสร้างอุโมงค์ผ่านบริเวณที่มีอาคารอยู่แล้ว จะต้องหาข้อมูลของฐานรากอาคารเหล่านั้นก่อน เป็นต้น

ข้อมูลในขั้นตอนนี้สามารถหาได้จาก แผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่อุทกศาสตร์ ภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม รายงานการก่อสร้างในบริเวณใกล้เคียง รายงานการศึกษาด้านต่างๆ ของหน่วยราชการหรือสถาบันการศึกษา คำแนะนำจากผู้ที่อยู่อาศัยหรือทำงานในบริเวณโครงการ ผังเมืองรวม รวมทั้งข้อกำหนดและมาตรฐานที่ต้องใช้

1.3.3 สำรวจโดยการเดินเท้า (Walk-Over Survey)

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ การเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากการศึกษาที่โต๊ะ เป็นการเดินเท้าดูสภาพของพื้นที่ประกอบการเก็บข้อมูลอย่างง่าย ๆ อุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ เทปวัดระยะ กล้องถ่ายรูป เข็มทิศบรรทัด สว่านมือ ค้อนธรณีวิทยา เครื่องมือวัดการฝังจมแบบพกพา (Pocket Penetrometer) เป็นต้น

ข้อมูลจากการสำรวจในขั้นตอนนี้ได้แก่ คุณลักษณะของดินและหิน ความลาดชันของพื้นที่ สิ่งก่อสร้างเดิม สภาพความมั่นคงและกัดเซาะ สภาพของพืชพรรณ แหล่งน้ำและวัสดุ ความเป็นไปได้ของการนำเครื่องจักรขนาดใหญ่เข้าไป สถานที่สำคัญเช่นวัดและโรงเรียน สภาพเชิงสังคม เป็นต้น

1.3.4 พิจารณาแนวทางการออกแบบที่น่าจะเป็น (Possible Conceptual Design)

การสำรวจสถานที่ก่อสร้างนั้นมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญที่สุดคือ การหาค่าของพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมปฐพีเพื่อใช้ในการออกแบบ ดังนั้น ก่อนทำการเจาะสำรวจและเก็บข้อมูลจริง จำเป็นต้องคาดคะเนถึงวิธีการออกแบบที่จะใช้ เพื่อให้เก็บข้อมูลได้ครบถ้วน ตัวอย่างเช่น

- 1) ในการออกแบบงานดินถมบนดินเหนียวอ่อน มีประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ เสถียรภาพของดินถมและดินเดิม ทำให้ต้องทราบค่าความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำซึ่งอาจหาได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Triaxial Compression Test) ของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างคงสภาพสำหรับดินถมและดินเดิมตามลำดับ สำหรับดินเดิมนั้นอาจได้ค่านี้นี้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบใช้ใบมีด (Vane Shear Test) นอกจากนี้ ยังต้องมีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ของตัวอย่างคงสภาพของดินเดิมอีกด้วย
- 2) การศึกษาเสถียรภาพของเชิงลาดในธรรมชาติ (Stability of Natural Slope) นั้น เนื่องจากขบวนการในสภาพธรรมชาติเกิดขึ้นนานและค่อยเป็นค่อยไป ดังนั้น การหา

พารามิเตอร์ของความแข็งแรงประสิทธิภาพ (Effective Strength Parameter) เป็นสิ่งจำเป็น

- 3) การออกแบบฐานรากนั้น อาจวางแผนล่วงหน้าไว้ว่าการเก็บข้อมูลควรวีธีการใด แต่เมื่อทำการเจาะสำรวจจริงแล้วพบสภาพที่แตกต่างจากที่คาดคะเนไว้ ก็ต้องมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการออกแบบและการแก้ปัญหาในการก่อสร้าง โดยทั่วไป การทดสอบทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) เป็นการทดสอบในสนามที่ต้องกระทำอยู่แล้ว การทดสอบทะลวงโดยกรวย (Cone Penetration Test, CPT) นั้นเหมาะสมกับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในชั้นดินที่ไม่มีอนุภาคขนาดใหญ่ การทดสอบแรงเฉือนแบบใช้ใบมีด (Vane Shear Test) สามารถใช้หาพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินเหนียวในสนามได้ การเก็บตัวอย่างคงสภาพของดินเพื่อทดสอบการอัดตัวคายน้ำก็อาจจำเป็นหากต้องก่อสร้างฐานรากแผ่นชั้นดินที่ไม่แข็งแรงมาก การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินอาจจำเป็นหากในบริเวณก่อสร้างพบระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงและต้องวางแผนแก้ไขในงานชุดระหว่างก่อสร้าง เป็นต้น

1.3.5 ประเมินอันตรายและความเสี่ยง (Hazard and Risk)

งานทางวิศวกรรมโยธาจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่ไม่มากนัก อาจเป็นการเพิ่มหรือลดแรงกระทำต่อดิน หรือการนำเอาดินมาเป็นวัสดุก่อสร้าง อันตรายที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงนี้แบ่งออกเป็น

- 1) คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา
- 2) สภาพของชั้นดินมีโอกาสเปลี่ยนแปลงมาก (Non-homogeneous) ทั้งในด้านลึกและด้านกว้าง
- 3) อาจมีสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งก่อสร้าง
- 4) น้ำสามารถทำให้ความแข็งแรงของดินลดลงและเป็นตัวเพิ่มน้ำหนักบรรทุก

อันตรายบางอย่างสามารถสังเกตได้ในขั้นตอนของการศึกษาข้อมูลเดิม และการสำรวจโดยการเดินเท้า เช่น ในพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวและมีต้นไม้มาก อาจเกิดการขยายตัวของดินได้หากมีการตัดต้นไม้และสร้างสิ่งก่อสร้างที่มีน้ำหนักไม่มาก ในพื้นที่ที่มีความลาดชันมาก อาจเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการขุดหรือถมดินเพิ่ม ในพื้นที่ที่ดินชั้นล่างเป็นหินปูนนั้นอาจเกิดปัญหาหลุมยุบ (Sinkhole) เนื่องจากหินปูนถูกน้ำใต้ดินกัดเซาะจนเป็นโพรง

เมื่อทราบอันตรายที่อาจเกิดขึ้นแล้ว ควรจะมีการประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น หากมีความเสี่ยงสูงก็ต้องหาทางแก้ไข ตัวอย่างของความเสียหายต่ำและสูงของพื้นที่ก่อสร้าง เป็นดังนี้

- 1) น้ำใต้ดินมีค่าความเป็นด่างสูง ดินเหนียวมีสภาพแน่นและระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานราก สามารถสรุปได้ว่ามีความเสี่ยงต่ำ
- 2) น้ำใต้ดินมีค่าความเป็นกรดสูง ดินมีค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านสูงและระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงกว่าระดับฐานราก สามารถสรุปได้ว่ามีความเสี่ยงสูง

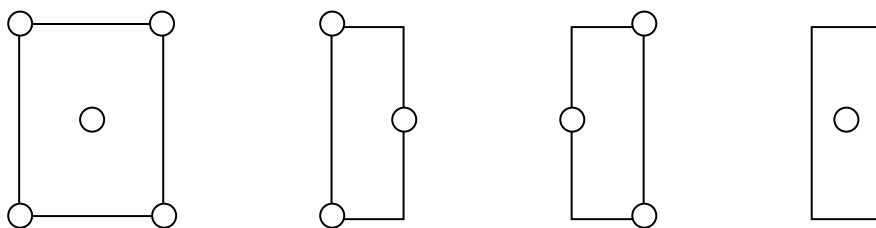
ความเสี่ยงในการก่อสร้างมีหลายประการ เช่น สารเคมีทำอันตรายต่อคอนกรีต สารเคมีทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต น้ำใต้ดินทำให้เกิดหลุมยุบ การพังทลายของเชิงลาด การกัดเซาะของพื้นที่ เป็นต้น ในการสำรวจจึงต้องมีการสังเกตและประเมินความเสี่ยงไว้ด้วย

1.3.6 จัดทำแบบจำลองทางธรณีวิทยา (Geological Model)

โครงสร้างบางโครงการ เช่น เขื่อนนั้น เกี่ยวข้องกับพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง เพื่อการทำความเข้าใจสภาพของพื้นที่อย่างชัดเจน ควรจัดทำเป็นแบบจำลองทางธรณีวิทยาขึ้น ซึ่งเป็นแบบจำลองสามมิติที่แสดงโครงสร้างของพื้นดิน เช่น ลักษณะของชั้นดินและหิน ร่องน้ำ รอยเลื่อน ซึ่งในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาไปมากจนการทำแบบจำลองเป็นเรื่องที่ไม่ยุ่งยากมากนัก

1.3.7 ดำเนินการเจาะสำรวจและทดสอบ (Boring and Test)

การเจาะสำรวจนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือจำนวนของหลุมเจาะ ระยะห่างของหลุมเจาะ และความลึกของหลุมเจาะ ในประเด็นของจำนวนและระยะห่างของหลุมเจาะนั้น อาจขึ้นอยู่กับการใช้วิธีมาตรฐานในการกำหนดให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.1 ทั้งนี้ จำนวนของหลุมเจาะจะขึ้นอยู่กับความสำคัญและขนาดของสิ่งก่อสร้าง และความแปรปรวนของลักษณะชั้นดิน การกำหนดระยะห่างระหว่างหลุมเจาะสำรวจอาจใช้ตามที่มีผู้แนะนำไว้ดังแสดงในตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งของหลุมเจาะในพื้นที่ก่อสร้าง

