

การสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาะเข้มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียววมตัว



นางสาวกาญจนา หิรัญวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2565

SKIN FRICTION DEGRADATION DUE TO SHRINKAGE OF EXPANSIVE
SOIL

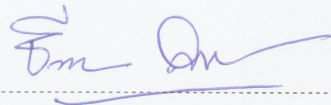


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering, Transportation and
Geo-resources Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียววมตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



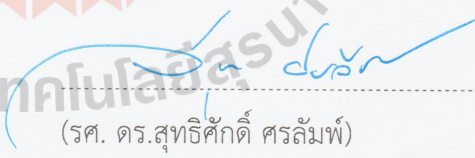
(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

ประธานกรรมการ



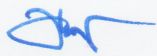
(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชรรูปร่างกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กาญจนา ธีร์ภูวัฒน์: การสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียว
บวมตัว (SKIN FRICTION DEGRADATION DUE TO SHRINKAGE OF EXPANSIVE SOIL)
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรพจน์ ต้นเส็ง, 86 หน้า.

คำสำคัญ: ดินเหนียวบวมตัว/มอนท์มอริลไอโนท์/แรงเสียดทานเสาเข็ม/การหดตัว/เสาเข็ม

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียว
บวมตัวธรรมชาติ ที่พบใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การวิจัยได้ทดสอบ
แรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ฝังในดินเหนียวบวมตัวผสมกับดินเหนียวกระจายตัว ที่พบเป็นปริมาณ
มากในบริเวณเดียวกัน การทดสอบใช้ดินบดอัดในแบบทดสอบบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน ดินบวมตัวที่ใช้
ผสมกับดินกระจายตัวมีอัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก และใช้ท่อนเหล็กกลม
ขนาด 16 มิลลิเมตร กดลงในดินที่บดอัด โดยออกแบบให้แรงต้านต่อการก่อกัดเฉพาะแรงเสียดทาน
ผิวเท่านั้น จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างดินแห้งในสภาวะแวดล้อมปกติ แล้วทำการทดสอบแรงต้านทาน
ต่อการก่อกัดของแท่งเหล็กที่ฝังในดิน จากผลการทดสอบพบว่า แรงต้านที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อมีการ
เปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน ซึ่งเกิดจากการหดตัวของดิน จึงได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง
เสียดทานผิวกับการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นค่า Modulus of pile-soil reaction ของแรงเสียดทาน
(k_{ps}) พบว่า k_{ps} แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินสำหรับดินที่มีดินเหนียวบวมตัว
ผสมอยู่เกินกว่าร้อยละ 50 และในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor (α) กับ
ปริมาณน้ำในดินซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเสาเข็มในดินที่มีดินเหนียวบวมตัวเป็น
องค์ประกอบได้

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา กาญจนา ธีร์ภูวัฒน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา พรพจน์ ต้นเส็ง

SKIN FRICTION DEGRADATION DUE TO SHRINKAGE OF EXPANSIVE SOIL

THESIS ADVISOR: ASST. PROF PORNPOT TANSENG, Ph.D., 86 PP.

KEYWORD: EXPANSIVE SOIL/MONTMORILLONITE/SKIN FRICTION/SHRINKAGE/PILES

This research discusses the loss of pile surface friction due to the contraction of the natural expansive soil found in Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. The research was tested on the surface friction of piles embedded in a mixture of expansive soil and clay found in large quantities in the same area. The soil sample is prepared with standard compaction method. The expansive soil used had a mixture ratio of 0, 50, and 100. The 16 mm diameter steel rod is pushed through the compacted soil sample to avoid end resistance to the steel rod. The soil is left to dry under ambient conditions. From the test results, it was found that the resistance at the pile surface decreased when soil water content was changing caused by soil shrinkage. Therefore, the correlation between surface resistance and pile subsidence was established as the modulus of pile-soil reaction of friction (k_{ps}). The k_{ps} vary with changing of soil water content for clay soil with swelling 50 %. In this research, the relationship between adhesion factor (α) and water content in the soil was proposed, which could be used as a guideline for the design of piles in clay-swelling soils.

School of Civil Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature กาญจนา อภัยวัฒน์
Advisor's Signature พ.พ.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้สละเวลาเพื่อตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตและการทำงานให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ เลขานุการ และ ผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิด ในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษา ในกลุ่มวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ด้านการดำเนินชีวิต และคอยเป็นกำลังใจ ให้กับผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงานความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แต่ พันตำรวจโทพิชญ์ศุภรัตน์ และ นางกนกวรรณ หิรัญวัฒน์นะ บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัว ของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอุปการะด้วยดีเสมอมา โดยเฉพาะวิถีการดำเนินชีวิต และการศึกษา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตามที่ตั้งใจ

กาญจนา หิรัญวัฒน์นะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรัชศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ดินเหนียวบวมตัว (Expansive Soil).....	4
2.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมพฤติกรรมการขยายตัวของดิน.....	4
2.1.2 ศักยภาพการบวมตัว (Expansion Potential).....	5
2.1.3 หลักการเบื้องต้นของดินบวมตัว (Basic Expansive Soil Principles).....	8
2.2 การศึกษาผลของการบวมตัวและหดตัวของดินเหนียวบวมตัวบดอัดต่อฐานรากตื้น (พรพจน์ และคณะ, 2550).....	13
2.3 การศึกษาผลกระทบของดินเหนียวบวมตัวต่อโครงสร้าง.....	16
บทที่ 3 วิธีวิจัย.....	39
3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ.....	39
3.1.1 แสดงตำแหน่งของแหล่งเก็บตัวอย่างดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ.....	40
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและเชิงกลของดิน	42
3.2.1 การทดสอบพิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit).....	42
3.2.2 การทดสอบการบวมตัว (Swelling Soil Test)	42
3.2.3 การทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage)	44
3.2.4 การทดสอบการบดอัด.....	45
3.2.5 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด	46
3.3 การติดตั้งเสาเข็ม.....	47
3.4 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวบวมตัวต่อหน่วยแรงเสียดทานผิว เสาเข็ม	48
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผล.....	51
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน	51
4.2 ผลการทดสอบการบวมตัวและหดตัวอย่างอิสระ	52
4.2.1 ผลการทดสอบการบวมตัวอย่างอิสระ Free swell test.....	52
4.2.2 ผลการทดสอบการบวมตัว(Swelling Soil Test).....	52
4.2.3 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage).....	53
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการบดอัด.....	54
4.4 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด	55
4.5 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวบวมตัวต่อหน่วยแรงเสียดทาน	56
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	76
รายชื่อบทความและวารสารทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	77
ประวัติผู้เขียน	86



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของดินทั่วไปเทียบกับดินที่มีศักยภาพในการบวมตัว (Holtz and Gibbs, 1956).....	6
2.2 ศักยภาพการบวมตัวของดิน (Lew, 2010)	6
2.3 สรุปผลการทดสอบการบวมตัวและหดตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550).....	16
2.4 คุณสมบัติพื้นฐานดินตัวอย่างทดสอบ (COWIconsult, 1988).....	18
2.5 พารามิเตอร์แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง (Tiande et al., 2021).....	30
2.6 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่มีวิธีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและไม่มี การเปลี่ยนแปลง ปริมาตร โดยใช้แบบจำลอง Van Genuchten model (1980).	38
3.1 สัดส่วนของดินเหนียวบวมตัวที่ปริมาณต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
3.2 พิกัดเหลวของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ	42
4.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในดินตัวอย่าง	61
4.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในดินตัวอย่าง	61

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แนวคิดด้านกำลังรับแรงเสียดทานที่ลดลง	2
2.1 แผนภูมิการจำแนกศักยภาพการบวมตัวของดิน (Seed et al., 1962).....	7
2.2 แผนภูมิการจำแนกศักยภาพการบวมตัวของดิน (Van der Merwe, 1964).....	8
2.3 แสดงปริมาณน้ำเทียบกับความลึกของแหล่งดินเหนียวสองชนิด (Al-Homoud et al., 1997)....	9
2.4 ผลการทดสอบการบวมตัว และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Day, 1997).....	11
2.5 การวิบัติลาดดินอ่างเก็บน้ำเนื่องจากชั้นดินเหนียวบวมตัวแทรกแบบเอียงตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (พรพจน์ และพลอนันต์, 2552).....	13
2.6 รูปตัดชั้นดินจากการขุดอ่างเก็บน้ำลึก 9 เมตร (พรพจน์ และคณะ, 2550).....	14
2.7 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction (พรพจน์ และคณะ, 2550).....	14
2.8 ความเป็นพลาสติกของดินเหนียวบวมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550).....	15
2.9 การบดอัดดินเหนียวบวมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)	15
2.10 รอยแตกร้าวของผนังห้องครัว (Amer & Mohammed, 1998)	17
2.11 (a) รูปตัดชั้นดิน (COWIconsult,1988) (b) แผนภูมิจำแนกศักยภาพในการบวมตัว.....	17
2.12 การกระจายหน่วยแรงเสียดทานเสาเข็ม (Yunlong & Sai, 2015).....	19
2.13 การกระจายแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มเมื่อมีน้ำแทรกซึม (Yunlong & Sai, 2015)....	19
2.14 เส้นโค้งการกระจายความเค้นตามแนวแกนของเสาเข็ม (Yunlong & Sai, 2015).....	20
2.15 เส้นโค้งการกระจายหน่วยแรงเสียดทานเสาเข็ม (Yunlong & Sai, 2015).....	20
2.16 ผนังภายในของอาคารโรงงาน (จุฬาลักษณ์, 2564).....	21
2.17 (a) รอยร้าวของผนังภายในอาคารโรงงาน (b) รอยแยกของแผ่นพื้นคอนกรีตภายในอาคารโรงงาน (c) การยกตัวของอิฐปูทางเท้ารอบอาคารโรงงาน (จุฬาลักษณ์, 2564).....	22
2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินบวมตัว กับศักยภาพในการบวมตัว (จุฬาลักษณ์, 2564).....	23
2.19 รอยแตกตามยาวพบบนสันเขื่อนทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (กรมชลประทาน, 2556).....	24
2.20 บริเวณที่พบรอยแตกตามยาวตั้งแต่ กม.3+500 ถึง กม.4+860 (สุทธิศักดิ์, 2558).....	24

