

คู่มือ วิศวกรรม ฐานราก



FOUNDATION
ENGINEERING
HANDBOOK

ดร.พัลลภ วิสฤทธิเมธานุกุล

คู่มือวิศวกรรมฐานราก

โดย ดร.พัลลภ วิสฺฐธิเมธานุกุล

สงวนลิขสิทธิ์ในประเทศไทยตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2558 โดย ดร.พัลลภ วิสฺฐธิเมธานุกุล
ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ
ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

พัลลภ วิสฺฐธิเมธานุกุล, ดร.

คู่มือวิศวกรรมฐานราก. --กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2558.

1. ฐานราก. 2. ปฐพีกลศาสตร์.

I. ชื่อเรื่อง.

524.15

ISBN (e-book) : 978-616-08-2231-7

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย



บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา

เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260 โทรศัพท์ 0-2739-8000

[หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com]

คำนิยาม

ในฐานะวิศวกรโยธาที่ทำงานก่อสร้างมานานกว่า 46 ปี พบว่า ปัญหาในงานก่อสร้างงานโยธามักเป็นปัญหาด้านฐานราก ซึ่งก็จะเกี่ยวข้องกับงานปฐพีกลศาสตร์เป็นส่วนใหญ่ ความสลับซับซ้อนของคุณสมบัติของดิน หิน และน้ำใต้ดิน ล้วนท้าทายความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมฐานรากตลอดมา โดยเฉพาะงานอาคาร งานก่อสร้างเขื่อนอเนกประสงค์ งานถนน ทางวิ่งทางขับเครื่องบิน งานโยธาของงานรถไฟ รถไฟฟ้ายกระดับ รถไฟฟ้าบนดิน และรถไฟฟ้าใต้ดิน

ดร. พัลลภ วิสุทธิเมธานุกูล ผู้เขียนหนังสือ “คู่มือวิศวกรรมฐานราก” เล่มนี้ จบการศึกษาด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมปฐพี และธรณีเทคนิคเพื่อสิ่งแวดล้อม จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) และมหาวิทยาลัยเกียวโต ตามลำดับ ได้รับรางวัลเกียรติคุณ และทุนการศึกษาจากสถาบันที่มีชื่อเสียงทั้งในประเทศไทย และญี่ปุ่น หลังจากนั้นในช่วงเวลา 10 ปี ที่ผ่านมา ยังได้ทำงานออกแบบก่อสร้างกับบริษัทผู้รับเหมา และบริษัทที่ปรึกษาชั้นนำในต่างประเทศ จึงนับได้ว่าเป็นผู้มีความรู้และประสบการณ์ในด้านนี้อย่างแท้จริง ที่ได้มาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ออกมาในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น

ในหนังสือคู่มือเล่มนี้ ได้ลำดับเรื่องปูพื้นตั้งแต่คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดิน การสำรวจชั้นดินภาคสนาม น้ำใต้ดิน ฐานรากชนิดต่างๆ กำแพงกันดิน เข็มพืด การค้ำยัน เสถียรภาพของลาดดิน การปรับปรุงคุณภาพดิน การก่อสร้างอุโมงค์ การประเมินความเสียหาย และได้เพิ่มเติมเรื่อง ธรณีเทคนิคเพื่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเริ่มมีความสำคัญมากขึ้น รวมทั้งภาคผนวกที่สามารถจะใช้งานออกแบบ หรือใช้งานสนาม พร้อมด้วยตัวอย่างตารางคำนวณที่สะดวกในการจะนำไปใช้ได้ง่ายและรวดเร็ว

ในการทำงานโดยเฉพาะงานที่เกี่ยวข้องกับด้านปฐพีกลศาสตร์ เราจำเป็นต้องวิเคราะห์ให้แน่ใจว่าเรื่องใดที่เรารู้ เรื่องใดที่เราไม่รู้ เรื่องที่เราไม่รู้ เราจะต้องรับหาความรู้จากผู้ที่รู้จริง มาใช้ในการป้องกันหรือแก้ไข ปัญหาโดยเร็วที่สุด คู่มือเล่มนี้มีบทสรุปทั้ง 14 บท ที่ได้สรุปประเด็นที่สำคัญของแต่ละบทไว้อย่างกระชับและครบถ้วน จึงเป็นหนังสือคู่มือที่ควรมีไว้ใกล้ตัว ในขณะที่งานเมื่อเกิดข้อสงสัย หรืออยากรู้เรื่องใด ก็จะเปิดดูบทสรุปเพื่อหาหัวข้อที่เกี่ยวข้องได้อย่างรวดเร็ว เราก็จะทราบที่เรารู้จริงแค่ไหน ควรปรึกษาหรือหาผู้เชี่ยวชาญมาช่วยอย่างไร ก็จะเป็นการช่วยให้โครงการลุล่วงได้ตามเป้าหมาย

รัชชัย สุทธิประภา

กรรมการ รองประธานบริหารอาวุโส

บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน)



แต่คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และกัลยาณมิตร

คำนำ

ดินเป็นวัสดุที่มีความเก่าแก่และสลับซับซ้อนที่สุดทางด้านวิศวกรรมซึ่งเกิดจากการผุพังของหิน ดินถูกใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง รวมทั้งยังเป็นวัสดุที่รับแรงจากโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วย ดังนั้น วิศวกรจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติและพฤติกรรมของดินด้านต่างๆ เช่น ประเภทของดิน การไหลของน้ำผ่านดิน การยุบตัว การรับแรงเฉือน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง ฯลฯ เพื่อที่จะวิเคราะห์และออกแบบงานวิศวกรรมออกมาได้อย่างปลอดภัยและประหยัด

การใช้ปฐพีกลศาสตร์เข้าแก้ปัญหาทางวิศวกรรมฐานราก เป็นทั้งศาสตร์และศิลป์ ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์แตกต่างจากปัญหาในวิศวกรรมโครงสร้าง ซึ่งมีรูปแบบปัญหาที่ชัดเจนกว่าและมักจะมีคำตอบที่แน่นอน ความหลากหลายของคำตอบสำหรับปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์เกิดจากความจริงที่ว่า ดินมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนและมีคุณสมบัติที่ไม่แน่นอนในสภาพธรรมชาติ ดังนั้น จึงมีผู้นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ขึ้นมาเพื่อคาดเดาพฤติกรรมของดิน แต่ละทฤษฎีก็มีความเหมาะสมกับสภาพปัญหาแตกต่างกันไป วิศวกรจึงต้องใช้ทั้งความรู้ประสบการณ์ และวิจารณ์ญาณ เข้าแก้ไขปัญหอย่างเหมาะสม

หนังสือเล่มนี้ใช้สำหรับประกอบการเรียนการสอนวิชา วิศวกรรมฐานราก หรือ ปฐพีกลศาสตร์ประยุกต์ โดยให้ความสำคัญกับการคำนวณด้วยมือและการใช้ตารางคำนวณเป็นหลัก ซึ่งเป็นวิธีอนุรักษ์นิยม มีความปลอดภัยค่อนข้างสูง และยังเป็นพื้นฐานความเข้าใจในการคำนวณวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีอยู่มากมายในปัจจุบัน เนื้อหาสาระของหนังสือเล่มนี้เกิดจากประสบการณ์การทำงานของผู้เขียนในบริษัทก่อสร้างและบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาทั้งในและต่างประเทศ และการอ้างอิงตำราและบทความทางวิชาการที่ค่อนข้างหลากหลายทั้งในและต่างประเทศ และมีการดัดแปลงให้เหมาะสม คำอธิบายหลายๆ อย่างในหนังสือเป็นการทำเนื้อหาให้ง่ายต่อการใช้งานของผู้อ่านมากกว่าที่จะเน้นลงรายละเอียดลึกเกินไป

ผู้เขียนได้ให้คำศัพท์เทคนิคภาษาอังกฤษในวงเล็บตลอดทั้งเล่ม เนื่องจากเวลาทำงานจริง วิศวกรมักจะใช้คำทับศัพท์ภาษาอังกฤษเสียเป็นส่วนใหญ่ และเพื่อให้ผู้อ่านสามารถนำคำศัพท์ภาษาอังกฤษเป็นกุญแจในการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมจากตำรา มาตรฐานการออกแบบ บทความทางวิชาการ เอกสารภาษาอังกฤษต่างๆ รวมทั้งอินเทอร์เน็ตได้ อีกทั้งเพื่อต้อนรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนในปี พ.ศ. 2558 ด้วย