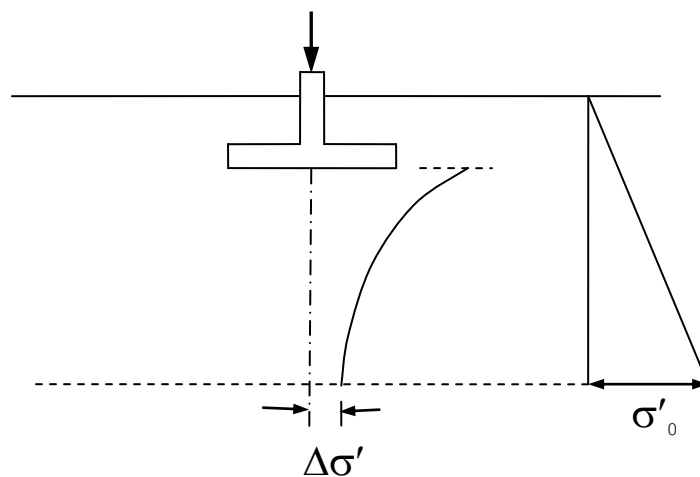
ความลึกของการเจาะสำรวจนั้น ในทางปฏิบัติจะเจาะลงไปจนพบชั้นดินที่แข็งแรงเพียงพอที่จะใช้รองรับฐานรากอาคารได้และเจาะต่อไปจนแน่ใจว่าชั้นดินที่จะใช้รองรับฐานรากนั้นมีความหนาพอที่จะไม่เกิดแรงเฉือนทะลุซึ่งอาจกำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 2 เมตร หรือพบชั้นดินแข็งจนไม่สามารถเจาะสำรวจต่อไปได้

ตารางที่ 1.1 ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะสำรวจ

ประเภทของสิ่งก่อสร้าง	ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะสำรวจ, เมตร	
	Sowers, 1979	Das, 2004
อาคารหลายชั้น	15-45	10-30
โรงงานชั้นเดียว	30-90	20-60
ทางหลวง	60-600	250-500
เขื่อนและคันดิน	15-60	40-80

ASCE (1972) ได้กำหนดวิธีการหาค่าความลึกต่ำสุดของการเจาะสำรวจไว้ดังนี้

- 1) หาค่าความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น (Increased Effective Stress, $\Delta\sigma'$) ในดินเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกของฐานรากที่ความลึกต่างๆ ดังรูปที่ 1.2 (การหาค่าความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นแสดงในบทที่ 2)
- 2) หาค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน (Vertical Effective Stress, σ'_0) ที่ความลึกต่างๆ ดังรูปที่ 1.2
- 3) หาค่าความลึก D_1 ซึ่งเป็นระดับที่ $\Delta\sigma' = q/10$ โดย q คือค่าความเค้นที่ฐานรากกระทำต่อดิน
- 4) หาค่าความลึก D_2 ซึ่งเป็นระดับที่ $\Delta\sigma' / \sigma'_0 = 0.05$
- 5) เลือกค่า D_1 หรือ D_2 ที่ต่ำกว่าเป็นค่าความลึกต่ำสุดของการเจาะสำรวจ



รูปที่ 1.2 การหาค่าความลึกต่ำสุดของการเจาะสำรวจ

อย่างไรก็ตาม การกำหนดความลึกของ ASCE นี้จะมีปัญหาในทางปฏิบัติบ้าง เพราะต้องทราบค่าความเค้นที่ฐานรากกระทำต่อดินซึ่งบางครั้งจะยังไม่ทราบระหว่างที่ทำการเจาะสำรวจ

วิธีการสำรวจชั้นดินนั้นแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ การสำรวจทางอ้อมและการสำรวจทางตรง การสำรวจทางอ้อมได้แก่การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (Geophysical Exploration) ซึ่งเป็นการสำรวจที่ส่งพลังงาน เช่นคลื่นเสียงและไฟฟ้า ลงไปในชั้นดินแล้วแปรค่าออกมาเป็นลักษณะของชั้นดินโดยที่ไม่มีการขุดเจาะลงไป วิธีนี้ทำได้รวดเร็วเหมาะกับการสำรวจเบื้องต้นและการสำรวจในบริเวณกว้าง ไม่เหมาะต่อการหาพารามิเตอร์มาใช้ในการออกแบบฐานราก

การสำรวจทางตรงคือการเจาะชั้นดินลงไปเพื่อทราบสภาพของชั้นดิน ประกอบกับการทดสอบในสนามและเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ การเจาะสำรวจชั้นดินนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการใช้สว่านมือซึ่งเป็นการใช้แรงคน และการใช้เครื่องจักร

1.3.8 รายงานการเจาะสำรวจ (Boring Report)

รายงานการเจาะสำรวจดินเป็นการรวบรวมข้อมูลทั้งที่เป็นผลการทดสอบและจากการสังเกตไว้ด้วยกัน ข้อมูลจากการทดสอบได้แก่ การทดสอบฝั่งจมมาตรฐาน พิกัดอัตโนมัติเบร็ก การวิเคราะห์การกระจายขนาดด้วยตะแกรง และปริมาณความชื้นในสภาพธรรมชาติ เป็นต้น ข้อมูลจากการสังเกตได้แก่ สภาพภูมิประเทศ สภาพอากาศ ลักษณะของดินที่เห็นด้วยตาเปล่า และระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น รายงานควรมีส่วนประกอบดังนี้

- 1) บทนำที่กล่าวถึงโครงการที่ทำการเจาะสำรวจ จำนวนหลุมเจาะ และแผนที่แสดงที่ตั้งของโครงการและตำแหน่งของหลุมเจาะ
- 2) วิธีการเจาะสำรวจ การเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบหาคุณสมบัติของดิน
- 3) สรุปลักษณะของชั้นดินเชิงบรรยาย
- 4) สรุปผลการเจาะสำรวจในรูปแบบของตาราง (Boring Log) ซึ่งเป็นการรวบรวมลักษณะและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินไว้ในที่เดียวกันเพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้ในการออกแบบฐานราก ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.3
- 5) อื่นๆ เช่น การประมาณพารามิเตอร์เพื่อการออกแบบฐานราก การแนะนำประเภทของฐานรากที่เหมาะสม เอกสารอ้างอิง ฯลฯ

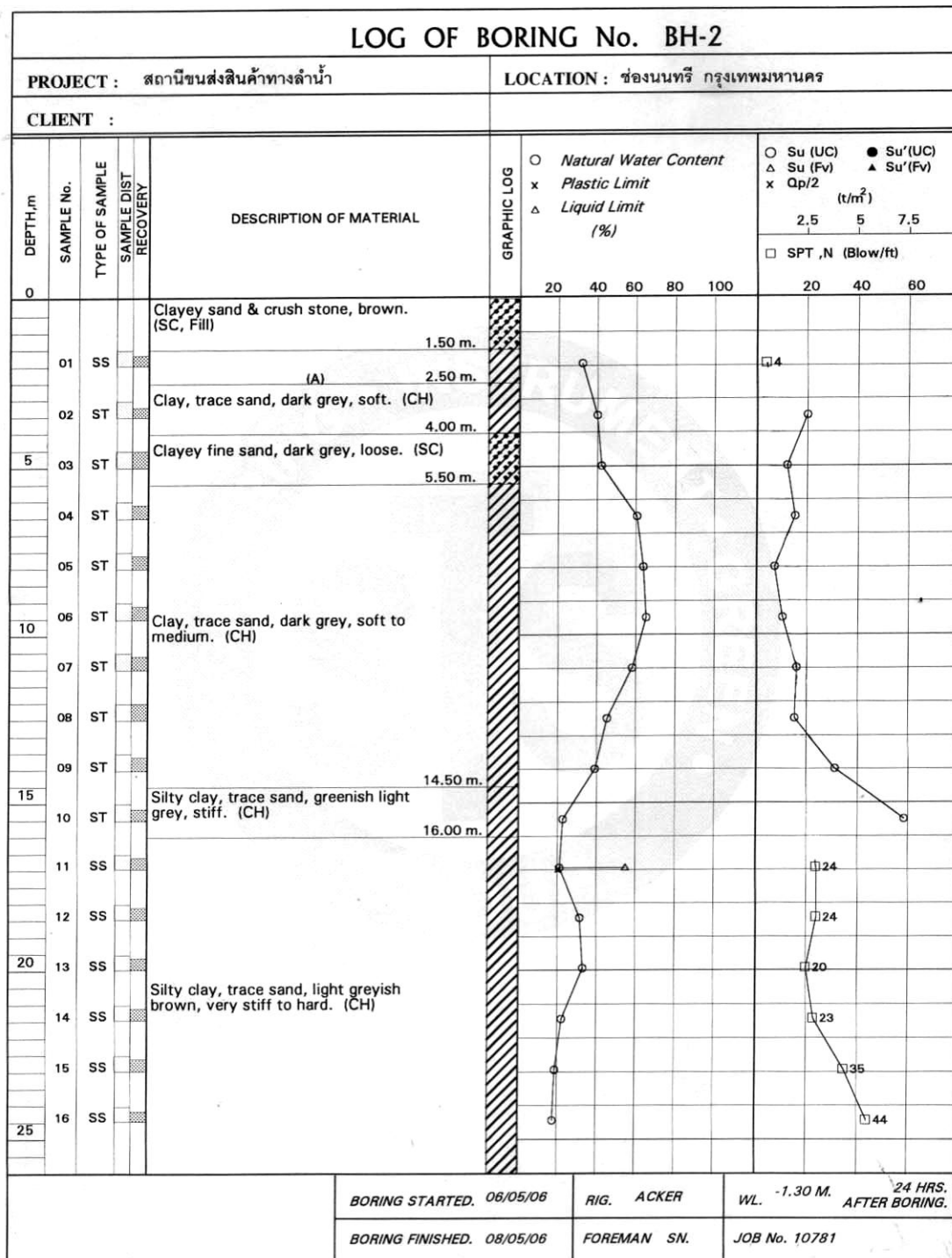
1.4 การทดสอบในสนาม (Field Test)

การทดสอบในสนามมีหลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด 3 วิธี

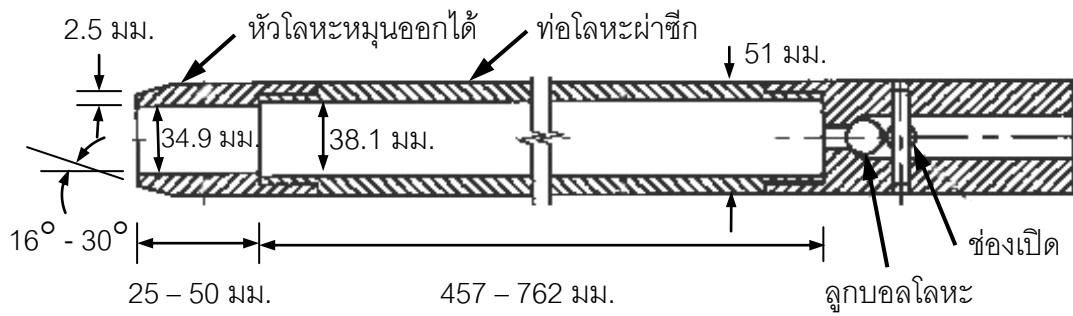
1.4.1 การทดสอบฝั่งจมมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

การทดสอบฝั่งจมมาตรฐานเป็นการทดสอบในสนามที่นิยมนำมาใช้ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีทดสอบที่ทำได้ง่าย อุปกรณ์ที่สำคัญของการ

ทดสอบ SPT ได้แก่ระบบอกเก็บตัวอย่างแบบผ่าซีก (Split Spoon Sampler) ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D1586 ดังแสดงในรูปที่ 1.4 การทดสอบจะกระทำเมื่อมีการเจาะสำรวจชั้นดินลงไปถึงระดับที่ต้องการ จึงหย่อนกระบอกลงไปแล้วตอกด้วยลูกตุ้มหนัก 140 ปอนด์ซึ่งถูกยกให้สูง 30 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ผลของ SPT จะแสดงด้วยจำนวนครั้งที่ตอกให้กระบอกลง 12 นิ้ว (N)



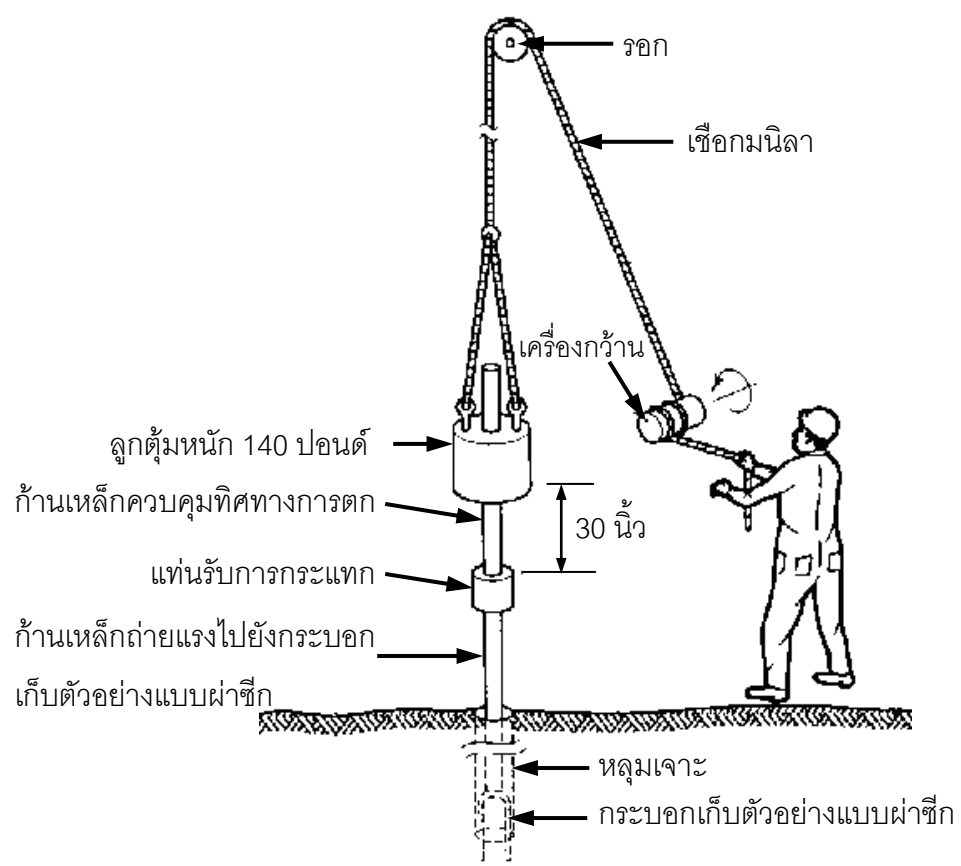
รูปที่ 1.3 การสรุปผลการเจาะสำรวจไว้ในรูปแบบของตาราง



รูปที่ 1.4 กระบอกรีดตัวอย่างแบบผ่าซีกสำหรับการทำ SPT (ASTM D1586)

ในกรณีที่ดินซึ่งทดสอบเป็นทรายละเอียดหรือทรายปนทรายแป้ง หากระดับที่ทดสอบอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อน เนื่องจากแรงดันน้ำในโพรงดินที่เกิดขึ้นไม่สามารถระบายออกได้ทัน ความคลาดเคลื่อนจะเกิดมากเมื่อดินมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูง ดังนั้น หากได้ค่า N สูงกว่า 15 ควรปรับแก้โดยใช้สมการที่ 1.1 (Simons and Menzies, 2000)

$$N_{\text{corrected}} = 15 + 0.5(N_{\text{measured}} - 15) \tag{1.1}$$



รูปที่ 1.5 การทดสอบฝังจรมมาตรฐาน (SPT)

ในการนำค่า N ที่ได้จากสนามไปใช้งานนั้น ส่วนใหญ่ต้องมีการปรับแก้ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบนั้นมีเงื่อนไขหลายประการได้แก่ ชนิดของลูกตุ้ม ขนาดของหลุมเจาะ ลักษณะของการเก็บตัวอย่าง และความยาวของก้านเหล็ก เงื่อนไขเหล่านี้ทำให้พลังงานจากการตกกระทบของลูกตุ้มถ่ายทอดไปยังกระบอกเก็บตัวอย่างแบบผ่าซีกไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงต้องปรับแก้ผลการทดสอบให้ไปสู่มาตรฐานของอัตราส่วนพลังงาน (Energy Ratio, E_r) เดียวกัน ค่าอัตราส่วนพลังงานแสดงในสมการที่ 1.2

$$E_r = \text{พลังงานที่ถ่ายทอดไปถึงกระบอก} / \text{พลังงานที่กระทำ} \quad (1.2)$$

ค่า N ที่ปรับแก้แล้วจะใช้สัญลักษณ์เป็น N_{E_r} ซึ่งค่าที่นิยมใช้คือ N_{55} , N_{60} และ N_{70} ในที่นี้จะเสนอการปรับแก้เป็น N_{60} โดยใช้สมการที่ 1.3 (Seed et al., 1985 และ Skempton, 1986)

$$N_{60} = \frac{N \eta_H \eta_B \eta_S \eta_R}{60} \quad (1.3)$$

โดย η_H = ค่าปรับแก้สำหรับประสิทธิภาพของลูกตุ้ม

η_B = ค่าปรับแก้สำหรับขนาดของหลุมเจาะ

η_S = ค่าปรับแก้สำหรับลักษณะของการเก็บตัวอย่าง

η_R = ค่าปรับแก้สำหรับความยาวของก้านเหล็ก

ค่า η_H , η_B , η_S และ η_R แสดงในตารางที่ 1.2 ถึง 1.5

ตารางที่ 1.2 ค่าปรับแก้ η_H

ประเทศ	ชนิดลูกตุ้ม	การปล่อยลูกตุ้ม	η_H
ญี่ปุ่น	โดนต์	อิสระ	78
	โดนต์	ใช้เชือกและรอก	67
สหรัฐอเมริกา	ปลอดภัย	ใช้เชือกและรอก	60
	โดนต์	ใช้เชือกและรอก	45
จีน	โดนต์	อิสระ	60
	โดนต์	ใช้เชือกและรอก	50

ตารางที่ 1.3 ค่าปรับแก้ η_B

ขนาดของหลุมเจาะ, มิลลิเมตร	η_B
60-120	1.0
150	1.05
200	1.15

ตารางที่ 1.4 ค่าปรับแก้ η_s

ลักษณะของการเก็บตัวอย่าง	η_s
ไม่ใช้โคลนป้องกันดินพัง (Liner)	1.0
ใช้โคลนโดยที่ดินเป็นทรายแน่นหรือดินเหนียว	0.8
ใช้โคลนโดยที่ดินเป็นทรายหลวม	0.9

ตารางที่ 1.5 ค่าปรับแก้ η_R

ความยาวของก้านเหล็ก, เมตร	η_R
>10	1.0
6-10	0.95
4-6	0.85
0-4	0.75

เนื่องจากผลการทดสอบฝั่งจุมมาตรฐานในดินชนิดที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) ได้รับอิทธิพลจากความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินด้วย ดังนั้น การนำค่า N_{Er} ไปใช้ในบางกรณีจึงต้องมีการปรับแก้ให้เป็นค่าที่มีความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินมาตรฐานดังสมการที่ 1.4

$$N_{60}' = C_N N_{60} \quad (1.4)$$

โดย N_{60}' = ผลการทดสอบฝั่งจุมมาตรฐานที่ปรับให้มีอัตราส่วนพลังงานเป็นร้อยละ 60 และมีความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินเท่ากับความดันบรรยากาศ