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

หน้า

2.21 ผลสำรวจ Resistivity (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2557)	25
2.22 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนด้วยวิธี MASW (กรมชลประทาน, 2556)	25
2.23 การขุดเปิดบ่อทดสอบ (สุทธิศักดิ์, 2558).....	26
2.24 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันเขื่อน (สุทธิศักดิ์, 2558).....	27
2.25 เปรียบเทียบค่า Swelling Pressure กับน้ำหนักดินกดทับ (สุทธิศักดิ์, 2558).....	28
2.26 ปริมาณน้ำในมวลดินและคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดิน (สุทธิศักดิ์, 2558)	28
2.27 Soil Water Characteristic Curve, SWCC ของดินถมเขื่อนป่าสักฯ (สุทธิศักดิ์, 2558).....	29
2.28 การกระจายขนาดอนุภาคของดินทดสอบ (Tiande et al., 2021).....	30
2.29 ระบบทดสอบสำหรับการทดสอบการหดตัว (Tiande et al., 2021)	31
2.30 ภาพอ้างอิงในวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน (The digital image correlation method) (Tiande et al., 2021)	31
2.31 ตัวอย่างการกระจัดในแนวนอนและเส้นชั้นความสูง ของ GGC (Tiande et al., 2021)	32
2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปในแนวนอนกับเวลาสำหรับวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน และเวอร์ เนียร์คาลิปเปอร์ (Tiande et al., 2021).....	33
2.33 การเปลี่ยนแปลงการเสียรูปและปริมาณความชื้นต่อช่วงเวลา ในระหว่างการหดตัวของดิน ตัวอย่าง (a) SMP, (b) GGC และ (c) Kaolin (Tiande et al., 2021)	34
2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมวลของการหดตัวของดินตัวอย่าง (a) SMP, (b) GGC และ (c) Kaolin (Tiande et al., 2021)	35
2.35 กราฟการหดตัวของดินตัวอย่าง SMP, GGC และ Kaolin (Tiande et al., 2021).....	36
2.36 เปรียบเทียบ SWCC ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและเปลี่ยนแปลงปริมาตรดินตัวอย่าง (a) SMP, (b) GGC และ (c) Kaolin. (Tiande et al., 2021).....	37
3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งดินเหนียวบวมตัวที่ใช้ศึกษา (พรพจน์ ต้นเส็ง, ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร และ คณะ, 2549).....	39
3.2 ตำแหน่งของแหล่งเก็บดินเหนียวกระจายตัว	40
3.3 ลักษณะดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัว WH – 00	40
3.4 ลักษณะดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวที่ WH – 50.....	41
3.5 ลักษณะดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวที่ WH – 100.....	41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

3.6 เปรียบเทียบการเสียรูปกับความเค้นหลังทำให้ตัวอย่างเป็ยก (ASTM D 4546, 2003).....	43
3.7 การทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (a) ก่อนการหดตัว (b) หลังสิ้นสุดการหดตัว.....	45
3.8 ตัวอย่างดินบดอัด WH-50 ก่อนการติดตั้งเสาเข็มเหล็ก.....	46
3.9 แสดงลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด.....	46
3.10 ลักษณะแท่งเหล็กกลม SD 40 ที่ใช้จำลองแทนเสาเข็ม.....	47
3.11 กดเสาเข็มเหล็กกลบนตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องกดคอนกรีต.....	48
3.12 แสดงหน้าตัดแท่งเหล็กกลม SD 40 ที่ใช้จำลองแทนเสาเข็ม ฝังอยู่ในแบบหล่อ.....	48
3.13 ลักษณะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณแท่งเหล็กกลมที่ใช้จำลองแทนเสาเข็ม.....	49
3.14 แสดงการประกอบติดตั้งเครื่องมือ.....	50
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวรวมตัวกับ Atterberg Limit.....	51
4.2 การบวมตัวอิสระ (Free Swell Test).....	52
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเนื่องจากการบวมตัวกับดัชนีพลาสติกของดินเหนียวรวมตัวใน งานวิจัยนี้.....	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อปริมาณความชื้น.....	54
4.5 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ.....	55
4.6 กำลังรับแรงเฉือน (Undrained Shear Strength) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม กับดัชนี พลาสติก.....	56
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน WH-00.....	57
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน WH-50.....	57
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน WH-100.....	58
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการลดลงของปริมาณน้ำในตัวอย่าง WH-00.....	58
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการลดลงของปริมาณน้ำในตัวอย่าง WH-50.....	59
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการลดลงของปริมาณน้ำในตัวอย่าง WH-100.....	59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

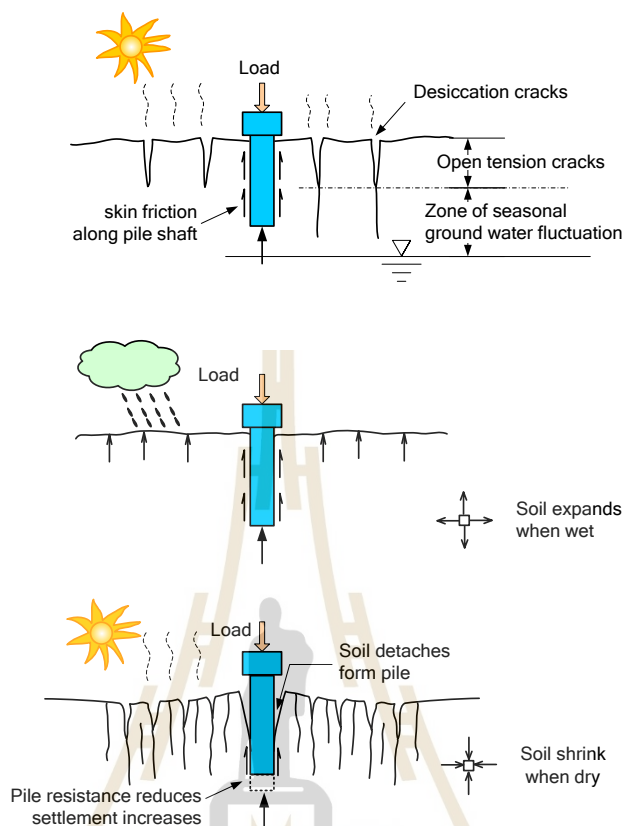
รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิต่ำ 60	60
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนคงค้างกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิต่ำ 61	61
4.15 รอยแยกระหว่างดินกับแท่งเหล็กเนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างดิน 62	62
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับดัชนีพลาสติก ... 63	63
4.17 การหาค่า Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิวจากความสัมพันธ์ส่วนที่เป็นเส้นตรงก่อนถึงจุดที่มีหน่วยแรงสูงสุด 63	63
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิวกับปริมาณน้ำในตัวอย่างทดสอบ 64	64
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor กับปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน 65	65
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor กับ Undrained shear strength 66	66
4.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor กับ Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบกำลังเสาเข็ม (Vesic, 1977) กับงานวิจัยนี้ 67	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาดินเหนียวบวมตัวในประเทศไทยยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายในงานวิศวกรรมฐานราก เนื่องจากมีปัญหาที่เป็นกรณีศึกษาไม่มากเมื่อเทียบกับปัญหาดินเหนียวบวมตัวในระดับนานาชาติ โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา ซึ่ง Dasong (2013) ได้แสดงตัวเลขประมาณการไว้ว่าบ้านร้อยละ 25 ในประเทศสหรัฐอเมริกามีความเสียหายเนื่องจากดินเหนียวบวมตัว และได้มีการประมาณมูลค่าความเสียหายไว้ที่ 2.3 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งดินเหนียวบวมตัวได้สร้างความเสียหายอย่างมาก แต่ผู้คนยังไม่ได้ตระหนักถึงปัญหานี้ สำหรับในประเทศไทยไม่มีการรายงานปัญหาดินเหนียวบวมตัวอย่างจริงจัง ซึ่งในบางครั้งเกิดปัญหาการทรุดตัวของอาคารแต่ด้วยการที่วิศวกรยังขาดความรู้ความเข้าใจเรื่องดินบวมตัว จึงได้วิเคราะห์ปัญหาผิดประเด็น สำหรับปัญหาทางวิศวกรรมที่เกิดจากดินเหนียวบวมตัวในประเทศไทยนั้นได้รายงานไว้โดย พรพจน์ และคณะ (2550), สุทธิศักดิ์ และคณะ (2558), และ จุฬาลักษณ์ และคณะ (2564) โดยแหล่งดินเหนียวบวมตัวที่พบและก่อให้เกิดปัญหาในทางวิศวกรรมเป็นอย่างมากพบในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตั้งอยู่ที่ตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปัญหาเกี่ยวกับการบวมตัวของดินในบางพื้นที่ โดยดินที่พบเป็นดินเหนียวซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ และปัญหาที่พบได้บ่อยคือ การบวมตัวและหดตัวของดินที่เกิดจากการใช้ดินจากแหล่งดินมาถมและบดอัดปรับพื้นที่เพื่อก่อสร้างอาคาร และทำการตอกเสาเข็มซึ่งดินในบริเวณนี้เป็นดินเหนียวแข็งมากจนตอกเสาเข็มลงได้ยาก ดังนั้น จึงตอกเสาเข็มได้ไม่ยาวมาก เมื่อใช้งานสักระยะจะพบปัญหาการบวมตัวของดินเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น และดินหดตัวเมื่อความชื้นในดินลดลง ความชื้นในดินบริเวณนี้แปรผันอย่างมากตามฤดูกาล กล่าวคือเมื่อถึงฤดูฝนดินจะมีความชื้นสูง และเมื่อถึงฤดูแล้ง ดินจะมีความชื้นลดลง ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเสาเข็มสั้นที่ฝังในชั้นดิน โดยรูปที่ 1.1 แสดงกลไกการบวมตัวและหดตัวของดิน ที่ส่งผลต่อแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม เห็นได้ว่าเมื่อก่อสร้างเสาเข็มเสร็จในขณะที่ดินยังมีความชื้นในดินอยู่บ้าง แรงต้านแรงกระทำจากโครงสร้างเกิดจากแรงเสียดทานผิวและแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม เมื่อน้ำในดินเพิ่มขึ้นดินพองตัวออกและจับกับเสาเข็มแน่น ถึงแม้ว่าน้ำในดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนลดลง แต่ดินยังสัมผัสกับเสาเข็มอยู่ และเมื่อน้ำในดินลดลง เนื่องจากการระเหยตามฤดูกาลดินจะเกิดการหดตัวทำให้ดินแยกตัวออกจากเสาเข็มซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานลดลงด้วย