ผู้เขียนเริ่มเขียนหนังสือเล่มนี้มาตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2551 ในยามว่างจากงานประจำ และในวันหยุดพักผ่อน โดยขอขอบคุณภรรยาของผู้เขียน คุณดาวเรือง ลุมทอง ที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยผลักดันให้เขียนหนังสือเล่มนี้จนแล้วเสร็จ และยังช่วยตรวจสอบการใช้ภาษาไทยอย่างละเอียดด้วย ขอขอบคุณ คุณพลอย ลุมทอง และทีมงาน C'est Studio ที่ได้ช่วยออกแบบหน้าปกหนังสือเล่มนี้ ขอขอบคุณแหล่งความรู้ทางวิชาการต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องสมุดของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย หรือ AIT ที่เป็นแหล่งรวมความรู้อันมีค่ามากมาย ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเพื่อนร่วมงาน บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) และบริษัท พาร์สันส์ บรินเกอร์ฮอฟ จำกัด สาขาประเทศสิงคโปร์ ซึ่งเป็นองค์กรที่ผู้เขียนได้เรียนรู้ สังคมประสบการณ์ทำงานด้านวิชาชีพที่เป็นประโยชน์เพื่อนำมาถ่ายทอดแก่ผู้อ่านหนังสือเล่มนี้ และหากหนังสือเล่มนี้พอจะมีคุณประโยชน์แก่ผู้อ่านประการใด ผู้เขียนขอขอบคุณความดีนี้ให้แก่บิดา มารดา อันเป็นที่รัก ครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ทั้งที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และมหาวิทยาลัยเกียวโต และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ไม่สามารถเอ่ยชื่อได้หมด หากมีความผิดพลาดประการใดในหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แก้ไขต่อไป

ดร.พัลลภ วิสุทธ์เมธานุกุล

Special thanks are extended to Prof. Dennes T. Bergado, my former advisor at AIT, Prof. Masashi Kamon, my former advisor at Kyoto University, and Dr. Wong Kai Sin, my geotechnical advisor at Parsons Brinckerhoff, Singapore for their hospitality and valuable advice on academic and professional aspects.

Punlop Visudmedanukul

สารบัญ

คำนำ.....	3
สัญลักษณ์.....	7
การแปลงหน่วย.....	18

บทที่ 1 คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดิน 27

1.1	บทนำ	27
1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของดิน	28
1.3	การกระจายของขนาดเม็ดดิน	33
1.4	การหาพิสัยความชื้นเหลวของดินเม็ดละเอียด	37
1.5	การจำแนกประเภทดินแบบ USCS	41
1.6	การไหลของน้ำในดิน	47
1.7	หน่วยแรงในดิน	53
1.8	หน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล	54
1.9	การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว	58
1.10	กำลังรับแรงเฉือนของดิน	86
1.11	คุณสมบัติยึดหยุ่นของดิน	104
1.12	บทสรุป	111

บทที่ 2 การสำรวจชั้นดินภาคสนาม 115

2.1	บทนำ	115
2.2	จำนวน ระยะห่าง และความลึกหลุมเจาะ	116
2.3	การเจาะหลุมสำรวจในสนาม	118
2.4	การทดสอบดินในสนาม	123
2.5	การทดสอบบกระบอกทะลวงมาตรฐาน	123
2.6	การทดสอบไบนีตเฉือน	137
2.7	การทดสอบเจาะหยั่งด้วยหัวกรวย	141

22 คู่มือวิศวกรรมฐานราก

2.8	การเก็บตัวอย่างดิน	141
2.9	การทดสอบ Dilatometer	145
2.10	การทดสอบด้วยเครื่องอัดความดัน	147
2.11	การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในสนาม	149
2.12	บทสรุป	152

บทที่ 3 น้ำใต้ดิน..... 153

3.1	บทนำ	153
3.2	การวัดความดันน้ำในโพรงดิน	155
3.3	การทดสอบค่าการซึมในสนาม	156
3.4	การลดระดับน้ำใต้ดิน	162
3.5	การสูบน้ำบาดาลและการทรุดตัวของดิน	166
3.6	การไหลซึมของน้ำใต้ดินในแนวตั้ง	168
3.7	การไหลซึมของน้ำใต้ดินแบบ 2 มิติ	172
3.8	บทสรุป	181

บทที่ 4 ฐานรากตื้น..... 183

4.1	บทนำ	183
4.2	รูปแบบของการวิบัติ	183
4.3	ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานประลัยโดย Terzaghi	185
4.4	ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานประลัยโดย Meyerhof	187
4.5	ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานประลัยของดินเหนียวโดย Skempton	189
4.6	ผลกระทบของระดับน้ำใต้ดิน	190
4.7	การเลือกใช้ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานประลัย	191
4.8	กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้	191
4.9	ทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานอื่นๆ	196
4.10	ฐานรากรับแรงเยื้องศูนย์	201
4.11	การทรุดตัวของฐานรากตื้น	203
4.12	การทดสอบแรงกดบนแผ่นเหล็ก	232
4.13	การต้านทานแรงยกขึ้น	236
4.14	บทสรุป	239

บทที่ 5 ฐานรากยึด ฐานรากร่วม และฐานรากพรอม.....241

5.1	บทนำ	241
5.2	ฐานรากยึดร่วม	241
5.3	ฐานรากร่วม	245
5.4	ฐานรากพรอม	254
5.5	บทสรุป	264

บทที่ 6 ฐานรากเสาเข็ม.....265

6.1	บทนำ	265
6.2	ชนิดของเสาเข็ม	266
6.3	การติดตั้งเสาเข็ม	269
6.4	กลไกการถ่ายแรงสู่เสาเข็ม	275
6.5	กำลังเสาเข็ม	277
6.6	การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว	289
6.7	แรงเสียดทานจุดเสาเข็มลง	297
6.8	เสาเข็มรับแรงด้านข้าง	305
6.9	เสาเข็มรับแรงดึง	335
6.10	สูตรตอกเสาเข็ม	335
6.11	การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม	342
6.12	การทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์	349
6.13	เสาเข็มกลุ่มรับแรงอัด	351
6.14	เสาเข็มกลุ่มรับแรงด้านข้าง	354
6.15	เสาเข็มกลุ่มรับแรงเยื้องศูนย์กลาง	359
6.16	เสาเข็มเจาะลงไปในพื้นที่	361
6.17	บทสรุป	362

บทที่ 7 ความต้านทานข้างของดินและกำแพงกันดิน365

7.1	บทนำ	365
7.2	ความดันดินแบบดินไม่ซึ่บ	365
7.3	ความดันดินเชิงรุกตามทฤษฎี Rankine	370
7.4	ความดันดินเชิงรับตามทฤษฎี Rankine	375

24 คู่มือวิศวกรรมฐานราก

7.5	ความดันดินเชิงรุกตามทฤษฎี Coulomb	379
7.6	ความดันดินเชิงรับตามทฤษฎี Coulomb	387
7.7	ความดันด้านข้างของดินเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก	390
7.8	กำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง	392
7.9	กำแพงกันดินชนิดมีเสาเข็ม	405
7.10	เสถียรภาพของร่องชุดใช้น้ำโคลนเบนโทไนท์	407
7.11	กำแพงกันดินเสริมกำลัง	416
7.12	บทสรุป	429

บทที่ 8 กำแพงเข็มพืด..... 431

8.1	บทนำ	431
8.2	ประเภทของเข็มพืดและการติดตั้ง	432
8.3	กำแพงเข็มพืดชนิดคานยื่น	436
8.4	กำแพงเข็มพืดแบบมีสมอยึด	444
8.5	รูปแบบการวิบัติของกำแพงเข็มพืด	465
8.6	บทสรุป	466

บทที่ 9 งานชุดดินใช้ค้ำยันหลายระดับ 467

9.1	บทนำ	467
9.2	ประเภทของความดันด้านข้างของดินที่กระทำต่อระบบค้ำยัน	468
9.3	การออกแบบองค์ประกอบต่างๆ ของกำแพงเข็มพืดแบบมีค้ำยัน	474
9.4	การวิบัติเพราะแรงยกขึ้น	486
9.5	การปูดของดินเหนียวที่ระดับกันหลุม	487
9.6	การเดือดของทรายที่ระดับกันหลุม	493
9.7	เสถียรภาพของดินกำแพง	498
9.8	การเคลื่อนตัวของระบบค้ำยัน	502
9.9	กำแพงไดอะแฟรมในงานชุดดินลึก	506
9.10	บทสรุป	511

บทที่ 10 เสถียรภาพของลาดดิน 513

10.1	บทนำ	513
------	------	-----

10.2	ประเภทของการวิบัติ	513
10.3	อัตราส่วนปลอดภัย	515
10.4	เสถียรภาพของลาดดินไร้ขอบเขต	515
10.5	เสถียรภาพของลาดดินจำกัดขอบเขต	520
10.6	เสถียรภาพของลาดดินเสริมกำลัง	538
10.7	บทสรุป	548