C_N = ค่าปรับแก้ตามสมการที่ 1.5, 1.6, 1.7 และ 1.8 ซึ่งเสนอโดย Skempton (1986), Seed et al. (1975), Liao and Whitman (1986) และ Peck et al. (1974) ตามลำดับ

$$C_N = \left[\frac{1}{\sigma'_0/p_a} \right]^{0.5} \quad (1.5)$$

$$C_N = \frac{2}{1 + (\sigma'_0/p_a)} \quad (1.6)$$

$$C_N = 1 - 1.25 \log(\sigma'_0/p_a) \quad (1.7)$$

$$C_N = 0.77 \log \left[\frac{20}{\sigma'_0/p_a} \right] \quad (1.8)$$

โดย σ'_0 = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน ณ ระดับที่ทำการทดสอบ

p_a = ความดันบรรยากาศ = 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ค่า N_{Er} นั้น สามารถปรับเปลี่ยนจากค่า N ที่อัตราส่วนพลังงานหนึ่ง (N_{Er1}) ไปเป็น ค่า N ที่อัตราส่วนพลังงานหนึ่ง (N_{Er2}) ได้โดยเทียบกับค่าอัตราส่วนพลังงานดังสมการที่ 1.9

$$E_{r1} N_{Er1} = E_{r2} N_{Er2} \quad (1.9)$$

ตัวอย่างที่ 1.1 จากการทดสอบฝังจมมาตรฐานที่ความลึก 5 เมตร หลุมเจาะมีขนาด 10 เซนติเมตร ใช้ลูกตุ้มแบบโดนต์ที่ยกโดยแรงคน ไม่มีการใช้โคลนป้องกันดินพัง ดินบริเวณนั้นมีหน่วยน้ำหนัก 18 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ได้ค่า N เป็น 35 ให้หาค่า N_{60} , N_{70} , N_{60}' และ N_{70}'

จากตารางที่ 1.2 ถึง 1.5 ได้ η_H , η_B , η_S และ η_R เป็น 60, 1.0, 1.0 และ 0.85 ตามลำดับ ซึ่งค่า η_H นั้น ใช้ตามประเทศจีนซึ่งสภาพใกล้เคียงกับไทยมากที่สุด

$$\text{จากสมการที่ 1.3 ได้ } N_{60} = \frac{(35)(60)(1)(1)(0.85)}{60} = 30$$

$\sigma'_0 = (5)(18) = 90$ ดังนั้นจากสมการที่ 1.5, 1.6, 1.7 และ 1.8 ได้ C_N เป็น 1.05, 1.05, 1.06 และ 1.04 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในที่นี้เลือกใช้ค่า 1.05

จากสมการที่ 1.4 ได้ $N_{60}' = (1.05)(30) = 31$

จากสมการที่ 1.9 ได้ $N_{70} = (60)(30)/70 = 26$

และ $N_{70}' = (60)(31)/70 = 27$

หมายเหตุ ผลทดสอบฝังจมนมาตรฐานจะแสดงเป็นเลขจำนวนเต็ม

ตารางที่ 1.6 การคาดคะเนคุณสมบัติดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวจากผลการทดสอบฝังจมนมาตรฐาน

สภาพดิน	คุณสมบัติ		N'_{70}	q_u , กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
อ่อนมาก (Very Soft)	NC	ต่ำ น้อย	0-2	<25
อ่อน (Soft)			3-5	25-50
ปานกลาง (Medium)	OCR	มีแรง ยึดเหนี่ยว มาก	6-9	50-100
แน่น (Stiff)			10-16	100-200
แน่นมาก (Very Stiff)			17-30	200-400
แข็ง (Hard)			>30	>400

หมายเหตุ การประมาณคุณสมบัติดินเหนียวจากผล SPT นั้น มีโอกาสผิดพลาดได้มาก

ตารางที่ 1.7 การคาดคะเนคุณสมบัติดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวจากผลการทดสอบฝังจมนมาตรฐาน

สภาพดิน	หลวมมาก (Very Loose)	หลวม (Loose)	ปานกลาง (Medium)	แน่น (Dense)	แน่นมาก (Very Dense)
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r)	0	0.15	0.35	0.65	0.85
N'_{70} : ละเอียด ปานกลาง หยาบ	1-2	3-6	7-15	16-30	?
	2-3	4-7	8-20	21-40	>40
	3-6	5-9	10-25	26-45	>45
ϕ : ละเอียด ปานกลาง หยาบ	26-28	28-30	30-34	33-38	<50
	27-28	30-32	32-36	36-42	
	28-30	30-34	33-40	40-50	
หน่วยน้ำหนัก, kN/m^3	11-16	14-18	17-20	17-22	20-23

ผลการทดสอบฝังจมนมาตรฐานนี้ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้ ตารางที่ 1.6 เป็นการประมาณสภาพของดินและค่าความแข็งแรงแบบไม่มี

ขอบเขตจำกัด (Unconfined Compression Strength, q_u) ของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) และตารางที่ 1.7 เป็นการประมาณคุณสมบัติดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) (Bowles, 1988)

สมการที่ 1.10 และ 1.11 ซึ่งเสนอโดย Stroud (1974) และ Hara et al. (1971) ตามลำดับ เป็นการประมาณค่าความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, c_u) ในหน่วยกิโลนิวตันต่อตารางเมตรของดินเหนียว โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบฝั่งจุมมาตรฐานกับการทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Test)

$$c_u = KN_{60} \quad (1.10)$$

$$c_u = 29N_{60}^{0.72} \quad (1.11)$$

โดยที่ K ในสมการที่ 1.10 มีค่าอยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 6.5

สมการที่ 1.12 เป็นการประมาณค่าอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำเกินตัว (Overconsolidation Ratio, OCR) ของดินเหนียวจากผลการทดสอบฝั่งจุมมาตรฐาน (Mayne and Kemper, 1988)

$$OCR = 0.193 \left(\frac{N_{60}}{\sigma'_0} \right)^{0.689} \quad (1.12)$$

ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density, D_r) ของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวอาจประมาณได้ดังตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 ค่าโดยประมาณของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว

N_{60}'	$D_r, \%$
0-5	0-5
5-10	5-30
10-30	30-60
30-50	60-95

ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์อาจประมาณจากสมการที่ 1.13, 1.14 และ 1.15 ซึ่งเป็นสมการที่เสนอโดย Marcuson and Biegansky (1977), Kulhawy and Mayne (1990) และ Cubrinovski and Ishihara (1999) ตามลำดับ

$$D_r (\%) = 11.7 + 0.76(222N_{60} + 1600 - 53\sigma'_0 - 50 C_u^2)^{0.5} \quad (1.13)$$

$$D_r (\%) = 12.2 + 0.75(222N_{60} + 2311 - 711 \text{OCR} - 779(\sigma'_0/P_a - 50 C_u^2)^{0.5} \quad (1.14)$$

$$D_r (\%) = \left[\frac{N_{60} \left(0.23 + \frac{0.06}{D_{50}} \right)^{1.7}}{9} \left(\frac{1}{\frac{\phi'_0}{P_0}} \right) \right]^{0.5} \quad (1.15)$$

โดยที่ค่า σ'_0 ในสมการที่ 1.13 มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ C_u คือค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity) ของดิน

นอกจากนี้ ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle, ϕ') หน่วยเป็นองศา ของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวยังอาจประมาณได้จากสมการที่ 1.16, 1.17 และ 1.18 ซึ่งเสนอโดย Peck, Hanson and Thornburn (1974), Kulhawy and Mayne (1990) และ Hatanaka and Uchida (1996) ตามลำดับ

$$\phi' = 27.1 + 0.3N'_{60} - 0.00054(N'_{60})^2 \quad (1.16)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3(\sigma'_0 / p_0)} \right]^{0.34} \quad (1.17)$$

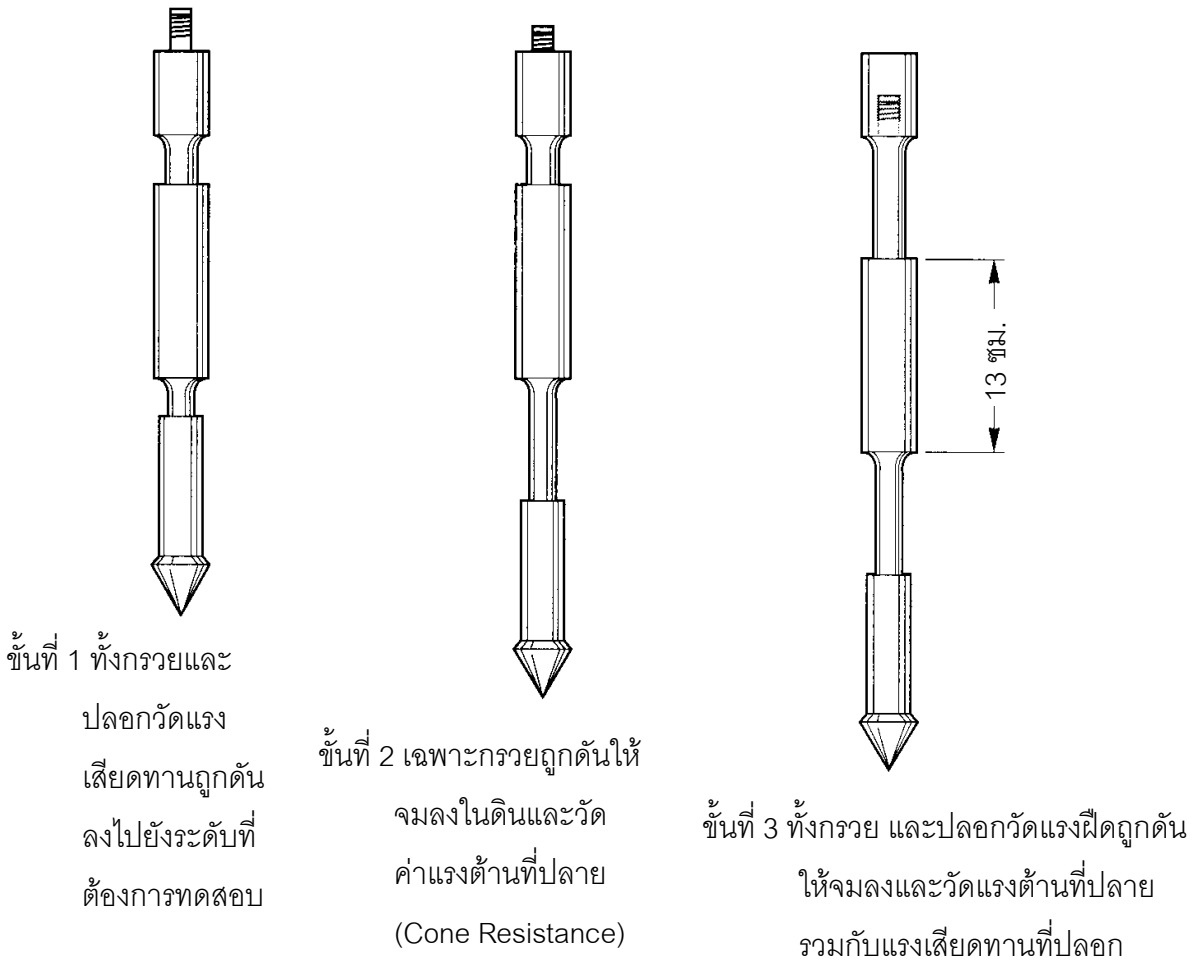
$$\phi' = \sqrt{20N'_{60}} + 20 \quad (1.18)$$