รูปที่ 1.1 แนวคิดด้านกำลังรับแรงเสียดทานที่ลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวรวมตัว โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางกลของดินเหนียวกระจายตัวและดินเหนียวรวมตัวที่ผสมในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก

2) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการสูญเสียของแรงเสียดทานผิวเสาเข็ม เนื่องจากการหดตัวของดินบดอัดแบบมาตรฐานด้วยปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) ที่มีดินเหนียวกระจายตัวและดินเหนียวรวมตัวผสมอยู่เป็นอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณน้ำในดินลดลงเนื่องจากการระเหย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดินเหนียวบวมตัวที่พบใน ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา การศึกษาใช้การทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนในแบบจำลองดินเหนียวบดอัดแบบมาตรฐานที่ความชื้นบดอัดเหมาะสม (OWC) โดยพิจารณาแรงเสียดทานระหว่างดินกับผิวของเสาเข็มเหล็กเนื่องจากการระเหยของน้ำในมวลดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับงานก่อสร้างฐานรากเสาเข็มในโครงสร้างดินที่มีศักยภาพในการบวมตัวที่ได้รับอิทธิพลจากการระเหยน้ำในมวลดิน ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียแรงเสียดทานของผิวเสาเข็ม อีกทั้งการศึกษานี้ยังเป็นองค์ความรู้ในงานวิจัยเกี่ยวกับดินเหนียวบวมตัวต่อไป



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินเหนียวบวมตัว (Expansive Soil)

การออกแบบทางวิศวกรรมปฐพี ดินเหนียวบวมตัวเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถสร้างผลกระทบและความเสียหายให้กับโครงสร้างฐานรากและโครงสร้างอาคารได้ เนื่องจากพฤติกรรมทางกลของดินมีความอ่อนไหวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้าง

2.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมพฤติกรรมการขยายตัวของดิน

มีหลายปัจจัยที่ควบคุมพฤติกรรมการขยายตัวของดิน ซึ่งได้แก่

1) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับดินที่มีศักยภาพในการบวมตัว ตัวอย่างความเสียหายต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในพื้นที่แถบทะเลทรายทางตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกา เนื่องจากดินเหนียวที่อยู่ใกล้พื้นผิวจะอยู่ในสภาพแห้งเมื่อไม่มีฝนตก หลังจากที่โครงสร้างถูกสร้างขึ้นบนดินเหนียวสภาพแห้งนี้ ได้เกิดความเสียหายจากการบวมตัวของดินขึ้น สาเหตุมาจากการรั่วซึมของท่อประปาที่เป็นแหล่งที่มาของความชื้นที่เพิ่มขึ้นในดินใต้อาคาร ดินเหนียวดังกล่าวดูดซับน้ำเข้าไปมวลดินจึงเกิดการบวมตัว

2) ปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียว อนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กและประกอบด้วยโครงสร้างแบบสองชั้น เนื่องจากแรงดันน้ำในรูพรุนจะดูดน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคดิน เมื่อดินชนิดนั้นๆ ยังมีอนุภาคขนาดดินเหนียวในดินแห้งสูงชัน ความต้องการดูดน้ำเข้าไปในดินมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้ศักยภาพในการบวมตัวของดินจะสูงขึ้น

3) ชนิดของอนุภาคขนาดดินเหนียว ด้วยน้ำหนักแห้งที่เท่ากัน อนุภาคดินเหนียวไคโอลิไนต์ (ค่าความไวตัว 0.3 ถึง 0.5) มีการบวมตัวน้อยกว่าอนุภาคดินเหนียวโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์มาก (ค่าความไวตัว 4 ถึง 7) (Holtz and Kovacs, 1981) ส่งผลให้มีการดึงดูดน้ำต่อหน่วยมวลแห้งของอนุภาคดินเหนียวมากขึ้น

4) ความหนาแน่นและปริมาณความชื้น โดยทั่วไปศักยภาพในการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นลดลง และมักเกิดขึ้นกับดินเหนียวแห้งในช่วงฤดูแล้ง แม้ดินเหนียวที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำและปริมาณความชื้นสูงอาจไม่มีการบวมตัวเพิ่มแต่ยังคงมีผลทำให้โครงสร้างทรุดตัวลงเมื่อดินเกิดการแห้งตัว ดังนั้นจึงไม่ใช่เรื่องแปลกที่ดินเหนียว

บริเวณใกล้ผิวดินจะมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในช่วงฤดูดังกล่าว ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศว่าดินจะดูดซึมน้ำและขยายตัวในช่วงฤดูฝนหรือหดตัวและแห้งลงในช่วงฤดูแล้ง

5) น้ำหนักกดทับ (Surcharge Pressure) จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแสดงให้เห็นว่าปริมาณการบวมตัวจะลดลงเมื่อค่าแรงดันรอบข้าง (Confining Pressure) เพิ่มขึ้น ผลกระทบของน้ำหนักกดทับมีความสำคัญ เนื่องจากโดยปกติแล้วโครงสร้างที่รับน้ำหนักได้ไม่มาก เช่น งานพื้นคอนกรีต ทางเท้า หรือฐานรากแผ่พื้นวางบนดินมักได้รับผลกระทบจากแรงดันดินที่ขยายตัวดันโครงสร้างให้เกิดความเสียหาย

2.1.2 ศักยภาพการบวมตัว (Expansion Potential)

สิ่งสำคัญของการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินที่บวมตัว คือการจำแนกตามระดับของการบวมตัวที่อาจเกิดขึ้นว่ามีศักยภาพการบวมตัวต่ำมาก ต่ำ ปานกลาง สูง หรือสูงมาก มีหลายวิธีในการจำแนกดินที่บวมตัวและวิธีที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้ วิธีที่ใช้กันทั่วไปในการกำหนดศักยภาพการบวมตัวของดิน ดังนี้

1) ปริมาณดินเหนียว (Clay Content) กำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินที่ละเอียดกว่า 0.002 มม. โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้งของดินทั้งหมด ใช้เปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของดินทั่วไปเทียบกับดินที่มีศักยภาพในการบวมตัวโดย Holtz and Gibbs (1956) และตารางที่ 2.2 แสดงเกณฑ์การวัดศักยภาพการบวมตัวของดินในงานวิจัยต่างๆ ที่รายงานโดย Lew (2010)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินทั่วไปเทียบกับดินที่มีศักยภาพในการบวมตัว (Holtz and Gibbs, 1956)