บทที่ 11 การปรับปรุงคุณภาพดิน551

11.1	บทนำ	551
11.2	การบดอัดดิน	552
11.3	การไถหน้าหนักให้ดินทรุดก่อนใช้งาน	565
11.4	เสาเข็มดินเม็ดหยาบ	579
11.5	เสาเข็มดิน-ซีเมนต์	580
11.6	การป้องกันดินทรายแปลงสภาพเป็นของเหลว	589
11.7	บทสรุป	597

บทที่ 12 ธรณีเทคนิคเพื่อสิ่งแวดล้อม599

12.1	บทนำ	599
12.2	การปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน	600
12.3	ทฤษฎีการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน	604
12.4	หลุมฝังกลบขยะ	619
12.5	กำแพงสกัดสารปนเปื้อน	627
12.6	ประสิทธิภาพของชั้นกันซึมและกำแพงสกัดสารปนเปื้อน	629
12.7	บทสรุป	643

บทที่ 13 การก่อสร้างอุโมงค์645

13.1	บทนำ	645
13.2	การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี NATM	645
13.3	การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะอุโมงค์	647
13.4	การเสถียรภาพของอุโมงค์และการทรุดตัวของดิน	650
13.5	แรงในคานอุโมงค์	660

26 คู่มือวิศวกรรมฐานราก

13.6	เสถียรภาพหน้าอุโมงค์	674
13.7	เสถียรภาพอื่นๆ	680
13.8	รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล	684
13.9	บทสรุป	688

บทที่ 14 การประเมินความเสียหาย 689

14.1	บทนำ	689
14.2	พิกัดการหลุดตัวที่ยอมรับได้ของอาคาร	689
14.3	การประเมินความเสียหาย 3 ขั้นตอน	694
14.4	การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในสนาม	709
14.5	การสันนิษะเทียบ	714
14.6	บทสรุป	715

ภาคผนวก..... 717

ก. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลัง	719
ข. คุณสมบัติของรูปหน้าตัดและวัสดุ	726
ค. พารามิเตอร์ของมวลหิน	730
ง. ตัวอย่างตารางคำนวณ	737

บรรณานุกรม..... 761

บรรณานุกรม..... 777

คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดิน

GEOTECHNICAL PROPERTIES

1.1 บทนำ

ความหมายของวิศวกรรมธรณีเทคนิค หรือ Geotechnical Engineering คือ การประยุกต์ใช้ความรู้ทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) ธรณีวิทยา และชลศาสตร์ เข้ามาใช้วิเคราะห์ปัญหาและออกแบบโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับดิน เช่น ถนน สะพาน เขื่อน ฐานราก อุโมงค์ หลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรม ฯลฯ เพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัย ประหยัด และเหมาะสมที่สุด

คุณสมบัติของดินมีความสลับซับซ้อนกว่าวัสดุที่ผลิตโดยมนุษย์ เช่น คอนกรีต หรือเหล็ก คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดิน (Geotechnical Properties) เช่น การกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain-Size Distribution) ความเป็นพลาสติก (Plasticity) การยุบตัวได้ (Compressibility) และกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรือการทดสอบภาคสนาม (In-situ Tests) วิศวกรจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติเหล่านี้เป็นพื้นฐาน ก่อนที่จะนำพารามิเตอร์ที่หาได้จากการทดสอบมาใช้ในการวิเคราะห์หรือออกแบบงานวิศวกรรมฐานราก (Foundation Engineering) ต่อไป

เนื้อหาในบทแรกนี้ จึงเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นฐานทางธรณีเทคนิคของดิน ที่จำเป็นต้องรู้ รวมถึงการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ ก่อนที่จะกล่าวถึงการทดสอบภาคสนามต่างๆ ในบทต่อไป เช่น การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) การทดสอบใบมีดเฉือน และการตีความข้อมูลดิบจากการทดสอบ ซึ่งถือได้ว่ามีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการเลย



1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของดิน (Phase Relationship)

มวลดิน (Soil Mass) หรือเรียกสั้นๆ ว่าดิน (Soil) โดยธรรมชาติแล้วประกอบขึ้นจาก 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และก๊าซ (Gas) โดยของแข็งคือ เม็ดดิน (Soil Particle หรือ Soil Grain) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ของเหลวคือ น้ำในโพรง (Pore Water) และก๊าซคือ อากาศ (Air)

ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) จะถือว่ามีแค่ 2 องค์ประกอบคือ เม็ดดินและน้ำเท่านั้น ดินแห้ง (Dry Soil) คือ ดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินและอากาศ ส่วนดินไม่อิ่มน้ำ (Unsaturated Soil) จะมีครบทั้ง 3 องค์ประกอบ สิ่งที่น่ารู้คือ ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Theory) และทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Theory) ของดินที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน จะมีพื้นฐานมาจากการพิจารณาดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นหลัก

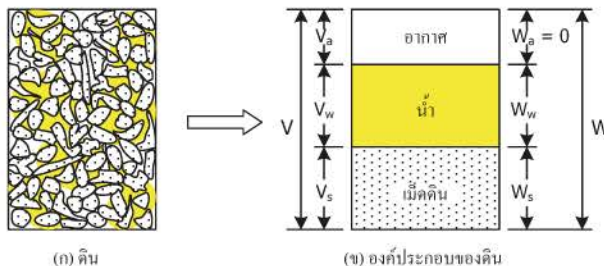
เมื่อพิจารณาปริมาตรทั้งหมดของดิน (V) จะประกอบด้วยปริมาตรของแข็ง (V_s) ปริมาตรน้ำ (V_w) และปริมาตรอากาศ (V_a) ดังนี้

$$V = V_s + V_v = V_s + (V_w + V_a)$$

โดยที่ V_v คือปริมาตรของโพรงดิน (Void Volume) หมายความว่าโพรงดินประกอบด้วยอากาศและน้ำ

เมื่อพิจารณาน้ำหนักของดิน (W) จะประกอบด้วยน้ำหนักของแข็ง (W_s) และ น้ำหนักน้ำ (W_w) เนื่องจากน้ำหนักอากาศถือเป็นศูนย์ ($W_a = 0$) กล่าวคือ

$$W = W_s + W_w$$



● รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของดิน

จากรูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของดิน สามารถนิยามได้เป็นสมการในรูปตัวแปรที่แตกต่างกัน ซึ่งจำเป็นจะต้องจำและนำไปใช้ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณน้ำ หรือความชื้นในดิน (Water or Moisture Content) เป็นสัดส่วนของน้ำหนักของน้ำในดินต่อน้ำหนักของเม็ดดิน ปกติจะเขียนเป็นเปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 3 ถึง 70%

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

ความชื้นในดินถือเป็นพารามิเตอร์ที่หาได้ง่ายที่สุด โดยการนำตัวอย่างดินไปใส่ในตู้อบ ที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างลดลงจนคงที่แล้วชั่งทันที น้ำหนักที่หายไปคือ W_w ส่วนน้ำหนักของดินแห้งคือ W_s

2. อัตราส่วนโพรงดิน (Void Ratio) เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาตรโพรงดินต่อปริมาตรของเม็ดดิน ปกติจะเขียนอยู่ในรูปทศนิยม ดินทั่วไปมีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 1.5 ดินเหนียวมีค่าระหว่าง 0.7 ถึง 2.0

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

■ ตารางที่ 1.1 อัตราส่วนโพรงดินและปริมาณน้ำของดินตามธรรมชาติส่วนใหญ่

ชนิดของดิน	อัตราส่วนโพรงดิน	ปริมาณน้ำที่สภาวะอิ่มตัว
ทรายหยาบ	0.65 – 0.8	25 – 30
ทรายแน่น	0.4 – 0.45	15 – 16
ดินเหนียวอ่อน	0.9 – 1.4	30 – 50
ดินเหนียวแข็ง	0.6	20
ดินลมหอบ	0.9	25
ดินเหนียวอินทรีย์อ่อน	2.5 – 3.2	90 – 120

3. ความพรุน (Porosity) เป็นสัดส่วนของปริมาตรโพรงดินต่อปริมาตรทั้งหมด อาจแสดงเป็นทศนิยมหรือเปอร์เซ็นต์ก็ได้ ส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 9 ถึง 60%

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e}$$

อนึ่ง ค่า $1 + e$ เรียกว่าปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

4. ระดับการอิ่มน้ำ (Degree of Saturation) เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรโพรงดิน มักจะแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 2 ถึง 100%

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

ถ้า $S = 100\%$ แสดงว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ถ้า $S = 0$ แสดงว่าดินแห้งสนิทไม่มีน้ำในโพรงดินเลย ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก อนึ่ง สมการความสัมพันธ์อีกอันหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับ S และจำเป็นต้องรู้คือ

$$Se = wG_s$$

30 คู่มือวิศวกรรมฐานราก

โดยที่ G_s คือความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ซึ่งการแทนค่า S , e และ w ในสมการนี้ต้องอยู่ในรูปทศนิยมเท่านั้น หากดินอิ่มน้ำ S จะมีค่าเท่ากับ 1.0 ดังนั้น $e = wG_s$

5. ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) เป็นสัดส่วนของน้ำหนักเม็ดดินต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน หรือ

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

โดยที่ γ_w คือหน่วยน้ำหนักของน้ำมีค่าเท่ากับ 9.81 kN/m^3 ค่าความถ่วงจำเพาะเม็ดดินของดินส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 2.6 ถึง 2.8 ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลอง แต่ถ้าไม่ทราบค่าก็สามารถสมมุติค่าประมาณเท่ากับ 2.65 สำหรับทราย และ 2.7 – 2.8 สำหรับดินเหนียวได้ อนึ่ง สิ่งที่น่ารู้คือความถ่วงจำเพาะของน้ำเท่ากับ 1.0 ของน้ำทะเลเท่ากับ 1.025 ของเหล็กเท่ากับ 7.85 และของปรอทเท่ากับ 13.6

6. หน่วยน้ำหนักของดิน (Unit Weight) คือ น้ำหนักของดินต่อหน่วยปริมาตร สมการทั่วไปสำหรับหน่วยน้ำหนักของดินที่ทุกสภาวะความชื้น (Bulk Unit Weight หรือ Total Unit weight) เขียนอยู่ในรูปดังนี้

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + e}$$

ซึ่งสามารถนำมาแยกพิจารณาเป็นกรณีต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

(ก) กรณีดินแห้ง (Dry Unit Weight) กล่าวคือ $w = 0$ และ $S = 0$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_t}{1 + w} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$$

(ข) กรณีดินอิ่มน้ำ (Saturated Unit Weight) $S = 1.0$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1 + e}$$

นอกจากนี้ยังมีหน่วยน้ำหนักประสิทธิภาพ (Effective Unit Weight, γ') ซึ่งนิยามดังนี้

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$$

7. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) เป็นตรรกะหนึ่งแบบหนึ่งที่ใช้อธิบายระดับความแน่น (Denseness) ของดินเม็ดหยาบ (Coarse-Grained Soil) ที่มีดินเม็ดละเอียด (Fine-Grained Soil) ปะปนอยู่ไม่เกิน 15%

$$D_r (\%) = \frac{e_{\text{max}} - e}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \times 100$$

โดยที่ $e_{\max}$ คืออัตราส่วนโพรงดินในสภาพหลวมที่สุด และ $e_{\min}$ คืออัตราส่วนโพรงดินในสภาพแน่นที่สุด ขณะที่ e คืออัตราส่วนโพรงดินตามธรรมชาติ ค่า $e_{\max}$ และ $e_{\min}$ สามารถหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน ASTM D-4253 และ D-4254 สำหรับทราย ค่า $e_{\max}$ มีค่าประมาณ 0.75 – 1.0 และ $e_{\min}$ ประมาณ 0.38 – 0.5

ความแน่นของดินเม็ดหยาบสามารถจำแนกได้ตามค่าของความหนาแน่นสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 1.2 นี้

■ ตารางที่ 1.2 ระดับความแน่นของดินเม็ดหยาบ

ความแน่น	γ_r (kN/m ³)	D_r (%)
หลวมมาก (Very Loose)	11 - 16	0 - 15
หลวม (Loose)	14 - 18	16 - 35
แน่นปานกลาง (Medium)	17 - 20	36 - 65
แน่น (Dense)	19 - 22	66 - 85
แน่นมาก (Very Dense)	> 20	86 - 100

▼ ตัวอย่างที่ 1.1

ตัวอย่างดินถูกเก็บขึ้นมาจากกันแม่น้ำและนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินหนัก 523 กรัม นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนได้น้ำหนักคงที่เท่ากับ 415 กรัม จงหา (ก) ปริมาณน้ำในดิน (ข) อัตราส่วนโพรงดินและความพรุน (ค) หน่วยน้ำหนักรวม และ (ง) หน่วยน้ำหนักแห้ง โดยสมมุติค่าความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.7

แก้ปัญหา 1.1

เนื่องจากตัวอย่างดินถูกเก็บจากกันแม่น้ำ จึงถือว่าเป็นดินอิมตัว $S = 1.0$ และ $\gamma_i = \gamma_{\text{sat}}$

- (ก) คำน้ำหนักดินอิมตัว $W = 523 \text{ g}$
 คำน้ำหนักดินจากตู้อบ $W_s = 415 \text{ g}$
 น้ำหนักของน้ำในดิน $W_w = 523 - 415 = 108 \text{ g}$
 ปริมาณน้ำในดิน $w = W_w/W_s = 108/415 \times 100 = \underline{26\%}$
- (ข) จากความสัมพันธ์ $Se = wG_s$
 แทนค่า $1.0 \times e = 0.26 \times 2.7$
 $e = \underline{0.702}$
 จากความสัมพันธ์ $n = e/(1+e)$

32 คู่มือวิศวกรรมฐานราก

แทนค่า $n = (0.702/1.702) \times 100 = \underline{41.2\%}$

(ค) จากความสัมพันธ์ $\gamma_t = G_s \gamma_w (1 + w)/(1 + e)$
แทนค่า $= 2.7 \times 9.81 \times (1 + 0.26)/(1 + 0.702) = \underline{19.6 \text{ kN/m}^3}$

(ง) จากความสัมพันธ์ $\gamma_d = \gamma_t/(1 + w)$
แทนค่า $= 19.6/1.26 = \underline{15.5 \text{ kN/m}^3}$ ▲

▼ ตัวอย่างที่ 1.2

ตัวอย่างดินเม็ดหยาบ มีหน่วยน้ำหนักรวม 17.0 kN/m^3 ค่าปริมาณความชื้น 8% อัตราส่วนโพรงดินในสภาพแน่นที่สุดและหลวมที่สุดเท่ากับ 0.44 และ 1.61 ตามลำดับ จงหา (ก) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และ (ข) หน่วยน้ำหนักแห้งในสภาพแน่นที่สุดของดินชนิดนี้

แก้ปัญหา 1.2

(ก) หน่วยน้ำหนักรวมของดิน $\gamma_t = G_s \gamma_w (1 + w)/(1 + e)$
สมมุติ $G_s = 2.65$ แทนค่า $17.0 = 2.65 \times 9.81 \times (1 + 0.08)/(1 + e)$
 $e = 0.652$
จากความสัมพันธ์ $D_r = (e_{\max} - e)/(e_{\max} - e_{\min})$
แทนค่า $= (1.61 - 0.652)/(1.61 - 0.44) \times 100$
 $= \underline{82\%}$

(ข) จากความสัมพันธ์ $\gamma_d = G_s \gamma_w/(1 + e)$
แทนค่า $e_{\min}$ ลงในสมการเพื่อหาค่า γ_d สูงสุด
 $= 2.65 \times 9.81/(1 + 0.44)$
 $= \underline{18.0 \text{ kN/m}^3}$ ในสภาพแน่นที่สุด ▲

▼ ตัวอย่างที่ 1.3

ตัวอย่างดินเหนียวระดับน้ำใต้ดินมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 20.2 kN/m^3 ค่าปริมาณความชื้น 18% สมมุติค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 จงหาหน่วยน้ำหนักอิ่มน้ำและปริมาณความชื้นของดินเดียวกันนี้เมื่ออยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน

แก้ปัญหา 1.3

ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าดินที่อยู่เหนือน้ำใต้ดิน ไม่จำเป็นต้องเป็นดินแห้ง แต่ดินจะมีความชื้นอยู่ตามสภาพในธรรมชาติ ส่วนดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน จะถือว่าอิ่มตัวด้วยน้ำ

$$\text{หน่วยน้ำหนักรวมของดิน } \gamma_t = G_s \gamma_w (1 + w) / (1 + e)$$

$$\text{แทนค่า } 20.2 = 2.7 \times 9.81 \times (1 + 0.18) / (1 + e)$$

$$e = 0.547$$

$$\text{หน่วยน้ำหนักอิ่มน้ำของดิน } \gamma_{\text{sat}} = (G_s + e) \gamma_w / (1 + e)$$

$$\text{แทนค่า } = (2.7 + 0.547) \times 9.81 / (1 + 0.547)$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 20.6 \text{ kN/m}^3$$

จากความสัมพันธ์

$$Se = w G_s$$

$$\text{แทนค่า } 1.0 \times 0.547 = w \times 2.7$$

$$w = 0.203 = 20.3\%$$



1.3 การกระจายของขนาดเม็ดดิน (Particle Size Distribution)

ก่อนที่จะทำการจำแนกประเภทดิน (Soil Classification) เราจำเป็นต้องทราบการกระจายของขนาดเม็ดดินในมวลดินนั้นๆ เสียก่อน การหาการกระจายขนาดเม็ดดินของดินเม็ดหยาบ จะใช้การวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ส่วนการหาการกระจายขนาดเม็ดดินของดินเม็ดละเอียด มักจะใช้การวิเคราะห์ขนาดคละด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)