1.4.2 การทดสอบด้วยหัวกดปลายกรวย (Cone Penetration Test, CPT)

CPT เป็นการทดสอบในสนามที่นิยมนำมาใช้ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินอีกวิธีหนึ่ง เป็นการวัดแรงต้านและแรงเสียดทานของดินโดยการดันกรวยลงไปตามแสดงในรูปที่ 1.6

การทดสอบ CPT มีข้อดีที่สามารถทดสอบและเก็บข้อมูลได้มาก นิยมทดสอบทุกๆ ความลึก 20 ซม. ทำให้ได้ข้อมูลมากกว่าการทดสอบ SPT ซึ่งนิยมทดสอบทุกๆ ความลึก 1 ม. แต่ CPT มี

ข้อเสียที่ไม่มีการเก็บตัวอย่างดิน ทำให้ไม่ทราบลักษณะที่แท้จริงของดิน มีนักวิจัยจำนวนมากเสนอการคาดคะเนลักษณะของดินจากค่าแรงต้านที่ปลายกรวยกับค่าอัตราส่วนแรงเสียดทาน (Friction Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานกับแรงต้านที่ปลายกรวย ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ถึงแม้ว่าการทดสอบ CPT จะถูกพัฒนามาเพื่อการคาดคะเนกำลังของเสาเข็ม แต่ก็มีนักวิจัยเสนอวิธีการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินจากผลของ CPT สำหรับการออกแบบฐานรากแผ่ไว้เช่นกัน

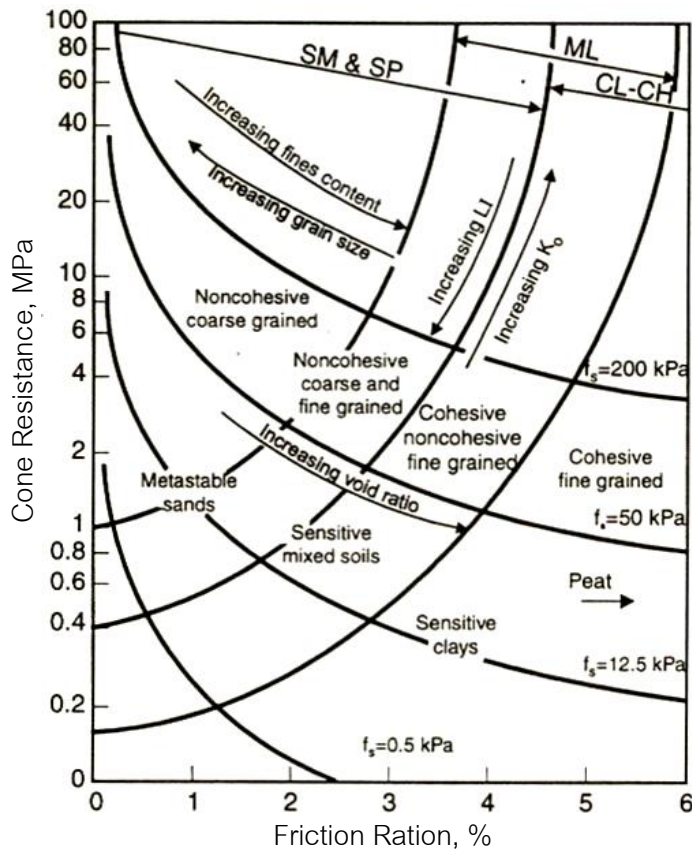


รูปที่ 1.6 การทดสอบ CPT

แรงต้านที่ปลายกรวย (Cone Resistance, q_c) สามารถนำมาประมาณความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายที่มีการอัดตัวปกติ (Normally Consolidated Sand) ได้จากสมการที่ 1.19 (Jamolkowski et al., 1985) โดยที่ q_c และ σ'_0 มีหน่วยเป็นตันต่อตารางเมตร และประมาณค่ามุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle, ϕ') หน่วยเป็นองศาของทรายได้จากสมการที่ 1.20 (Kulhawy and Mayne, 1990)

$$D_r (\%) = -98 + 66 \log \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_0}} \right) \quad (1.19)$$

$$\phi' = \tan^{-1} [0.1 + 0.38 \log(q_c / \sigma'_0)] \quad (1.20)$$



รูปที่ 1.7 การคาดคะเนลักษณะของดินจากผลของ CPT (Lunne, Robertson and Powell, 1984)

ในกรณีของดินเหนียว ค่าความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, c_u) ค่าความดันสูงสุดที่เคยกดทับ (Preconsolidation Pressure, σ'_0) และค่าอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำเกินตัว (Overconsolidation Ratio, OCR) สามารถประมาณได้จากสมการที่ 1.21 ถึง 1.23 ตามลำดับ (Mayne and Kemper, 1988)

$$c_u = \frac{q_c - \sigma'_0}{N_k} \quad (1.21)$$

$$\sigma'_c = 0.243(q_c)^{0.96} \quad (1.22)$$

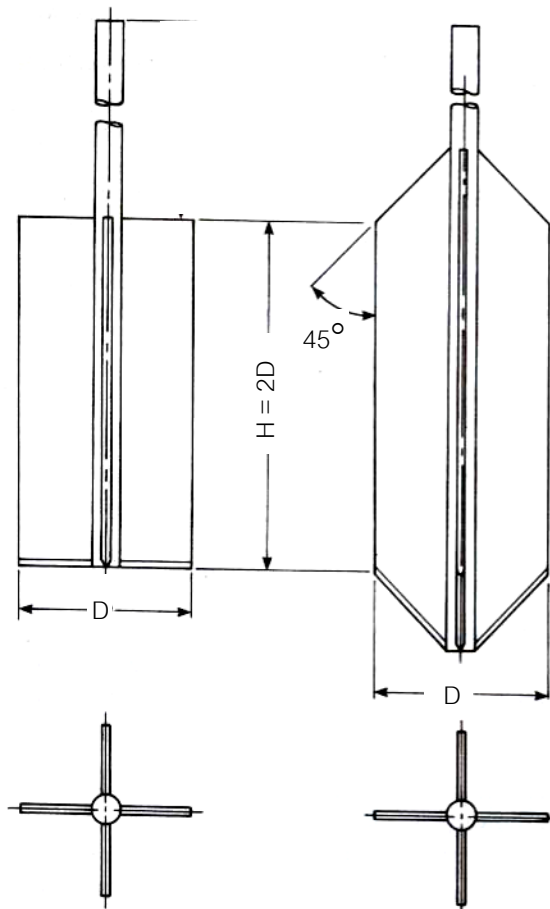
$$\text{OCR} = 0.37 \left(\frac{q_c - \sigma_0}{\sigma'_0} \right)^{1.01} \quad (1.23)$$

โดย σ_0 = ความเค้นในแนวตั้งทั้งหมด (Total Vertical Stress)

N_k = ค่าตัวประกอบกำลังรับน้ำหนักมีค่าเป็น 15 และ 20 สำหรับกรวยไฟฟ้า (Electric Cone) และกรวยกล (Mechanical Cone) ตามลำดับ

1.4.3 การทดสอบไวนเฉือน (Vane Shear Test)

การทดสอบไวนเฉือนใช้ในกรณีของดินเหนียวที่มีสภาพไม่แข็งแรงนัก เครื่องมือประกอบด้วย ไวนี่ดซึ่งทำจากเหล็กเหนียวกำลังสูง 4 แผ่น ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ไวนี่ดทั้ง 4 เชื่อมติดกับแกนเหล็กซึ่งอยู่ในแนวตั้ง ไวนี่ดยาวเป็น 2 เท่าของความกว้าง ขนาดของไวนี่ดที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 2 ขนาดคือ 110 x 55 และ 130 x 65 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.95 มิลลิเมตร รูปที่ 1.8 แสดงลักษณะของไวนี่ดซึ่งมีทั้งแบบ ไวนี่ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Vane) และไวนี่ดปลายสอบ (Tapered Vane)