Expansion potential	Very low	Low	Medium or moderate	High	Very high or critical
Clay content (<2 μm)	0–10%	10–15%	15–25%	25–35%	35–100%
Plasticity index (see note)	0–10	10–15	15–25	25–35	>35
Expansion index test	0–20	21–50	51–90	91–130	>130
HUD criteria (% swell at $\sigma_v = 0$ psf)	—	0–10	10–20	20–30	>30
HUD criteria (% swell at $\sigma_v = 60$ psf)	—	0–4	4–8	8–12	>12
HUD criteria (% swell at $\sigma_v = 144$ psf)	—	0–2	2–6	6–10	>10
HUD criteria (% swell at $\sigma_v = 650$ psf)	—	0–0.5	0.5–1.5	1.5–3.5	>3.5

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพการบวมตัวของดิน (Lew, 2010)

Parameter	Reference	Degree of Expansion			
		Low	Medium	High	Very High
LL (%)	Chen, 1975	<30	30-40	40-60	>60
	Chen, 1975	0-15	10-35	20-55	>55
PI (%)	Holtz and Gibbs, 1956	<20	12-34	23-45	>45
Clay Content (%)	Holtz and Gibbs, 1956	<17	12-27	18-37	>27
Clay Content (%)	Holtz, 1959	-	13-23	20-31	>28
Swell Percent (%)	Thomas <i>et al.</i> , 2000	<3.0	3.0-6.0	6.0-9.0	>9.0
Swell Pressure (kPa)	Thomas <i>et al.</i> , 2000	<81	81-153	153-225	>225
Activity	Skempton, 1953	<0.75	0.75-1.25		>1.25

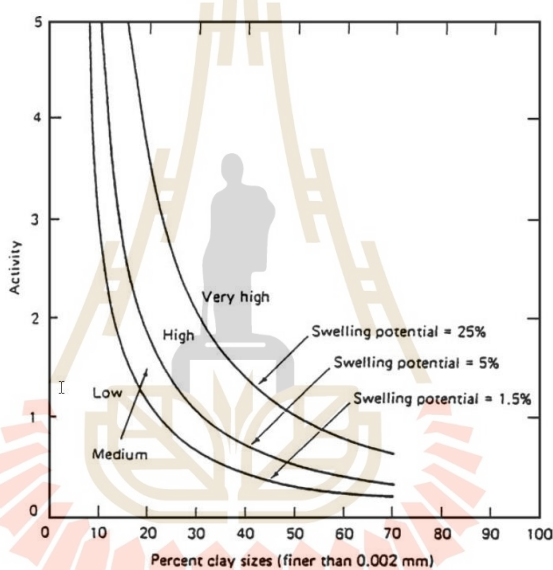
2) ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) เป็นผลต่างระหว่างพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก หากใช้ตารางที่ 2.1 เป็นเกณฑ์การจำแนก ต้องใช้ PI ของตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ทั้งหมด โดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) เช่น ค่า PI ของตัวอย่างดินชนิดนี้เท่ากับร้อยละ 39 และเปอร์เซ็นต์ของดินทั้งหมดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่า 84 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่า PI ของดินตัวอย่างทั้งหมดจึงมีค่า 39 คูณ 0.84 เท่ากับ 32.76 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2.1 ดินชนิดนี้ถูกจัดเป็นดินประเภทที่มีศักยภาพในการบวมตัวสูง (High Expansion Potential)

3) แผนภูมิการจำแนกดินบวมตัว (Expansive Soil Classification Chart) Seed *et al.* (1962) ได้พัฒนาแผนภูมิการจำแนกตามปริมาณและความไวตัวของอนุภาคดินเหนียวเท่านั้น

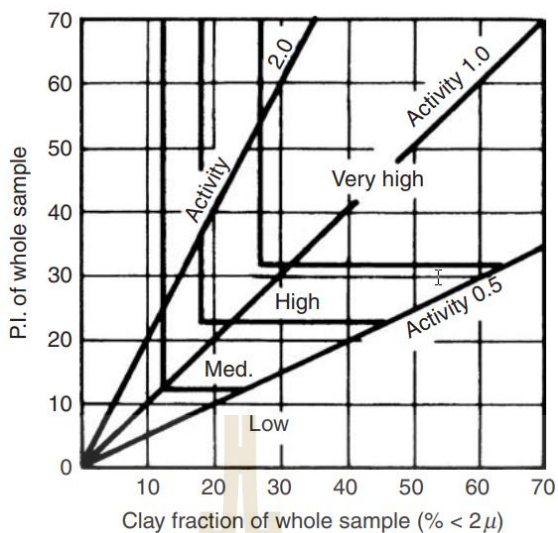
ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยพิจารณาค่าความไวตัว (Activity) จากความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง Skempton (1953) ได้นิยามค่าความไวตัวของดินไว้ดังสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$Activity = \frac{Plasticity\ index}{Percent\ of\ clay\ size\ particle\ (less\ than\ 0.002\mu)} \quad (2.1)$$

4) Van der Merwe (1964) ได้เสนอแผนภูมิการจำแนกดินบวมตัวดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยพิจารณาจากดัชนีพลาสติก เปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวในตัวอย่างดินทั้งหมด และความไวตัวของอนุภาคดินเหนียว จึงสามารถระบุประเภทความเป็นดินที่มีศักยภาพในการบวมตัวของดิน



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการจำแนกศักยภาพการบวมตัวของดิน (Seed et al., 1962)

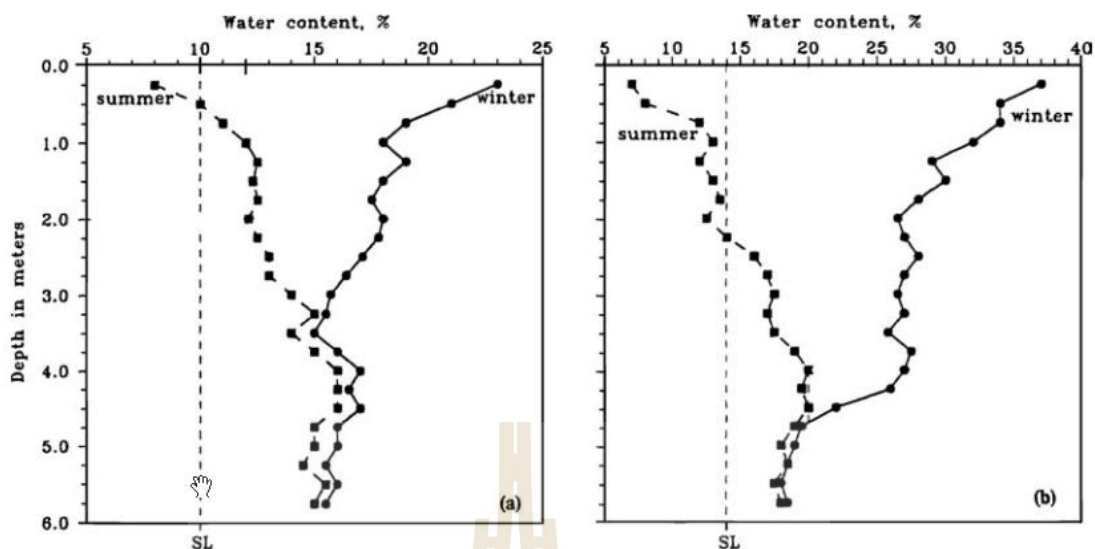


รูปที่ 2.2 แผนภูมิการจำแนกศักยภาพการบวมตัวของดิน (Van der Merwe, 1964)

2.1.3 หลักการเบื้องต้นของดินบวมตัว (Basic Expansive Soil Principles)

1) ความลึกของการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามฤดูกาล (The Depth of Seasonal Moisture Change) ดินเหนียวที่ใกล้ผิวดินมักจะมีค่าปริมาณน้ำแตกต่างกันขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาล ในช่วงที่อากาศร้อนและแห้ง ปริมาณน้ำจะต่ำกว่าช่วงฝนตก ดังนั้นบริเวณผิวดินเกิดความผันแปรของปริมาณน้ำมากที่สุด และการเปลี่ยนแปลงลดลงตามระดับความลึก ดังแสดงรูปที่ 2.3 แสดงปริมาณน้ำเทียบกับความลึกของแหล่งดินเหนียวสองชนิดที่ตั้งอยู่ในเมือง Irbid ประเทศจอร์แดน (Al-Homoud et al., 1997) พบว่าในที่ร้อนแห้งแล้ง ปริมาณน้ำในดินต่ำกว่าในฤดูหนาวที่เปียกชื้นอย่างมาก และปริมาณน้ำต่ำสุดใกล้ผิวดินจะต่ำกว่าขีดจำกัดการหดตัว (SL) บ่งบอกถึงการระเหยออกของน้ำบริเวณผิวดิน (Desiccation) แห่งอย่างรุนแรง เมื่อระดับความลึกสูงขึ้นปริมาณน้ำค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างความลึกของการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามฤดูกาลบางครั้งเรียกว่า ความลึกของโซนเคลื่อนตัว (The Depth of The Active Zone) หรือ Simply The Active Depth จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