ตามมาตรฐานการจำแนกดินแบบ Unified Soil Classification System (USCS) ของสหรัฐอเมริกา จะนิยามให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (75 ไมครอน) หรือลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ เป็นดินเม็ดละเอียด ซึ่งได้แก่ ดินจำพวกทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. (2 ไมครอน) ถือว่าเป็นดินเหนียว อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 2 ถึง 75 ไมครอนถือว่าเป็นทรายแป้ง อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 0.075 มม. ถึง 4.75 มม. ถือว่าเป็นทราย (Sand) อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 4.75 มม. ถึง 75 มม. ถือว่าเป็นกรวด (Gravel) อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 75 มม. ถึง 300 มม. ถือว่าเป็นก้อนหิน (Cobble) และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 300 มม. ถือว่าเป็นหินก้อนใหญ่ (Boulder) สำหรับ Cobble และ Boulder จะอยู่นอกขอบเขตเนื้อหาของหนังสือเล่มนี้

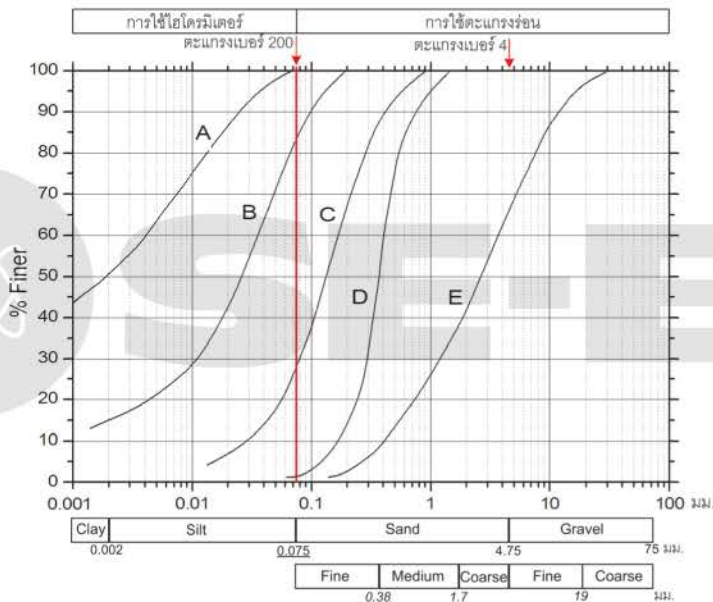
1.3.1 การวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงร่อน (Sieve Analysis)

การกระจายขนาดเม็ดดินของดินเม็ดหยาบสามารถหาได้จากการร่อนดินที่ทราบน้ำหนักผ่านตะแกรงหลายๆ ชั้น โดยตะแกรงแต่ละชั้นจะมีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 1.3 ตะแกรงเบอร์ 200 ที่มีขนาดช่องเปิดเล็กที่สุดเท่ากับ 0.075 มม. จะอยู่ต่ำกว่าตะแกรงเบอร์อื่น โดยมีถาดไว้รองรับดินเม็ดละเอียดที่สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มาได้ ซ่อนอยู่ข้างได้อีกชั้นหนึ่ง

■ ตารางที่ 1.3 ขนาดช่องเปิดเป็นมิลลิเมตรของตะแกรงร่อนเบอร์ต่างๆ

เบอร์	เบอร์	เบอร์	เบอร์	เบอร์	เบอร์	เบอร์	เบอร์	เบอร์
200	100	80	70	60	40	20	10	4
0.075	0.150	0.180	0.210	0.250	0.425	0.850	2.000	4.750

หลังจากทำการร่อนดินด้วยเครื่องช่วยร่อนจนน้ำหนักในแต่ละตะแกรงไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ก็ทำการวัดน้ำหนักของดินที่ตกค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาด และคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินที่สามารถผ่านตะแกรงแต่ละขนาดไปได้ ซึ่งเรียกว่า Percent Finer จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องเปิดของตะแกรงและ Percent Finer ในสเกลกึ่ง-ล็อก (Semi-Log Scale) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.2



● รูปที่ 1.2 โฉมการกระจายขนาดเม็ดดินของดินประเภทต่างๆ

รูปที่ 1.2 แสดงโฉมการกระจายขนาดเม็ดดิน (Particle-Size Distribution Curves) ของดินหลายๆ ประเภท ตัวอย่างดิน A (Silty Clay) ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ทั้งหมด จึงไม่ต้องวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อน ตัวอย่างดิน B (Sandy Silt) ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ประมาณ 85% ตัวอย่างดิน C (Silty Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ประมาณ 30%

สำหรับดินตัวอย่าง B และ C ปริมาณดินส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ขนาดคละด้วยไฮโดรมิเตอร์ แล้วจึงนำเส้นโค้งการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ มาต่อเข้ากับเส้นโค้งที่ได้จากการใช้ตะแกรงร่อน เพื่อให้เป็นเส้นโค้งที่สมบูรณ์

ส่วนตัวอย่างดิน E (Gravel Sand) นั้น ไม่มีเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เลย เส้นโค้งการกระจายขนาดจึงวาดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อนเพียงอย่างเดียว

จากเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ดดินของดินเม็ดหยาบ สามารถหาสัมประสิทธิ์ที่สำคัญ 2 ตัวคือ สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของดิน (Coefficient of Uniformity, C_u) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature, C_c) ซึ่งต้องนำไปใช้ในการจำแนกดินเม็ดหยาบต่อไป

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

โดยที่ D_{60} คือขนาดเม็ดดินซึ่งมีดินจำนวน 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีขนาดเล็กกว่านี้ ส่วน D_{30} และ D_{10} ก็มีความหมายในทำนองเดียวกัน

▼ ตัวอย่างที่ 1.4

ตัวอย่างดินแห้งหนัก 434.8 กรัม ถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรง ได้ค่าน้ำหนักตกค้างบนตะแกรงดังนี้

ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนัตกค้าง (กรัม)
4	4.75	0
10	2.00	5.2
20	0.85	25.0
40	0.425	140.0
60	0.25	167.8
70	0.21	37.4
100	0.15	25.4
200	0.075	26.2
ถาดรองกัน	-	7.8

จงวาดเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน หาขนาดประสิทธิผลและขนาดเฉลี่ยของดินตัวอย่างนี้

แก้ปัญหา 1.4

ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนักตกค้าง (กรัม)	% ตกค้าง	% ตกค้างสะสม	% Finer
4	4.75	0	0	0	100
10	2.00	5.2	1.19	1.19	98.81
20	0.85	25.0	5.75	6.94	93.06
40	0.425	140.0	32.2	39.14	60.86
60	0.25	167.8	38.6	77.74	22.26
70	0.21	37.4	8.6	86.34	13.66
100	0.15	25.4	5.84	92.18	7.82
200	0.075	26.2	6.02	98.2	1.8
ถาดรองกัน	-	7.8	1.8	100	
		434.8	100		

รูปที่ E1.4 แสดงโค้งการกระจายขนาดเม็ดดินของดินตัวอย่าง ขนาดประสิทธิภาพ (Effective Size) หรือ D_{10} คือขนาดเม็ดดินซึ่งมีดินจำนวน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีขนาดเล็กกว่านี้ D_{10} ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมีผลต่อการไหลของน้ำผ่านดิน รวมทั้งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมเชิงกลของดินนั้นๆ ด้วย ส่วนขนาดเฉลี่ย หรือ D_{50} คือขนาดเม็ดดินที่มีดินปริมาณครึ่งหนึ่งขนาดเล็กกว่านี้

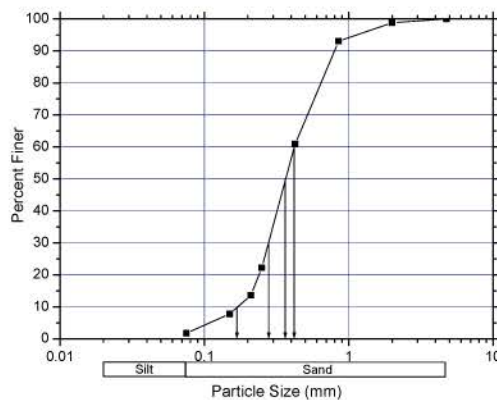
จากรูปที่ E1.4

$$D_{10} = 0.17 \text{ มม.}$$

$$D_{50} = 0.36 \text{ มม.}$$

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ $C_u = D_{60}/D_{10} = 0.41/0.17 = 2.41$

สัมประสิทธิ์ความโค้ง $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60}) = 0.28^2 / (0.17)(0.41) = 1.12$



● รูปที่ E1.4 โค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน



1.3.2 การวิเคราะห์ขนาดผลด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)

สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 หรือดินเม็ดละเอียดจำพวกทรายแป้งและดินเหนียว จะอาศัยหลักการตกตะกอน (Sedimentation) ของอนุภาคดินในน้ำ โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า