ก. ไวนี่ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ข. ไวนี่ดปลายสอบ

รูปที่ 1.8 เครื่องมือสำหรับการทดสอบไวนี่ด

การทดสอบไบนีออนกระทำโดยกดไบนีออนลงไปในดินก้นหลุมเจาะ หมุนแกนเหล็กให้ไบนีออนหมุนตัดดินด้วยความเร็ว 0.1 องศาต่อวินาที ค่าแรงต้านสูงสุดของดินที่ได้เป็นความแข็งแรงไบนีออนแบบไม่ระบายน้ำของการทดสอบไบนีออน (Vane Shear Test Undrained Shear Strength, $c_{u(VST)}$) ค่าที่ได้นี้จะสูงกว่าค่าความแข็งแรงไบนีออนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, c_u) ที่แท้จริง จึงต้องปรับแก้โดยใช้สมการที่ 1.24

$$c_u = \lambda c_{u(VST)} \quad (1.24)$$

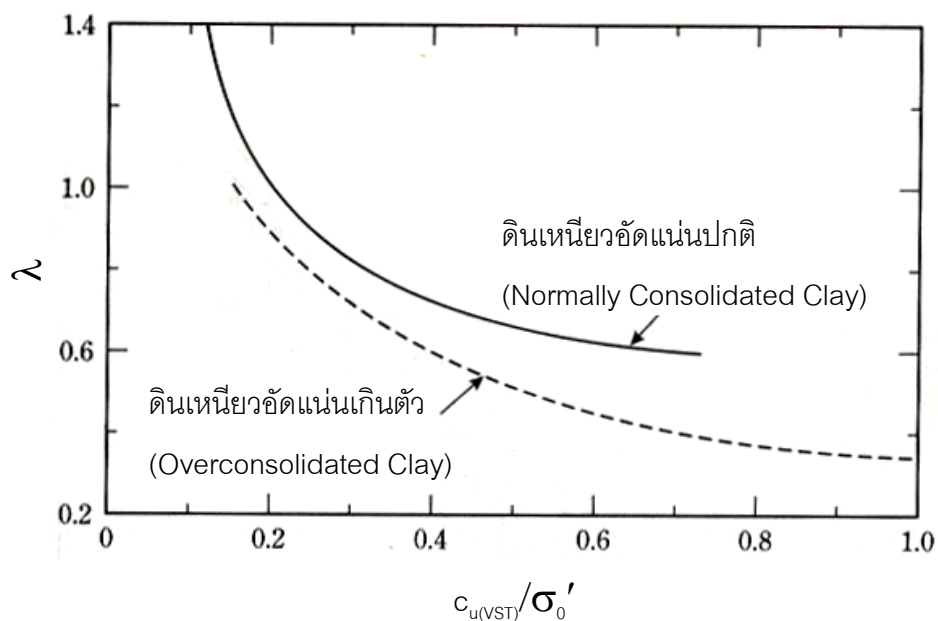
โดย λ คือค่าตัวประกอบสำหรับปรับแก้ซึ่ง Bjerrum (1972) แนะนำไว้ดังสมการที่ 1.25 และ Morris and Williams (1994) แนะนำไว้ดังสมการที่ 1.26 และ 1.27

$$\lambda = 1.7 - 0.54 \log(\text{PI}) \quad (\text{PI เป็น \%}) \quad (1.25)$$

$$\lambda = 1.18e^{-0.08(\text{PI})} + 0.57 \quad (\text{กรณี PI} > 5) \quad (1.26)$$

$$\lambda = 7.01e^{-0.08(\text{LL})} + 0.57 \quad (\text{LL เป็น \%}) \quad (1.27)$$

นอกจากนี้ ยังอาจหาค่า จากกราฟในรูปที่ 1.9 (Das et al., 1986)



รูปที่ 1.9 ค่าตัวประกอบสำหรับปรับแก้ผลการทดสอบไบนีออน

ค่าจากสนามของการทดสอบไบนารีเนียน สามารถนำไปประมาณค่า σ'_c และ OCR ได้จากสมการที่ 1.28 และ 1.29 ตามลำดับ (Mayne and Mitchell, 1988)

$$\sigma'_c = 7.04(c_{u(VST)})^{0.83} \quad (1.28)$$

$$OCR = \beta \frac{C_{u(VST)}}{\sigma'_0} \quad (1.29)$$

Mayne and Mitchell (1988), Hansbo (1957) และ Larsson (1980) ได้ให้ค่า β ในสมการที่ 1.30, 1.31 และ 1.32 ตามลำดับ

$$\beta = 22(PI)^{-0.48} \quad (1.30)$$

$$\beta = \frac{222}{w(\%)} \quad (1.31)$$

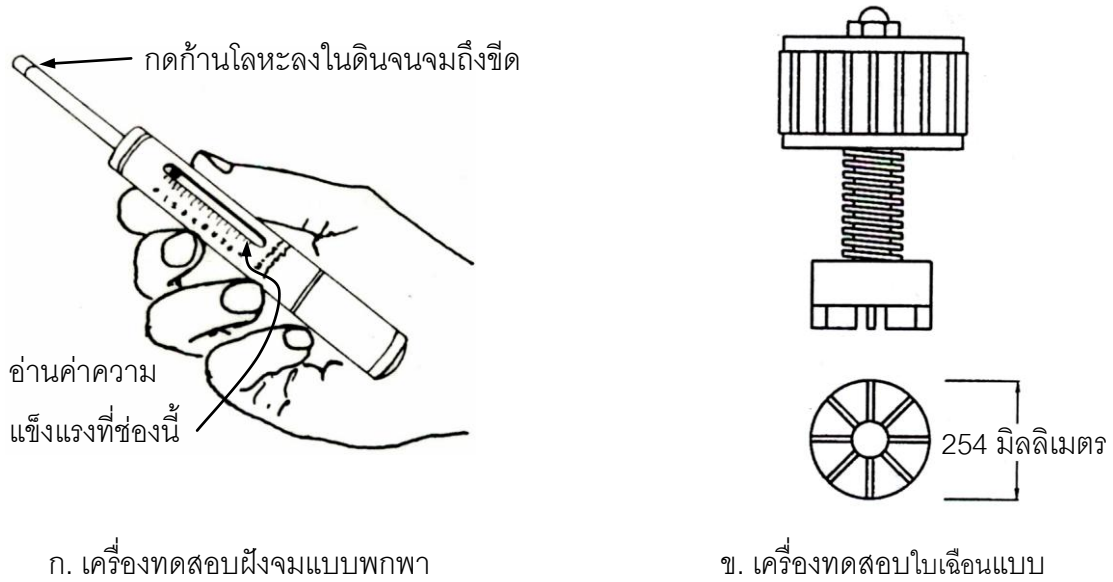
$$\beta = \frac{1}{0.08+0.0055(PI)} \quad (1.32)$$

1.5 การเก็บตัวอย่าง (Sample Collection)

1.5.1 ตัวอย่างเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample)

ตัวอย่างที่เก็บด้วยวิธีการขุด หรือเก็บจากส่วนในระหว่างการเจาะสำรวจชั้นดิน เป็นตัวอย่างที่มีสภาพเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพดั้งเดิม ตัวอย่างเปลี่ยนสภาพนี้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางวิศวกรรมบางอย่าง เช่น กำลังรับแรงเฉือน ฯลฯ ได้ แต่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบหาการกระจายขนาดของเม็ดดิน พิกัดอัตราเบร็ก ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และปริมาณความชื้นตามธรรมชาติได้ นอกจากนี้ หากตัวอย่างที่ได้จากกระบอกเก็บตัวอย่างแบบผ่าซีกในการทำ SPT มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและไม่มีการแตก ถึงแม้จะเป็นตัวอย่างที่ถูกรบกวนแต่อาจใช้ในการประมาณหน่วยน้ำหนักของดินได้โดยการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก และอาจทดสอบหาค่าความแข็งแรงจากเครื่องมือทดสอบขนาดเล็กบางประเภทเพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำได้ เช่น เครื่องทดสอบฝังจมแบบพกพา (Pocket Penetrometer) และเครื่องทดสอบไบนารีเนียนแบบพกพา (Torvane) ดังแสดงในรูปที่ 1.10 ก. และ ข. ตามลำดับ

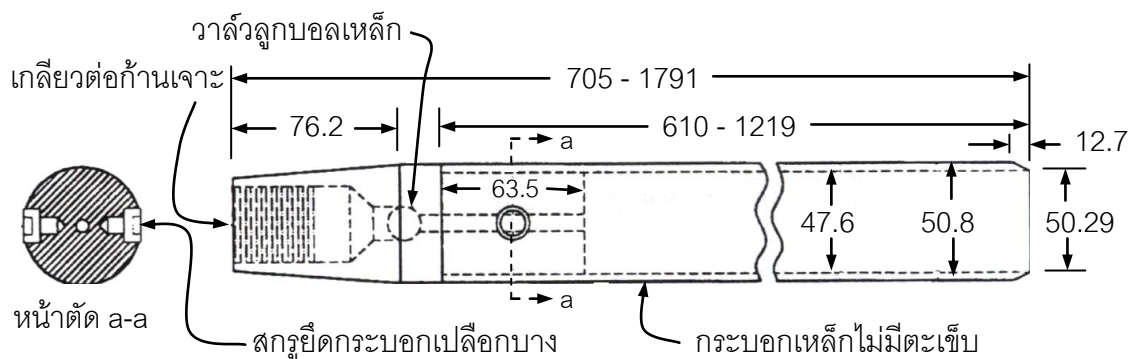
เครื่องมือ 2 ชนิดนี้อาจใช้ในการทดสอบดินที่ผนังบ่อขุดได้ ควรระลึกไว้เสมอว่าตัวอย่างดินจากกระบอกเก็บตัวอย่างแบบผ่าซีกเป็นตัวอย่างที่ถูกรบกวน คุณสมบัติของดินที่ได้จากการทดสอบบนตัวอย่างนี้จึงมีความคลาดเคลื่อนสูง จึงควรประมาณคุณสมบัติของดินโดยวิธีอื่นประกอบด้วย