ภูมิอากาศ (Climate) เช่น ระยะเวลาของฤดูแล้งและฤดูฝนตลอดจน อุณหภูมิและความชื้นตามช่วงฤดูกาล



รูปที่ 2.3 แสดงปริมาณน้ำเทียบกับความลึกของแหล่งดินเหนียวสองชนิด

(Al-Homoud et al., 1997)

ลักษณะดิน (Soil Characteristics) ลักษณะของแร่ดินเหนียว ปริมาณดินเหนียว และความหนาแน่น

ตัวแปรจากสถานที่ (Site Variables) เช่นการมีพืชพรรณ ที่สามารถดูดความชื้นในดินและความลึกของระดับน้ำบาดาล

2) แรงดึงน้ำในมวลดิน (Soil Suction)

แรงดึงรวมในมวลดิน (Total Suction, s_t) ของดินที่ไม่อิ่มตัวเป็นผลรวมของ matric suction, s_m และ osmotic suction, s_o ดังสมการ 2.2 (Fredlund and Rahardjo, 1993)

$$s_T = s_m + s_o = (u_a - u_w) + s_o \quad (2.2)$$

โดย s_t คือ แรงดึงรวมในมวลดิน s_m คือ แรงดึงน้ำแบบเมตริก u_a คือ แรงดันอากาศ u_w คือ แรงดันรูพรุน และ s_o คือ แรงดึงน้ำแบบออสโมติก

แรงดึงน้ำแบบเมตริก (Matric Suction, s_m) เป็นความแตกต่างของแรงดันระหว่างแรงดันน้ำ และแรงดันอากาศ (Air Pressure) ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ($s = \mu_a - \mu_w$)

แรงดึงน้ำแบบออสโมติก (Osmotic Suction) เป็นแรงดึงเนื่องจากดิน มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างเม็ดดินแตกต่างกัน

3) ดัชนีความชื้นของโทรนเวต (Thornthwaite Moisture Index) เป็นดัชนีชี้วัด ความรุนแรงของสภาพอากาศในระยะยาว โดยคำนวณจากค่าปริมาณน้ำฝน และการระเหย ของอากาศ (อุณหภูมิ) ที่ได้จากบันทึกข้อมูลของสภาพอากาศโดยค่าดัชนีที่เป็นบวกแสดงถึงความชื้น ในดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝน โดยค่าที่เป็นบวกสูงขึ้น สภาพอากาศจะมีความชื้นมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากค่าดัชนีติดลบจะแสดงถึงการลดลงของความชื้นในดินอันเนื่องมาจากการขาด น้ำฝน และ ดัชนีที่เป็นศูนย์จะบ่งบอกถึงสภาพความชื้นสมดุลในดิน มีปริมาณน้ำฝนเพียงพอ เพื่อชดเชยการสูญเสียความชื้นในดินเนื่องจากการระเหย

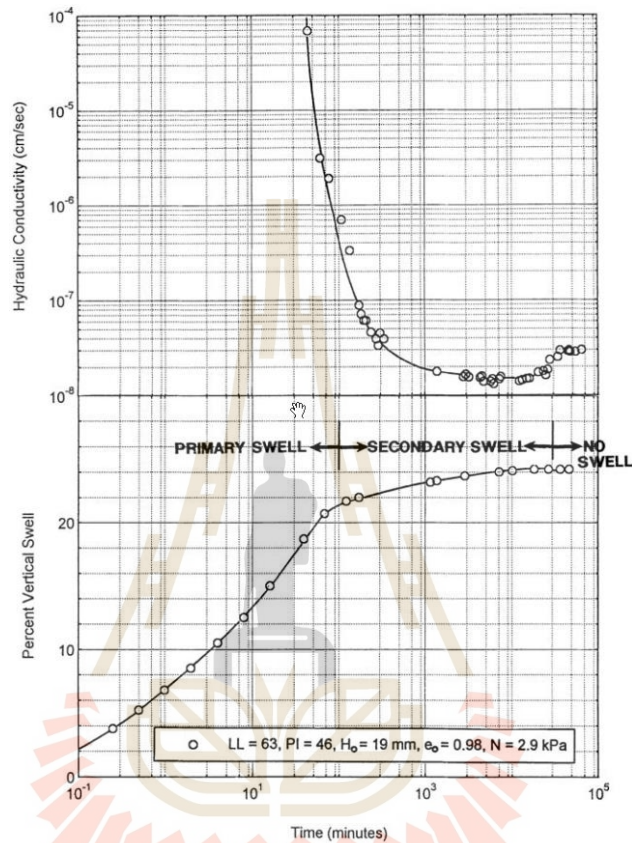
ดัชนีความชื้นของ Thornthwaite อาจไม่ได้ส่งผลกระทบต่อบริเวณ ที่มีดินบวมตัวอยู่ แต่เป็นการบ่งชี้ว่าสภาพอากาศที่ไม่รุนแรง และ/หรือปริมาณน้ำฝนเพียงพอที่ทำให้ ดินอยู่ในสภาพเปียกชื้นอย่างถาวร

4) การวินิจฉัยและการบวมตัวของดินเหนียวแห้ง (Identification and Swelling of Desiccated Clay) โครงสร้างที่สร้างขึ้นบนดินเหนียวแห้งอาจได้รับความเสียหายเนื่องจากการยกตัวของดินเมื่อเกิดการขยายตัว Chen (1988) พบว่าดินเหนียวแห้งที่มีความชื้นตามธรรมชาติ ต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ สามารถดูดซับความชื้นได้สูงถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายจากการขยายตัวของดิน Day (1997) ดังรูปที่ 2.4 แสดงผลการทดสอบการบวมตัว และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำเปลี่ยน สามารถใช้แบ่งช่วงการบวมดินเหนียวออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

1) การบวมตัวปฐมภูมิ (Primary Swell) เริ่มต้นเวลาเท่ากับศูนย์ (เริ่มทำให้ดินเปียก) ถึงประมาณ 100 นาที พบว่าค่าการซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) ของดินลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดจากการปิดรอยแตกของดินเมื่อดินเหนียวพองตัว เมื่อสิ้นสุดช่วงการบวมตัวปฐมภูมิ ค่าการซึมผ่านอยู่ที่ $7 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$

2) การบวมตัวทุติยภูมิ (Secondary Swell) การบวมตัวทุติยภูมิเกิดขึ้น ในช่วงเวลาประมาณ 100 ถึง 20,000 นาที หลังจากการทำให้เปียก พบว่าค่าการซึมผ่านยังคงลดลง ในขณะที่ดินเหนียวยังคงพองตัวที่เวลาประมาณ 5,000 นาที ค่าการซึมผ่าน $1.5 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ เนื่องจากขนาดรอยแตกลดลง และช่วงหลังเวลา 5,000 ถึง 20,000 นาที ค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้น เล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากการรวมกันของการบวมตัวในขั้นทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าอัตราส่วนช่องว่าง เพิ่มขึ้น (Void Ratio) และอากาศในเนื้อดินลดลง

3) สภาวะคงตัว (Steady-State) ในช่วงเวลาประมาณ 20,000 นาที พบว่าดินเหนียวหยุดบวมตัว หลังจากการทำให้ดินเปียกจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ และค่าการซึมผ่านคงที่ประมาณ $3 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$



รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบการบวมตัว และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Day, 1997)

Chen (1988) สรุปว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและการบวมตัวเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งชี้ความเสียหายของโครงสร้างได้ เพราะยิ่งการซึมผ่านน้ำสูง ความน่าจะเป็นของการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันของฐานรากก็จะยิ่งมากขึ้น และมี 3 ปัจจัยที่ควบคุมการซึมผ่านและอัตราการบวมตัวของดินแห้ง ดังนี้

1) การเกิดรอยแตกจากดินแห้ง (Development of Desiccation cracks) ยิ่งมีขนาดและการกระจายของรอยแตกในดินเหนียวมากเท่าใด ทางเดินที่น้ำจะซึมเข้าสู่ดินจะยิ่งมากขึ้น และอัตราการบวมจะเร็วขึ้น

2) แรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นที่ปริมาณความชื้นต่ำ (Increased Suction at a Lower Water Content) แรงดึงน้ำรวมในมวลดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำลดลง รอยแตกที่หดตัว และมีแรงดึงน้ำสูงช่วยให้น้ำถูกดึงเข้าไปในดินเหนียวได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการบวมตัวสูงขึ้น

3) การแตกของมวลดิน (Slaking) รอยแตกของมวลดินเหนียวแห้ง จะทำให้น้ำซึมเข้าได้อย่างรวดเร็ว

5) การเคลื่อนตัวของฐานรากดินบวมตัว (Expansive Soil Foundation Movement)