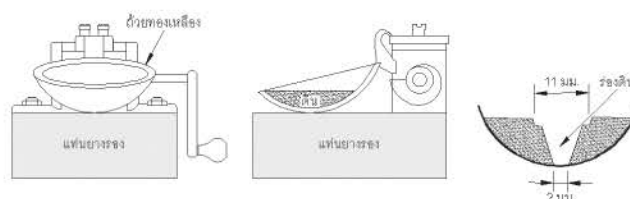
การทดสอบการตกตะกอนนี้ ได้แก่ วิธีปิเปตต์ (Pipette Method) และวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Method) ซึ่งการทดสอบไฮโดรมิเตอร์จะเป็นที่นิยมกว่า การทดสอบกระทำโดยนำดินตัวอย่างปริมาณ 50 กรัมมาผสมกับสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Deflocculating Agent) และเติมน้ำกลั่นจนกลายเป็นสารแขวนลอยปริมาตร 1 ลิตรในกระบอกตวง เมื่อทำการหย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารแขวนลอยดังกล่าว ไฮโดรมิเตอร์จะจมลงจนถึงตำแหน่งที่แรงลอยตัวเท่ากับน้ำหนักของไฮโดรมิเตอร์ ความยาวของแท่งไฮโดรมิเตอร์ส่วนที่อยู่เหนือสารแขวนลอย จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารแขวนลอยซึ่งเปลี่ยนไปตามเวลา จากนั้นจึงทำการคำนวณ Percent Finer และขนาดของเม็ดดิน แล้ววาดโค้งการกระจายขนาด

การวิเคราะห์ขนาดด้วยไฮโดรมิเตอร์จะใช้กฎของสโตกส์ ซึ่งมีสมมุติฐานอยู่ว่าอนุภาคเป็นทรงกลมและตกตะกอนโดยไม่ชนกันเอง ถึงแม้อนุภาคของดินเหนียวจะเป็นแผ่นและการชนกันเองของอนุภาคระหว่างการตกตะกอนเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่วิธีไฮโดรมิเตอร์นี้ถือว่ามีความละเอียดเพียงพอกับงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคหนึ่ง นอกเหนือจากวิธีตกตะกอนแล้ว ยังมีวิธีอื่นๆ ที่แม่นยำและรวดเร็วกว่าในการวิเคราะห์ขนาดผลของดินเม็ดละเอียด เช่น เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction Technique) ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

1.4 การหาพิสัยความชื้นเหลวของดินเม็ดละเอียด (Atterberg's Limits)

ข้อมูลการกระจายขนาดดินนั้นเพียงพอสำหรับใช้จำแนกดินเม็ดหยาบ อย่างไรก็ตามในการจำแนกดินเม็ดละเอียดจำเป็นต้องทราบข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเป็นพลาสติกของดิน (Plasticity)

นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ Atterberg ได้คิดค้นวิธีหาความเป็นพลาสติกของดินเม็ดละเอียดด้วยการหาปริมาณน้ำในดินที่สภาวะต่างๆ ดังต่อไปนี้



● รูปที่ 1.3 ถ้วย Casagrande สำหรับการทดสอบหาพิสัยความเหลวของดิน

38 คู่มือวิศวกรรมฐานราก

1. พิกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) เป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในดิน ที่ทำให้ดินเริ่มเหลวและไหลได้ ดินเหนียวมีค่า LL ประมาณ 30 ถึง 160%

2. พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) เป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในดิน โดยที่ดินยังคงมีความเป็นพลาสติก (เหนียวหนืด) สามารถปั้นเป็นรูปร่างได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว PL ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 20 ถึง 50%

3. พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit, SL) เป็นปริมาณน้ำที่มากที่สุดในดิน ซึ่งแม้ว่าจะมีการสูญเสียความชื้นต่อไปอีก ก็จะไม่ทำให้ดินหดตัวหรือลดปริมาตรลง อนึ่ง พิกัด SL ไม่ค่อยได้ใช้ในทางปฏิบัติ

พิกัดความเหลวสามารถหาในห้องปฏิบัติการได้ 2 วิธีคือ (1) ด้วย Casagrande ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ (2) เครื่องทดสอบการทะลวงแบบปล้อยกรวย วิธีแรกจะเป็นการนำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาผสมน้ำในปริมาณที่ต้องการจนเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนแป้งเปียกแล้วจึงปาดดินใส่ถ้วย จากนั้นจึงบากดินให้เป็นร่องตรงกลาง แล้วทำการหมุนถ้วยด้วยอัตรา 2 รอบต่อวินาทีให้ถ้วยยกขึ้น 1 ซม.และตกกระทบแท่นยางซ้ำๆ จนดินไหลมาบรรจบกันเป็นระยะ 12.7 มม. (0.5 นิ้ว) แล้วจึงทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนปริมาณน้ำในดินอย่างน้อย 4 ค่า พิกัดความเหลวถูกนิยามไว้ที่ปริมาณน้ำที่ทำให้ดินไหลมาบรรจบกันเป็นระยะ 12.7 มม. ด้วยจำนวนการตกกระทบแท่นยาง 25 ครั้ง

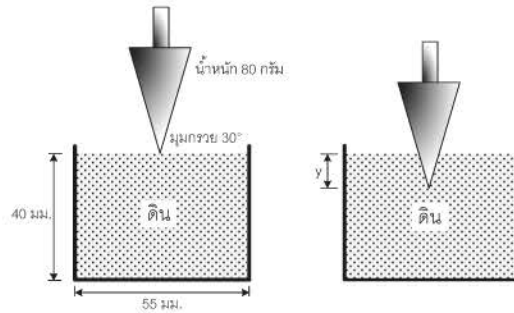
อย่างไรก็ดี ผู้ทดสอบอาจใช้ปริมาณน้ำ (w) เพียงค่าเดียวและนับจำนวนการตกกระทบ (N) ที่ได้แล้วแทนค่าในสมการเชิงประสพการณ์ต่อไปนี้เพื่อหาค่าพิกัดความเหลวก็ได้

$$LL = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

ส่วนเครื่องทดสอบการทะลวงแบบปล้อยกรวย (Fall Cone Penetrometer) ตามมาตรฐานอังกฤษใช้กรวยมุมแหลม 30° น้ำหนักกรวยรวมแกนด้วยเท่ากับ 80 กรัม การทดสอบทำโดยนำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาผสมน้ำให้เป็นเนื้อเดียวแล้วนำไปใส่ถ้วยลึก 40 มม. ปาดดินให้เสมอกับปากถ้วยแล้วเลื่อนระดับปลายกรวยให้สัมผัสกับผิวดินพอดี จากนั้นจึงปล้อยกรวยให้ตกด้วยน้ำหนักของตัวเองและวัดระยะจมที่เกิดขึ้น แล้วจึงทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนปริมาณน้ำในดิน พิกัดความเหลวของดินถูกนิยามที่ระยะจมของกรวยเท่ากับ 20 มม.

อย่างไรก็ดี ผู้ทดสอบอาจใช้ปริมาณน้ำ (w) เพียงค่าเดียวและวัดระยะจม (y หน่วยเป็น มม.) ที่เกิดแล้วแทนค่าในสมการเชิงประสพการณ์ต่อไปนี้ (Nagaraj and Jayadeva 1981) เพื่อหาค่าพิกัดความเหลวก็ได้

$$LL = \frac{w}{0.65 + 0.0175y}$$



● รูปที่ 1.4 การหาพิคต์ความเหลวแบบวิธีปล้อยกรวย

พิคต์พลาสติก (PL) หาได้โดยนำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 15 กรัมมาผสมน้ำแล้วคลึงด้วยฝ่ามือบนแผ่นกระจกให้เป็นเส้นกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 หุน (1/8 นิ้ว หรือ 3.2 มม.) โดยให้เปลี่ยนปริมาณน้ำและคลึงดินจนกระทั่งเส้นดินเริ่มมีรอยแตกที่ผิวพอดี ปริมาณน้ำนี้จึงเป็นพิคต์พลาสติก

จากพิคต์ LL และ PL เราสามารถหาดรชนีที่สำคัญได้อีก 2 ดรชนีคือ ดรชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index, PI) และดรชนีความเหลว (Liquidity Index, LI) PI หาได้จาก