รูปที่ 1.10 เครื่องมือทดสอบในสนามขนาดเล็ก

1.5.2 ตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample)

การทราบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่สำคัญบางอย่าง เช่น ความแข็งแรง ลักษณะการทรุดตัว ฯลฯ จำเป็นต้องหาจากการทดสอบบนตัวอย่างที่มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพตามธรรมชาติมากที่สุด ในกรณีของดินเหนียวอ่อนนิยมเก็บตัวอย่างโดยกดกระบอกเปลือกบาง (Thin-Walled Tube) ดังรูปที่ 1.11 ลงไปในดินอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง



รูปที่ 1.11 กระบอกเปลือกบาง (มิติที่แสดงมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

เนื่องจากความหนาของกระบอกเก็บตัวอย่างเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอก มีผลต่อคุณภาพของตัวอย่าง ดังนั้นจึงกำหนดให้อัตราส่วนพื้นที่ของกระบอก (Area Ratio, A_r) ตามสมการที่ 1.33 ควรมีค่าระหว่าง 0.10 ถึง 0.15 สำหรับดินเหนียวทั่วไป และควรมีค่าประมาณ 0.10 สำหรับดินเหนียวที่ไวต่อการสูญเสียกำลัง (Das, 2004)

$$A_r = \frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2} \quad (1.33)$$

โดย D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของกระบอกเก็บตัวอย่าง

D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกเก็บตัวอย่าง

เมื่อเก็บตัวอย่างโดยกระบอกเปลือกบางแล้ว จะปิดผิวหน้าดินด้วยซีเมนต์หรือฝายางกันความชื้น ก่อนนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

ในกรณีที่ต้องการเก็บตัวอย่างที่ระดับไม่ลึกมาก การเก็บตัวอย่างคงสภาพอีกวิธีหนึ่งคือการขุดดินเป็นก้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Block Sample) ใส่กล่องไม้แล้วเทซีเมนต์ลงในช่องว่างระหว่างดินกับกล่อง ขนาดที่นิยมเก็บคือ 30 เซนติเมตร ในกรณีที่เป็นดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ เช่นดินที่มีปริมาณทรายหรือทรายแป้งสูง อาจเก็บขนาดใหญ่กว่าและก่อนการตัดแต่งตัวอย่างเพื่อการทดสอบควรนำไปแช่แข็งก่อน เพราะดินประเภทนี้แตกออกจากกันได้ง่าย

1.6 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test)

ตัวอย่างดินที่เก็บมาจากการเจาะสำรวจ ทั้งแบบเปลี่ยนสภาพและคงสภาพ จะนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินซึ่งสามารถแบ่งการทดสอบได้เป็น 2 กลุ่ม คือการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน และการทดสอบหาคุณสมบัติเฉพาะ

1.6.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic Property Test)

คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมที่จำเป็นต่อการจำแนกประเภทดินคือ ปริมาณความชื้นในสภาพธรรมชาติของดิน การกระจายขนาดของเม็ดดิน พิกัดพลาสติกและพิกัดเหลว อาจมีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินด้วยหากต้องการนำไปประกอบการวิเคราะห์บางอย่าง เช่น การหุ้ดตัวของดิน เป็นต้น การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานนี้ สามารถใช้ตัวอย่างเปลี่ยนสภาพได้

1.6.2 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเฉพาะ (Specific Property Test)

ในการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมปฐพีที่สำคัญ จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์บางตัวเพื่อความถูกต้องของการออกแบบ ซึ่งต้องใช้ตัวอย่างคงสภาพในการทดสอบ เช่น พารามิเตอร์ของการทดสอบตัว และความแข็งแรง เป็นต้น

เนื่องจากการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของดินนั้นมีหลายวิธี ทำให้พารามิเตอร์ที่ได้มีหลายประเภทตามแต่เงื่อนไขของการทดสอบ เช่น ความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, c_u) และมุมของแรงเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle, ϕ') เป็นต้น ในที่นี้จึงจะสรุปลักษณะของการทดสอบและพารามิเตอร์ความยืดหยุ่น (Elastic Parameter) ไว้ เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหาและการออกแบบ (ASCE, 1994)

1.6.2.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของยัง (Elastic Young's Modulus)

วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) จะมีอัตราการเพิ่มของความเครียดคงที่ตามการเพิ่มของความเค้นดังสมการที่ 1.34

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \sigma_z \quad (1.34)$$

โดย E เป็นค่าคงที่เรียกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของยัง ซึ่งดินไม่ได้มีคุณสมบัติตามนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเสียรูปของดินที่จะไม่คืนกลับสู่สภาพเดิมเหมือนโลหะ แต่ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีมักสมมุติว่าดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎของฮุก โมดูลัสยืดหยุ่นของดินสามารถหาได้จากการทดสอบหลายวิธีดังแสดงในตารางที่ 1.9 และแสดงเป็นเส้นทางความเค้น (Stress Path) ดังรูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสประเภทต่างๆ แสดงในสมการที่ 1.35 ถึง 1.37 โดยที่ ν คืออัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

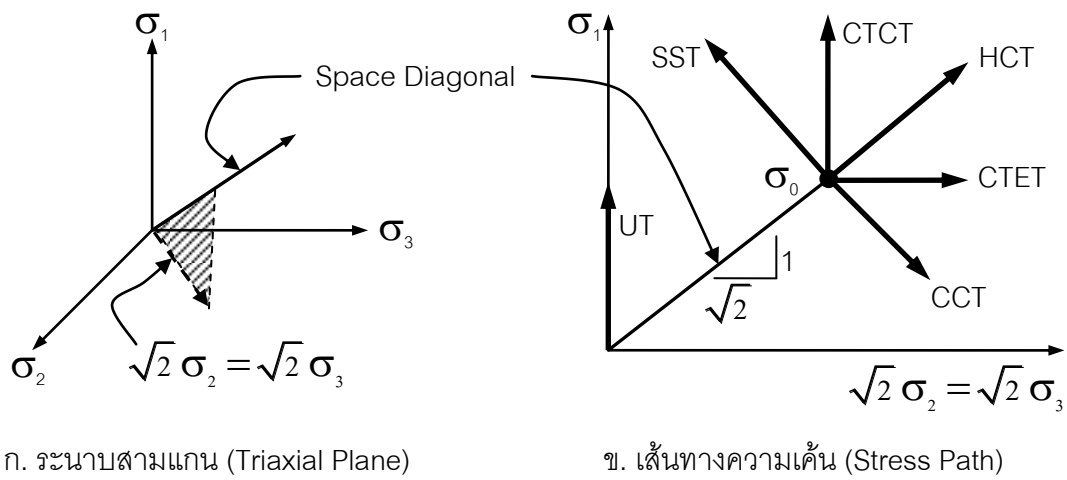
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.35)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1.36)$$

$$E_d = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1.37)$$

ตารางที่ 1.9 การทดสอบดินด้วยวิธีต่างๆ และพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

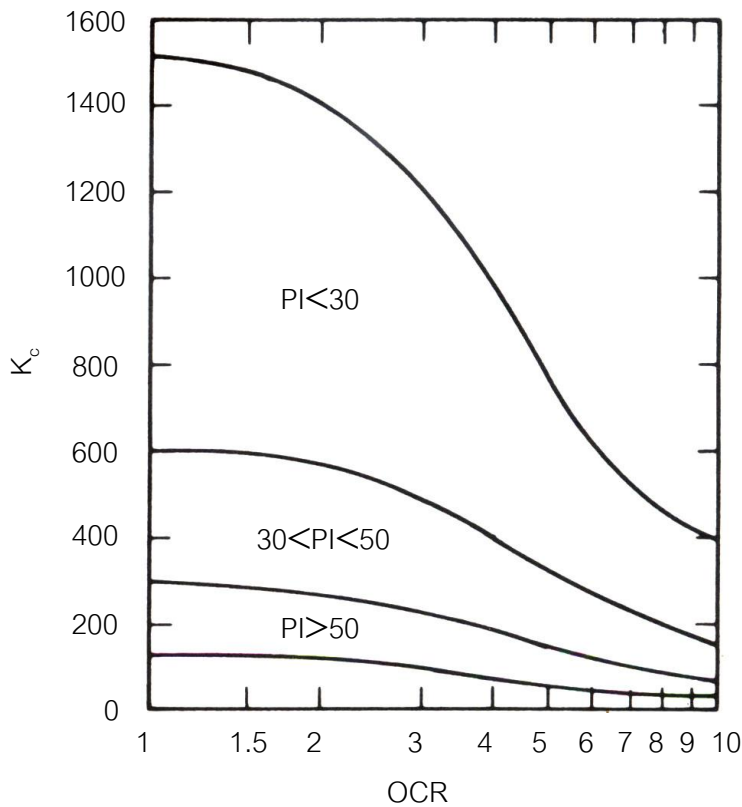
การทดสอบ	ลักษณะของการทดสอบ	แผนภูมิ
ทดสอบแกนเดียว (Uniaxial Test, UT)	เพิ่มความเค้น σ_1 โดยที่ σ_2 และ σ_3 เป็นศูนย์ ได้ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus, E)	
ทดสอบแรงอัดด้วยน้ำ (Hydrostatic Compression Test, HCT)	เพิ่มความเค้น σ_1, σ_2 และ σ_3 เป็น σ_0 เท่ากัน โดยที่ $\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ ได้ค่าโมดูลัสรวม (Bulk Modulus, K)	
ทดสอบเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear Test, SST)	ให้ความเค้น σ_1, σ_2 และ σ_3 เป็น σ_0 เท่ากัน จากนั้นเปลี่ยนความเค้นใน 2 ทิศทาง เช่น $\Delta\sigma_1 = -\Delta\sigma_3$ และ $\Delta\sigma_2 = 0$ ได้ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus, G)	
ทดสอบแรงอัดแบบจำกัดขอบเขต (Confined Compression Test, CCT)	เพิ่มความเค้น σ_1 โดยที่ $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ เหมือนการทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำ (Consolidation Test) ได้ค่าโมดูลัสแบบถูกควบคุม (Constrained Modulus, E_d)	
ทดสอบแรงอัดสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional Triaxial Compression Test, CTCT)	ให้ความดันด้านข้างดินจนความเค้นที่กระทำทั้งสามแกนเป็น σ_0 เท่ากัน เพิ่ม σ_1 ขณะที่ σ_2 และ σ_3 คงที่ ได้ค่าโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus, E_t) ของการอัด	
ทดสอบแรงดึงสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional Triaxial Extension Test, CTET)	ให้ความดันด้านข้างน้ำรอบดินจนความเค้นที่กระทำทั้งสามแกนเป็น σ_0 เท่ากัน เพิ่ม σ_2 และ σ_3 เท่าๆกัน ขณะที่ σ_1 คงที่ ได้ค่าโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus, E_t) ของการดึง	