การเคลื่อนตัวของของฐานรากดินบวมตัว สองประเภท ดังนี้

1) วงจรของการยกและหดตัว (Cyclic Heave and Shrinkage) ดินเหนียว มีความไวต่อความชื้น ซึ่งจะขยายตัวเมื่อได้รับน้ำและหดตัวเมื่อแห้ง ตัวอย่างเช่น การออกแบบพื้นวางบนดิน (Slab-On-Ground) ซึ่งพื้นอาจยกตัวขึ้นในฤดูฝนและหลังจากนั้น จะเสียรูปเมื่อดินเหนียวแห้งในฤดูแล้ง หากทำให้เกิดวงจรของการเคลื่อนตัวยกและหดตัว จะทำให้เกิดการแตกร้าวและความเสียหายต่อโครงสร้าง

2) การบวมขึ้นบริเวณใต้จุดศูนย์กลางของฐานราก (การยกตัวตรงกลาง) เนื่องจากคาпилลารี (Capillary) ความชื้นสามารถเคลื่อนขึ้นไปในดิน โดยที่ความชื้น จะระเหยไปที่ผิวดิน แต่เมื่อสร้างแบบแผ่นพื้นวางบนดิน (slab-on-grade) จะทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการระเหยของความชื้นพื้นผิวดิน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะค่อยๆสะสมอยู่ที่ศูนย์กลางของฐานรากทำให้เกิดอาการบวมของดินเหนียวและการยกตัวของฐานราก

อัตราการเคลื่อนตัวของฐานราก (Rate of Foundation Movement) มีการระบุว่าความเสียหายอันเนื่องมาจากดินที่ขยายใหญ่ขึ้นเกิดขึ้นภายในสองถึงสามปีแรกหลังการก่อสร้างบ้าน (Meehan and Karp, 1994) อาจเกิดจากการจัดสวน น้ำที่ไหลเข้าใต้ขอบฐานรากทำให้รากฐานยกตัวขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสร้างฐานรากบนดินเหนียวแห้งที่มีศักยภาพในการบวมตัว

6) ผลกระทบจากพืช (Effects of Vegetation) ตัวอย่างเช่น รากของต้นไม้ไม่สามารถดูดความชื้นจากพื้นดิน ซึ่งอาจทำให้ดินเหนียวบริเวณใกล้ผิวดินเกิดการหดตัวและฐานรากเสียรูปได้ Biddle (1979, 1983) ได้สำรวจต้นไม้ 36 ชนิด ครอบคลุมชนิดของต้นไม้และชนิดของดินเหนียว ได้ข้อสรุปว่าต้นไม้ป็อปลาร์ส่งผลกระทบมากกว่าพันธุ์อื่นมาก และปริมาณการเคลื่อนตัวของดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะการหดตัวของดินเหนียว Hammer and Thompson (1966) ระบุว่าไม่ควรปลูกต้นไม้ใกล้กับฐานรากต้นไม้เป็นระยะอย่างน้อยครึ่งหนึ่งของความสูงของต้นไม้เมื่อโตเต็มที่และควรเลือกพันธุ์ไม้ที่มีรากตื้นและเจริญเติบโตช้า จากกรณีศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่า เมื่อต้องรับมือ

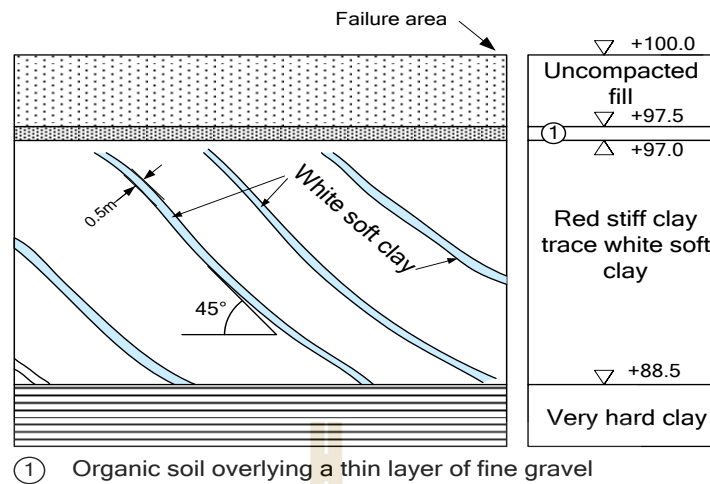
กับดินเหนียวบวมตัว ควรพิจารณาความเป็นไปได้ของความเสียหายเนื่องจากการหดตัวและบวมตัวของดินเหนียวที่เกิดเนื่องจากการดึงความชื้นโดยรากของต้นไม้

2.2 การศึกษาผลของการบวมตัวและหดตัวของดินเหนียวบวมตัวบดอัดต่อฐานรากตื้น (พรพจน์ และคณะ, 2550)

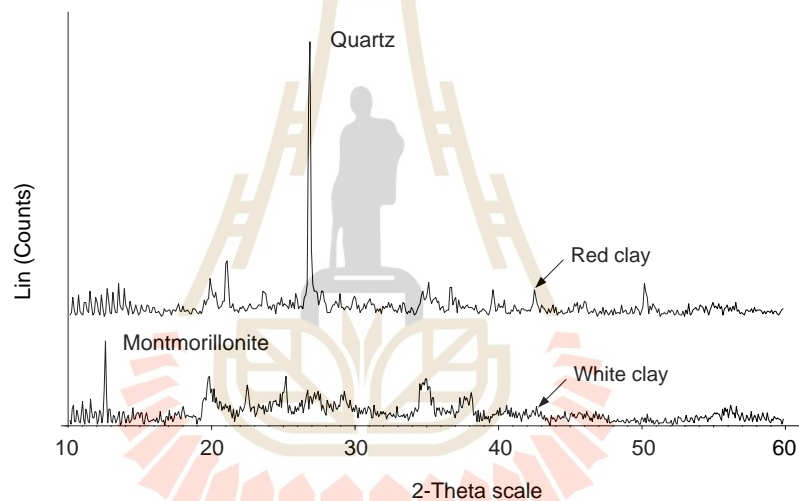
จากการศึกษา ผลของการบวมตัวและหดตัวของดินเหนียวโดย พรพจน์ และคณะ (2550) พบว่าดินบวมตัวที่พบเป็นสาเหตุหลักของการวิบัติคันดินของอ่างเก็บน้ำในตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ดังรูปที่ 2.5 แสดงการวิบัติลาดดินอ่างเก็บน้ำเนื่องจากชั้นดินเหนียวบวมตัวที่แทรกตัวอยู่ในบนชั้นดินเหนียวแข็งเอียง 45 องศา กับแนวระนาบ ดังแสดงในรูปตัดชั้นดินดังรูปที่ 2.6 ทั้งนี้ ใช้ผลการศึกษาลักษณะชั้นดิน คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดโดย พรพจน์ (2550) แสดงให้เห็นว่าดินชนิดนี้มีแร่ montmorillonite เป็นองค์ประกอบหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากการทดสอบ X-ray Diffraction



รูปที่ 2.5 การวิบัติลาดดินอ่างเก็บน้ำเนื่องจากชั้นดินเหนียวบวมตัวแทรกแบบเอียงตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (พรพจน์ และพลอนันต์, 2552)

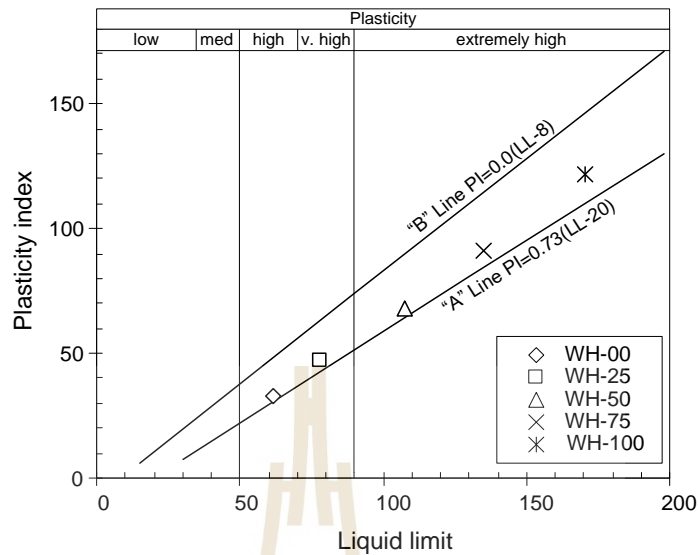


รูปที่ 2.6 รูปตัดชั้นดินจากการขุดอ่างเก็บน้ำลึก 9 เมตร (พรพจน์ และคณะ, 2550)