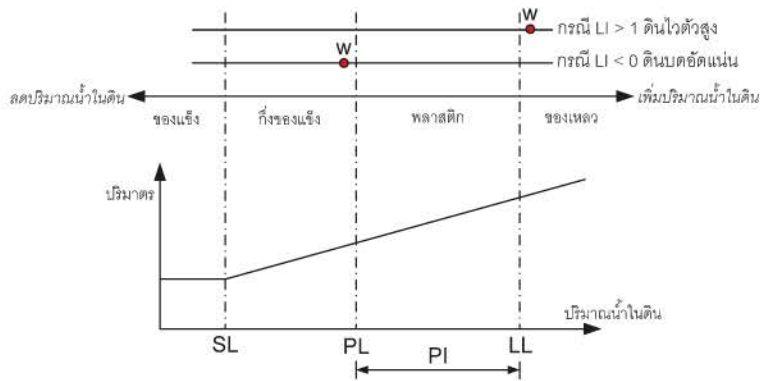
$$PI = LL - PL$$

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} = \frac{w - PL}{PI}$$

ดรชนี PI สามารถใช้บอกช่วงความเป็นพลาสติกของดิน หาก PI มีค่าต่ำ แสดงว่าดินมีความเป็นพลาสติกต่ำ และกำลังของดินจะขึ้นกับมุมเสียดทานเสียดมากกว่า หาก PI สูง แสดงว่าดินมีปริมาณแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ปะปนอยู่มาก จึงปั้นได้ดี

ส่วนดรชนีความเหลวใช้บอกกำลังของดินคร่าวๆ ได้ หาก $LI < 0$ แสดงว่าดินมี w อยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง (Semi Solid) มีกำลังรับน้ำหนักสูง และมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) ซึ่งได้แก่ ดินบดอัดแน่น (Compacted Soil) ถ้า $0 < LI < 1$ แสดงว่าดินอยู่ในสภาพพลาสติก และถ้า $LI > 1$ แสดงว่าดินอยู่ในสภาพเหลวมากถือเป็นดินไวตัวสูง (Sensitive Soil) มีกำลังรับน้ำหนักต่ำมาก จะเห็นได้ว่ากำลังของดินไม่ได้ดูที่ปริมาณน้ำ (w) เพียงอย่างเดียวแต่ต้องดูดรชนี LI ด้วย

ดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำมากกว่า LL จะมีลักษณะคล้ายเนยนิ่ม ดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำระหว่าง PL ถึง LL จะมีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน ดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำระหว่าง SL ถึง PL จะมีลักษณะคล้ายเนยแข็ง และดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำต่ำกว่า SL จะมีลักษณะคล้ายลูกกวาดแข็ง ตารางที่ 1.4 แสดงระดับความเป็นพลาสติกของดิน



● รูปที่ 1.5 สภาพดินขึ้นกับตำแหน่งปริมาณน้ำในดิน (w) เทียบกับพิกัด Atterberg

■ ตารางที่ 1.4 ระดับความเป็นพลาสติกของดิน (Burmister, 1949)

PI	คำบรรยาย
0	ไม่มีความเป็นพลาสติก
1 - 5	มีความเป็นพลาสติกนิดเดียว
5 - 10	มีความเป็นพลาสติกต่ำ
10 - 20	มีความเป็นพลาสติกปานกลาง
20 - 40	มีความเป็นพลาสติกสูง
> 40	มีความเป็นพลาสติกสูงมาก

■ ตารางที่ 1.5 ค่าพิกัดพลาสติก พิกัดความเหลว และแอกติวิตีของแร่ดินเหนียวบางชนิด (Das, 2006)

แร่ดินเหนียว	PL	LL	A
Kaolinite	20 - 40	35 - 100	0.3 - 0.5
Illite	35 - 60	60 - 120	0.5 - 1.2
Montmorillonite	50 - 100	100 - 900	1.5 - 7.0
Halloysite (hydrated)	40 - 60	50 - 70	0.1 - 0.2
Halloysite (dehydrated)	30 - 45	40 - 55	0.4 - 0.6
Attapulgite	100 - 125	150 - 250	0.4 - 1.3
Allophane	120 - 150	200 - 250	0.4 - 1.3

1.4.1 แอกติวิตีของดินเหนียว (Activity of Clay)

ความเป็นพลาสติกของดินเกิดจากน้ำเคลือบผิวเม็ดดิน (Adsorbed Water) ซึ่งยึดเกาะรอบอนุภาคดินเหนียวอย่างเหนียวแน่น น้ำเคลือบผิวนี้นี้ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปได้ด้วยอุณหภูมิเดาอบ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน จึงมีผลต่อค่าพิกัดพลาสติกและพิกัดความเหลวของดินนั้นๆ

Skempton (1953) พบว่า ดรรชนีความเป็นพลาสติก (PI) ของดินจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน Skempton ได้ให้นิยามของแอกติวิตี (Activity, A) ซึ่งเป็นความชันของเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง PI กับเปอร์เซ็นต์ของดินส่วนที่เล็กกว่า 2 ไมครอน (% of Clay-Size Fraction) ดังนี้

$$A = \frac{PI}{(\% \text{ of clay-size fraction, by weight})}$$

แอกติวิตีเป็นดรรชนีที่ใช้บอกถึงความสามารถในการบวม (Swelling Potential) ของดินเหนียวได้ ตารางที่ 1.5 แสดงค่าแอกติวิตีของแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ชนิดต่างๆ ดินเหนียวที่มีค่า $A < 0.75$ ถือว่าเป็นดินเหนียวไม่แอกทีฟ ดินเหนียวที่มีค่า $0.75 < A < 1.25$ ถือว่าเป็นดินเหนียวปกติ และดินเหนียวที่มีค่า $A > 1.25$ ถือว่าเป็นดินเหนียวแอกทีฟ

จะเห็นว่า ดินเหนียวที่มีแร่ดินเหนียวชนิด Montmorillonite จะมีแนวโน้มการบวมตัวสูง

1.5 การจำแนกประเภทดินแบบ USCS (Unified Soil Classification System)

การจำแนกดินมีอยู่หลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานทางหลวงอเมริกา AASHTO ซึ่งใช้ในการจำแนกวัสดุงานทาง หรือมาตรฐานอังกฤษ (British Standard, BS) ซึ่งใช้ในเครือจักรภพ ส่วนการจำแนกดินแบบ USCS ถูกคิดค้นขึ้นโดย Casagrande ปี ค.ศ. 1942 และกลายเป็นวิธีจำแนกดินที่ใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ละเอียดหรือหยابเกินไปสำหรับงานวิศวกรรมปฐพี

ตารางที่ 1.6 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ใน USCS ส่วนรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7 แสดงวิธีการจำแนกดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดตามลำดับ

การจำแนกดินเม็ดละเอียดต้องอาศัยแผนผังความเป็นพลาสติกของดิน (Plasticity Chart) ในรูปที่ 1.8 ซึ่งมีเส้นตรงที่สำคัญ 2 เส้นคือ เส้นเอ (A Line) และเส้นยู (U Line) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้คือ

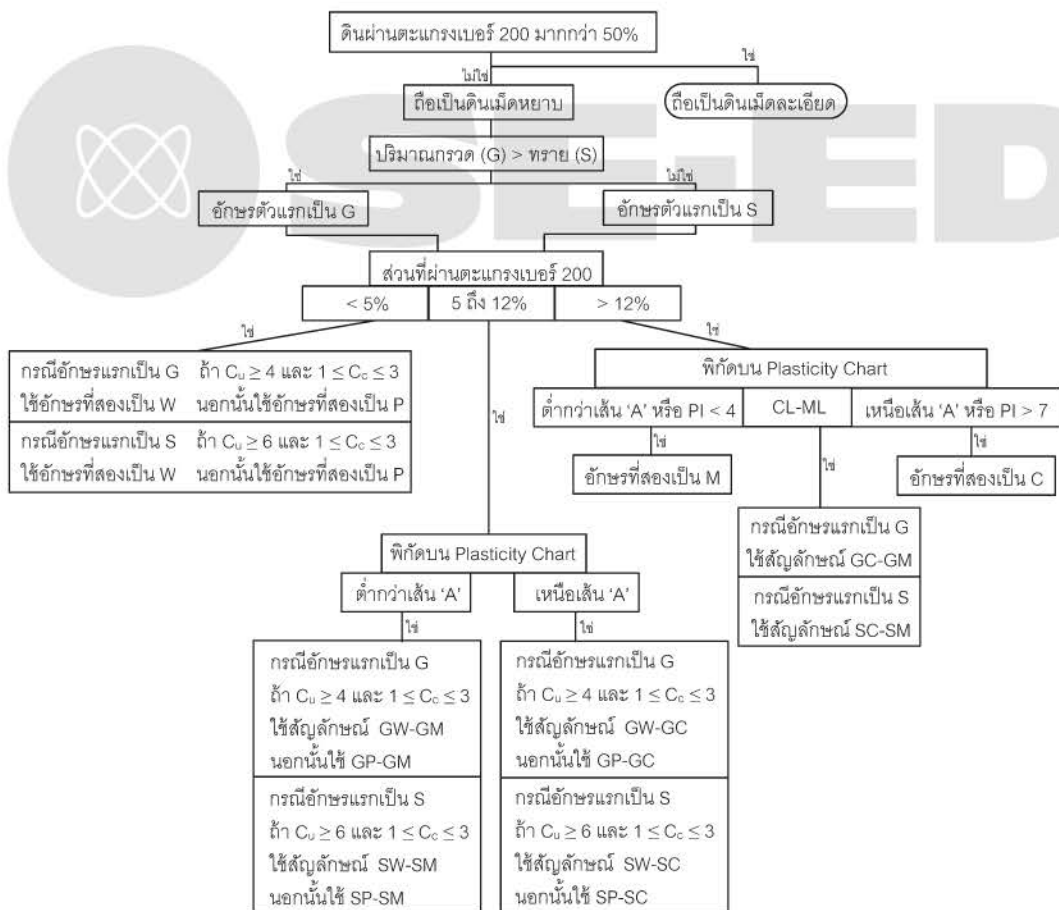
$$\text{เส้นเอ} \quad PI = 0.73(LL - 20)$$