รูปที่ 1.12 เส้นทางความเค้นของการทดสอบดินด้วยวิธีต่างๆ

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E_s) ในสภาพไม่ระบายน้ำของดินเหนียว อาจประมาณได้จากค่า c_u ได้จากสมการที่ 1.38 ซึ่งค่า K_c ในสมการนี้ได้จากกราฟในรูปที่ 1.13

$$E_s = K_c c_u \quad (1.38)$$



รูปที่ 1.13 ค่าของ K_c สำหรับสมการที่ 1.38

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถประมาณจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินด้วยแผ่นเหล็ก (Plate Bearing Test) ได้ดังสมการที่ 1.39

$$E_s = \frac{(1 - \nu^2)}{\frac{\Delta \rho}{\Delta q_p}} B_p I_w \quad (1.39)$$

โดย ν = อัตราส่วนปัวซอง = 0.4

$\frac{\Delta \rho}{\Delta q_p}$ = ความลาดชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่กระทำต่อแผ่นเหล็กกับการทรุดตัวหน่วยเป็นนิ้วและปอนด์ต่อตารางนิ้ว

B_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก หน่วยเป็นนิ้ว

I_w = ค่าตัวประกอบอิทธิพล (Influence Factor) = $\pi/4$ สำหรับแผ่นเหล็กทรงกลม

หมายเหตุ อัตราส่วนปัวซองของดินมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.49 โดยที่ 0.49 เป็นค่าของดินอิ่มตัว ค่าที่ควรใช้สำหรับดินทั่วไปคือ 0.4 ซึ่งความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ปัญหาในงานดินเนื่องจากการใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองต่างกันนั้น มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความแปรปรวนของข้อมูลอื่น

ค่าโมดูลัสแบบถูกควบคุม (Constrained Modulus, E_d) สามารถประมาณได้จากผลการทดสอบด้วยหัวกดปลายกรวยดังสมการที่ 1.40

$$E_d = \alpha_c q_c \quad (1.40)$$

โดย α_c = ค่าปรับแก้แสดงในตารางที่ 1.10

q_c = แรงต้านที่ปลายกรวย (Cone Resistance)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายหน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต สามารถประมาณจากผลการทดสอบฝั่งจมมาตรฐานดังสมการที่ 1.41 ค่า N ควรเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบหลายระดับ

$$E_s = 9.4 N^{0.87} \sqrt{B} \left(1 + 0.4 \frac{D}{B} \right) \quad (1.41)$$

โดย B = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

D = ความลึกของฐานรากจากผิวดิน หน่วยเป็นฟุต

ตารางที่ 1.10 ค่า สำหรับสมการที่ 1.39

ประเภทดิน	q_c , ตันต่อตารางฟุต	α_c
ดินเหนียว (CL)	<7	3-8
ดินเหนียว (CL)	7-20	2-5
ดินเหนียว (CL)	>20	1-2.5
ทรายแป้ง (ML)	<20	3-6
ทรายแป้ง (ML)	>20	1-3
ดินเหนียวหรือทรายแป้งที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH, MH)	<20	2-6
ทราย	<50	2-4
ทราย	>100	1.5
ทรายเป็นดินเหนียว	-	3-6
ทรายเป็นทรายแป้ง	-	1-2
ซอล์ค	20-30	2-4

1.7 สรุป (Conclusion)

การสำรวจชั้นดินเป็นงานที่จำเป็นต่องานวิศวกรรมโยธา อาจมีผู้มองว่าเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย แต่ในความเป็นจริงแล้ว การทราบข้อมูลของชั้นดินกลับช่วยให้ประหยัดได้มาก เพราะสามารถออกแบบและวางแผนการก่อสร้างได้เหมาะสมและถูกต้อง สามารถคาดคะเนปัญหาและหาแนวทางแก้ไขไว้ล่วงหน้าได้ วิธีและปริมาณการสำรวจชั้นดินมีหลากหลาย วิศวกรต้องพิจารณาเลือกใช้ตามความเหมาะสมของขนาดและความสำคัญของงานก่อสร้าง

การทดสอบเพื่อทราบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เป็นสิ่งจำเป็นต่อการนำไปเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบ วิศวกรต้องเข้าใจเงื่อนไขของงานเพื่อให้สามารถเลือกวิธีการทดสอบให้เหมาะสมได้ และต้องเข้าใจในผลของการทดสอบที่ได้มาด้วยว่าอยู่ในเงื่อนไขใด และเมื่อนำไปแปรผลเป็นพารามิเตอร์ด้วยวิธีต่างๆ ต้องเข้าใจเงื่อนไขของวิธีนั้นๆ อย่างชัดเจน เช่น บางวิธีใช้ได้กับดินเหนียวเท่านั้น เป็นต้น

1.8 เอกสารอ้างอิง (Reference)

- 1) Das, G., Lacasse, S., Lunne, I., and Hoeg, K. (1986), "Use of In Situ Tests for Foundation Design in Clay", Proc. of In Situ'86, ASCE, pp.1-30.
- 2) ASCE (1972), "Subsurface Investigation for Design and Construction of Foundations of Buildings", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE Vol.98, No.SM5, pp. 481-490.
- 3) ASCE (1994), "Settlement Analysis (Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the US Army Corps of Engineering, No.9)", ASCE Press, USA.
- 4) Bjerrum, L. (1972), "Embankment on Soft Ground", Proc. of the Specialty Conference, ASCE, Vol.2, pp.1-54.
- 5) Bowles, J.E. (1997), "Foundation Analysis and Design 5th Ed.", McGraw-Hill, Singapore.
- 6) Cubrinovski, M., and Ishihara, K., (1999), "Empirical Correlations between SPT N-Values and Relative Density for Sandy Soils", Soils and Foundations, Vol.39, No.5, pp.61-92.
- 7) Das, B.M. (2004), "Principles of Foundation Engineering 5th Ed.", Thomson Learning Inc., USA.
- 8) Gabriel, K. (2001), "What's on the agenda", Ground Engineering, 34(7), pp.22-23.
- 9) Hansbo, S. (1957), "A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall Cone Test", Swedish Geotechnical Institute, Report No.114.
- 10) Hatanaka, M., and Uchida, A. (1996), "Empirical Correlation between Penetration Resistance and Internal Friction Angle of Sandy Soils", Soils and Foundations, Vol.36, No.4, pp. 1-10.
- 11) Hara, A., Ohata, T., and Niwa, M. (1971), "Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils", Soils and Foundations, Vol.14, No.3, pp. 1-12.
- 12) Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., and Lancellotta, R. (1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", Proc. of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp. 57-153.
- 13) Kulhawy, F.H., and Mayne, P.W. (1990), "Manual of Estimating Soil Properties for Foundation Design", Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA.

- 14) Larsson, R. (1980), "Undrained Shear Strength in Stability Calculation of Embankments and Foundations on Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol.17, pp.591-602.
- 15) Liao, S.S.C., and Whitman, R.V. (1986), "Overburden Correction Factors for SPT in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.112, No.3, pp. 373-377.
- 16) Marcuson, W.F., III, and Bieganousky, W.A. (1977), "SPT and Relative Density in Course Sands", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.103, No.11, pp. 1295-1309.
- 17) Mayne, P.W., and Kemper, J.B. (1988), "Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT", Geotechnical Testing Journal, ASCE, Vol.11, No.2, pp.139-147.
- 18) Mayne, P.W., and Mitchell, J.K. (1988), "Profiling of Overconsolidation Ratio in Clay by Field Vane", Canadian Geotechnical Journal, Vol.25, No.1, pp.150-158.
- 19) Morris, P.M., and Williams, D.T., (1994), "Effective Stress Vane Shear Test Correction Factor Correlations", Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, No.3, pp.335-342.
- 20) Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H., (1974), "Foundation Engineering 2nd", Wiley, USA.
- 21) Seed, H.B., Arango, I., and Chan, C.K. (1975) "Evaluation of Soil Liquefaction Potential During Earthquakes" Report No. EERC 75-28, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- 22) Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.12, pp. 1425-1445.
- 23) Sewers, G.F. (1979), "Introductory Soil Mechanics and Foundations 4th Ed.", Macmillan Publishing Co., Inc., USA.
- 24) Simons, N., Menzies, B. and Matthews, M. (2000), " A Short Course in Geotechnical Site Investigation", Thomas Telford Ltd., Great Britain.
- 25) Skempton, A.W. (1986), "Standard Penetration Test Procedures and the Effect in Sands of Overburden Pressure, Relative density, Particle Size, Aging and Overconsolidation", Geotechnique, Vol.36, No.3, pp.425-447.

26) Stroud, M. (1974), "SPT in Insensitive Clays", Proc. of European Symposium on Penetration Testing, Vol.2.2, pp.367-375.

27) คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี (2545), "แนวทางการตรวจสอบชั้นดินเพื่องานฐานราก", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.