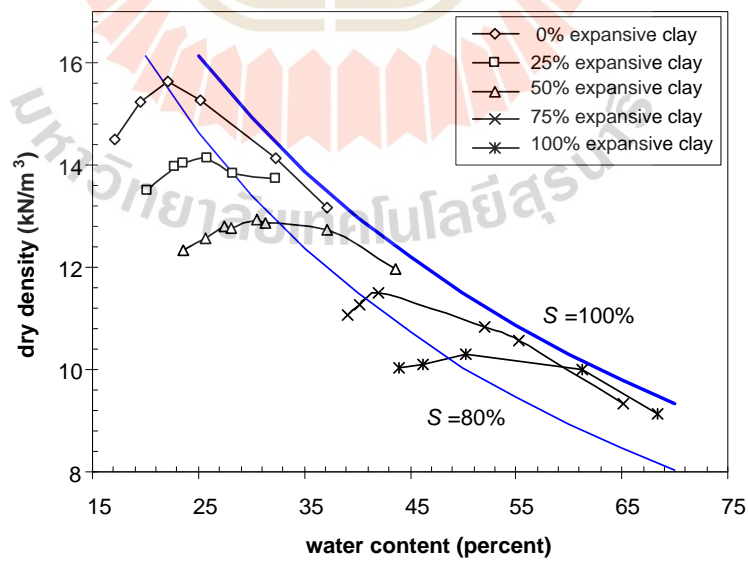
รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction (พรพจน์ และคณะ, 2550)

พรพจน์ และคณะ (2550) ได้เก็บตัวอย่างดินที่ขุดขึ้นมาไปทดสอบความเป็นพลาสติก การบดอัดของดิน และการทดสอบการบวมตัวและหดตัว เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุถม โดยสมมุติว่าดินเหนียวแข็งและดินเหนียวบวมตัวอาจมีการผสมกันในขั้นตอนการขุดดิน จึงได้ทดลองผสมดินเหนียวบวมตัวสีขาวที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ แทนเป็น WH-00, WH-25, WH-50, WH-75 และ WH-100 ตามลำดับ เพื่อจำลองการผสมดินเหนียวแข็ง ด้วยดินเหนียวบวมตัวการทดสอบ ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่า ค่าดัชนีพลาสติกของดินเหนียวบวมตัว เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของดินเหนียวบวมตัวที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม ดังรูปที่ 2.8 เป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อมีดินเหนียวบวมตัวผสมเกินกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงมาก (Extremely High Plasticity) โดยการจำแนกความเป็นพลาสติกที่สูงมากนี้อ้างอิงจาก Head (1980)



รูปที่ 2.8 ความเป็นพลาสติกของดินเหนียววมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)

ผลการทดสอบการบดอัดดังแสดงรูปที่ 2.9 ซึ่งให้เห็นว่าดินที่มีดินเหนียววมตัวผสมอยู่ มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง และมีปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้น และผลการทดสอบการบวมตัว และหดตัวแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.9 ผลการบดอัดดินเหนียววมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)

ตารางที่ 2.3 สรุปผลการทดสอบการบวมตัวและหดตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)

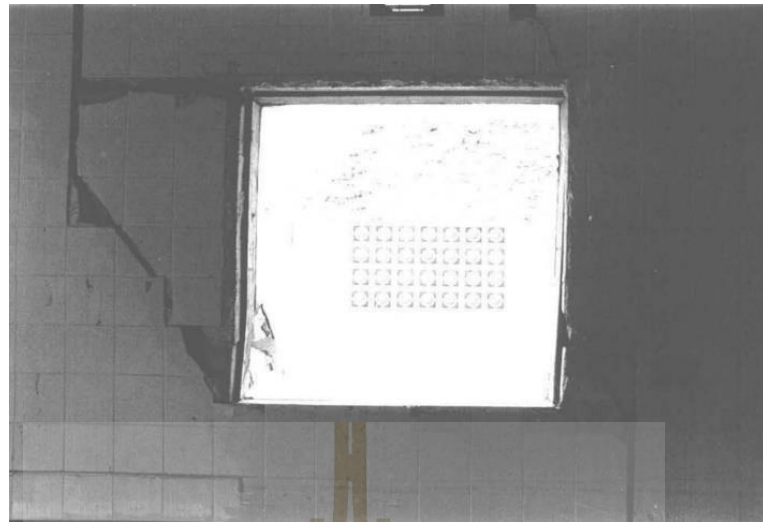
ตัวอย่าง	บดอัดในแบบหล่อ CBR		ตัวอย่างไม่บดอัด	
	การบวมตัวสูงสุด	การหดตัวหลังจากการบวมสูงสุด	Free swell; Gibb&Holtz	Linear shrinkage; BS 1337
WH-00	6.0	-6.1	80	-17.4
WH-25	13.0	-7.1	140	-19.4
WH-50	19.0	-10.1	190	-23.0
WH-75	19.0	-9.3	190	-24.8
WH-100	21.0	-9.6	270	-24.9

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวบวมตัวที่พบตามธรรมชาตินี้ หากนำไปใช้เป็นวัสดุถมอาจก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวจากการหดตัวหรือบวมตัวของดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อฐานรากของอาคารที่เป็นฐานรากตื้นได้ ดังนั้น ผู้เขียนได้สังเกตเห็นถึงผลกระทบของดินเหนียวบวมตัวต่องานฐานราก จึงเกิดการศึกษาการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาค้ำเนื่องจากดินเหนียวบวมตัว จึงดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาถึงแรงต้านทานผิวของเสาค้ำโดยมีรายละเอียดวิธีการวิจัยและผลการวิจัยต่อไป

2.3 การศึกษาผลกระทบของดินเหนียวบวมตัวต่อโครงสร้าง

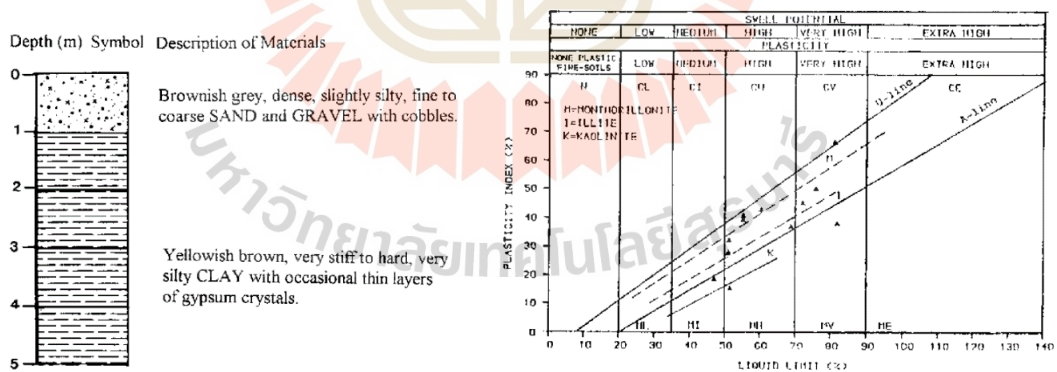
ดินบวมตัวเป็นสาเหตุหนึ่งที่สามารถสร้างความเสียหายอย่างมากต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม ซึ่งโดยพฤติกรรมของดินเหนียวบวมตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ดินจะเกิดการบวมตัวและหดตัวตามฤดูกาล ทำให้เกิดอิทธิพลต่อกลไกการถ่ายเทน้ำหนักของเสาค้ำเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวของดินบริเวณโดยรอบ

Amer and Mohammed (1998) ได้ศึกษาความเสียหายที่เกิดจากดินและหินบวมตัวของอาคารที่พักแห่งหนึ่งทางตอนเหนือของประเทศโอมาน โดยเริ่มปรากฏการแตกร้าวของโครงสร้างอาคารหลังจากผ่านเหตุการณ์น้ำท่วมที่ชุมชนเหล่านี้ได้ไม่นาน โครงสร้างอาคารหลังนี้เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนฐานรากตื้น จากการสำรวจความเสียหายของอาคาร พบผนังมีรอยแตกขนาดตั้งแต่ 5-75 มิลลิเมตร เมื่อประเมินระดับความเสียหายจากรอยแตกของอาคารอยู่ที่ระดับเล็กน้อยจนถึงระดับที่รุนแรงมาก ตามการจำแนกระดับความเสียหายที่มองเห็นได้โดย BRE (1981) ซึ่งผนังห้องครัวแสดงความเสียหายมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยรอยแตกมีขนาดความกว้าง 30-50 มิลลิเมตร จึงได้ทำการสำรวจสภาพแวดล้อมโดยรอบอาคารและทำการเจาะสำรวจดิน



รูปที่ 2.10 รอยแตกร้าวของผนังห้องครัว (Amer & Mohammed, 1998)

ผลการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินจากหลุมเจาะบริเวณใกล้เคียงอาคารหลังนี้ จำนวน 12 ตัวอย่าง นำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a) และ (b) พบว่าตัวอย่างดินส่วนใหญ่ (9 ตัวอย่าง) เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง และบางส่วนเป็นตะกอนที่มีความเป็นพลาสติกสูง (MH) และพลาสติกต่ำ (ML)



(a)

(b)

รูปที่ 2.11 (a) รูปตัดชั้นดิน (COWIconsult, 1988) (b) แผนภูมิจำแนกศักยภาพในการบวมตัว(Dakshanamurthy & Raman, 1973)