$$\text{เส้นยู} \quad PI = 0.9(LL - 8) \quad \text{เป็นพิกัดบน}$$

ข้อมูลดินเดียวกันเมื่อทำการพลอตพิกัด (LL, PI) ลงบนแผนผังความเป็นพลาสติก ข้อมูลมีแนวโน้มจะขนานกับเส้นเอ ส่วนดินที่มีสารอินทรีย์ปะปนอยู่สูง แนวโน้มข้อมูลอาจหลุดจากแผนผังไปได้ อนึ่ง หากข้อมูลพิกัด (LL, PI) ที่หาได้อยู่สูงกว่าเส้นยู แสดงว่าข้อมูลที่ได้อาจไม่น่าเชื่อถือ

■ ตารางที่ 1.6 สัญลักษณ์ที่ใช้ใน USCS

G	Gravel	กรวด (ผ่านตะแกรงช่องเปิด 75 มม. แต่ไม่ผ่านเบอร์ 4)
S	Sand	ทราย (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ไม่ผ่านเบอร์ 200)
M	Silt	ทรายแป้ง (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้, ใหญ่กว่า 2 ไมครอน)
C	Clay	ดินเหนียว (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้, เล็กกว่า 2 ไมครอน)
O	Organic Silts and Clays	ทรายแป้งอินทรีย์และดินเหนียวอินทรีย์
Pt	Peat and Highly Organic Soils	ดินซากพืชและดินอินทรีย์สูง
H	High Plasticity	ความเป็นพลาสติกสูง ($LL > 50$)
L	Low Plasticity	ความเป็นพลาสติกต่ำ ($LL < 50$)
W	Well Graded	คละขนาดดี (ความพรุนต่ำ ซึ่งถือว่าดี)
P	Poorly Graded	คละขนาดไม่ดี (ความพรุนสูง ซึ่งถือว่าไม่ดี)



● รูปที่ 1.6 ระบบ USCS ในการจำแนกดินเม็ดหยาบ

เกี่ยวกับผู้เขียน

รางวัลเกียรติคุณ

ทุนเล่าเรียนปริญญาเอก จากรัฐบาลญี่ปุ่น
หรือ Monbukagakusho (2544 – 2547)

รางวัลศาสตราจารย์ Chin Fung Kee
สำหรับผลการเรียนดีเลิศในสาขา
วิศวกรรมปฐพี (2543)

ทุนการศึกษา จาก AIT (2542)

ประสบการณ์การทำงาน

ผู้เขียนทำงานเป็นวิศวกรโยธาในภาคเอกชน โดยได้มีโอกาสทำงานในบริษัท เอ็ม เอ เอ จีโอเทคนิค จำกัด, บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) และเป็นวิศวกรโยธาจากประเทศไทยเพียงคนเดียวในบริษัท พาร์สันส์ บริงเกอร์ฮอฟ จำกัด สาขาประเทศสิงคโปร์ ที่มีพนักงานกว่า 500 คน โดยส่วนใหญ่รับผิดชอบด้านวิศวกรรมปฐพีของโครงสร้างพื้นฐาน อาทิเช่น โครงการทำเทียบเรือ ขนถ่ายสินค้าเทกอง จังหวัดระยอง, โครงการรถไฟความเร็วสูง ประเทศไต้หวัน, โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน เมืองเซินไฮ ประเทศอินเดีย, สถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน Mayflower และโครงการอุโมงค์ทางด่วนเหนือ-ใต้ ประเทศสิงคโปร์ เป็นต้น

พัลลภ วิสุทธเมธานุกุล,

วศ.ด. (โยธา), สย.10021

PUNLOP VISUDMEDANUKUL,
Ph.D., P.E. 10021

E-mail: punlopv@gmail.com



การศึกษา

ระดับ	สาขา	สถาบัน
วิศวกรรมศาสตร ดุษฎีบัณฑิต (2547)	ธรณีเทคนิค เพื่อสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัย เกียวโต
วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต (2543)	วิศวกรรมปฐพี	สถาบันเทคโนโลยี แห่งเอเชีย (AIT)
วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต (2541)	วิศวกรรมโยธา	จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ประถมศึกษาและ มัธยมศึกษา		โรงเรียนอัสสัมชัญ กรุงเทพฯ

คู่มือวิศวกรรมฐานราก

เนื้อหาหนังสือเล่มนี้ประกอบด้วย

- | | | | |
|---------|--------------------------------------|----------|-----------------------------|
| บทที่ 1 | คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดิน | บทที่ 8 | กำแพงเข็มพิค |
| บทที่ 2 | การสำรวจชั้นดินภาคสนาม | บทที่ 9 | งานขุดดินใช้ค้ำยันหลายระดับ |
| บทที่ 3 | น้ำใต้ดิน | บทที่ 10 | เสถียรภาพของลาดดิน |
| บทที่ 4 | ฐานรากตื้น | บทที่ 11 | การปรับปรุงคุณภาพดิน |
| บทที่ 5 | ฐานรากยึด ฐานรากร่วม และฐานรากผสม | บทที่ 12 | ธรณีเทคนิคเพื่อสิ่งแวดล้อม |
| บทที่ 6 | ฐานรากเสาเข็ม | บทที่ 13 | การก่อสร้างอุโมงค์ |
| บทที่ 7 | ความดันด้านข้างของดิน และกำแพงกันดิน | บทที่ 14 | การประเมินความเสียหาย |



ดร.พัลลภ วิสุทธ์เมธานุกุล (Ph.D., P.E.)

จบการศึกษาด้านวิศวกรรมโยธา สาขาธรณีเทคนิค จากสถาบันทั้งในและต่างประเทศ มีประสบการณ์ด้านการออกแบบและก่อสร้างวิศวกรรมฐานรากในบริษัทรับเหมาก่อสร้างอันดับต้นของประเทศไทย และบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาชั้นนำในประเทศสิงคโปร์

หนังสือเล่มนี้เกิดจากการกลั่นกรองประสบการณ์การทำงานตลอดระยะเวลาเกือบ 10 ปี พบกับการสังเคราะห์ความรู้ที่ทันสมัย อีกทั้งได้สอดแทรกตัวอย่างประกอบในแต่ละบทเป็นจำนวนมาก ซึ่งบางส่วนเป็นการยกตัวอย่างปัญหาที่ประสบจริงจากการทำงาน เพื่อให้ผู้อ่านสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อนึ่ง การก้าวเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนหรือ AEC ในปี พ.ศ. 2558 ก่อให้เกิดแนวโน้มการแลกเปลี่ยนแรงงานวิชาชีพระหว่างประเทศเพื่อนบ้าน รวมทั้งวิชาชีพวิศวกรโยธา ผู้เขียนจึงได้ทำกับคำศัพท์เทคนิคเป็นภาษาอังกฤษ เพื่อให้สะดวกต่อการติดต่อสื่อสาร และการทำงานร่วมกับวิศวกรชาวต่างชาติ และเอื้อต่อการสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติมในภายหลัง

หนังสือ “คู่มือวิศวกรรมฐานราก” เล่มนี้ครบถ้วนไปด้วยเนื้อหาทางวิชาการและวิชาชีพ เหมาะสำหรับวิศวกรโยธาที่จะนำไปใช้ประกอบวิชาชีพทั้งงานออกแบบและงานก่อสร้าง หรือนำไปใช้เสริมการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษา นอกจากนี้ ยังเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เตรียมตัวสอบเป็นภาคีวิศวกรโยธาหรือเลื่อนระดับเป็นสามัญวิศวกรโยธา รวมทั้งผู้ที่ต้องการทดสอบความรู้พื้นฐานด้านวิศวกรรมโยธาในต่างประเทศ เพื่อยกระดับวิชาชีพของตนเองสู่สากลอีกด้วย

ISBN 978-616-08-2198-3



9 786160 821983
480 บาท

วิทยาการ และเทคโนโลยี/การก่อสร้าง



www.se-ed.com



sbc.fans