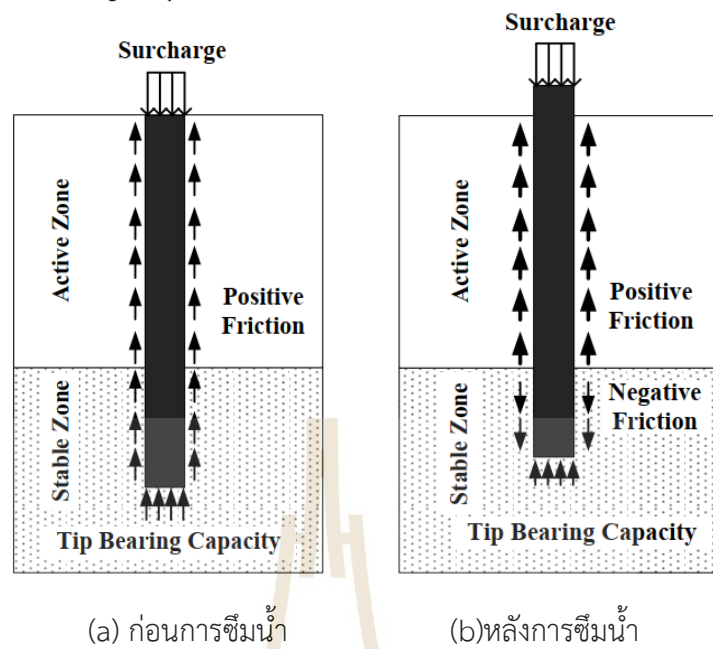
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติพื้นฐานดินตัวอย่างทดสอบ (COWIconsult, 1988)

Sample	Depth (m)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	% < 63 μ m	USC	FS (%)
MQV1*	0.3-0.6	9.7	-	52	37	15	79	MH	45
MQV2*	0.6-1.0	20.3	16.8	47	29	18	64	ML	45
MQV3*	1.5-1.7	25.2	16.4	69	33	36	86	CH	70
MQV4*	2.5	23.7	17.8	82	44	38	87	MH	95
MQV5	3.0-4.0	20.0	-	76	26	50	84	CH	-
MQV6	5.0-6.0	20.0	-	72	27	45	76	CH	-
MQV7	7.0-8.0	18.0	-	51	21	31	66	CH	-
MQV8	9.0-10.0	20.0	-	81	14	67	87	CH	-
MQV9	11.0-12.0	12.0	-	51	24	27	86	CH	-
MQV10	13.0-14.0	12.0	-	56	16	40	88	CH	-
MQV11	15.0-16.0	10.0	-	60	17	43	86	CH	-
MQV12	17.0-18.0	14.0	-	56	17	39	66	CH	-

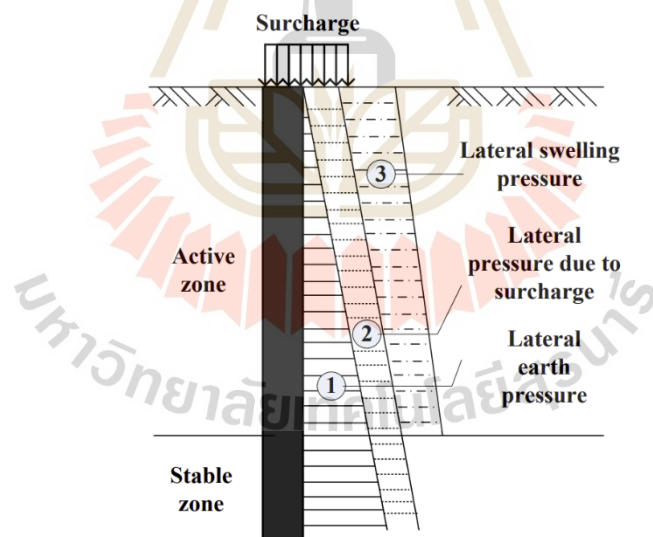
w = water content, γ_d = dry unit weight, w_L = liquid limit, w_p = plastic limit, I_p = plasticity index, USC = Unified Soil Classification, FS = free swell, * = trial pit samples.

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.4 ดินตัวอย่างมีศักยภาพในการพองตัวสูงร้อยละ 45-95 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ของอาคารหลังนี้ตั้งอยู่บริเวณที่มีดินที่มีศักยภาพในการบวมตัว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในดิน และเนื่องจากไม่เคยมีผู้ศึกษาหรือการรายงานพบดินบวมตัวในชุมชนนี้มาก่อนจึงไม่ได้ออกแบบโครงสร้างมาเพื่อรองรับดินที่มีศักยภาพบวมตัวดังกล่าว Amer and Mohammed (1998) ได้เสนอมาตรการการแก้ไขที่เป็นไปได้ คือ ควรจัดให้มีการระบายน้ำที่พื้นผิวรอบๆอาคาร ควรเว้นระยะการปลูกต้นไม้ประมาณ 3-5 เมตร จากตัวบ้านเพื่อป้องกันความชื้นจากการรดน้ำต้นไม้ และการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างในทันทีรวมถึงการสำรวจแหล่งน้ำใกล้เคียงก่อนการออกแบบโครงสร้างเพื่อป้องกันการเพิ่มความชื้นในดิน

Yunlong & Sai (2015) ได้พบปัญหาฐานรากเสาเข็มถูกติดตั้งในดินที่มีศักยภาพในการบวมตัวที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำนั้น จะได้รับแรงยกตามแนวแกนเสาเข็มเนื่องจากการพองตัวของดินดังกล่าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงการกระจายของหน่วยแรงเสียดทานตามความยาวของเสาเข็มในดินที่บวมตัวทั้งก่อนและหลังเกิดการซึมของน้ำในดินโดยแรงเสียดทานเชิงบวกจะกระจายตลอดความยาวของเสาเข็มก่อนการแทรกซึม และเกิดแรงเสียดทานเชิงลบเกิดขึ้นใน Stable Zone ดังนั้น เสาเข็มมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนขึ้นไปพร้อมกันเนื่องจากดินมีการพองตัวเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น



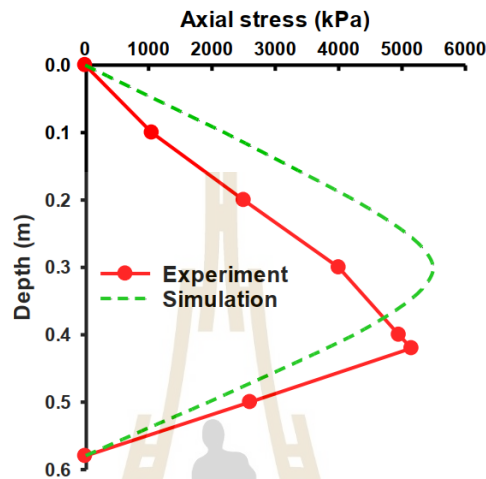
รูปที่ 2.12 การกระจายหน่วยแรงเสียดทานเสาเข็ม (Yunlong & Sai, 2015)



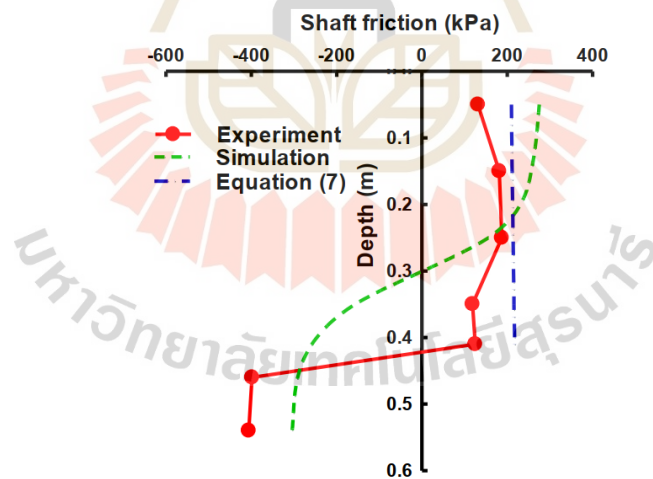
รูปที่ 2.13 การกระจายแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มเมื่อน้ำแทรกซึม (Yunlong & Sai, 2015)

สำหรับความเค้นปกติที่กระทำต่อเสาเข็มนอกจากน้ำหนักกดทับของดินและแรงกระทำจากน้ำหนักกดทับแล้ว ยังมีส่วนสำคัญที่เกิดจากแรงดันบวมด้านข้างซึ่งควรได้รับการพิจารณาอย่างเหมาะสม ดังแสดงรูปที่ 2.13 แสดงการกระจายแรงดันด้านข้างที่กระทำกับเสาเข็ม จากปัญหาข้างต้น Yunlong & Sai (2015) ได้ทำการศึกษาสมการการคำนวณหน่วยแรงเสียดทาน

การยกตัวสำหรับเสาเข็มเดี่ยวในดินบวมตัวที่เสนอโดย Chandler (1968) Burland (1973) Fan (2007) และ Vanapalli and Taylan (2012) เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้อง พบว่าสมการที่เสนอโดย Fan(2007) การทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ และผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์ อิลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน



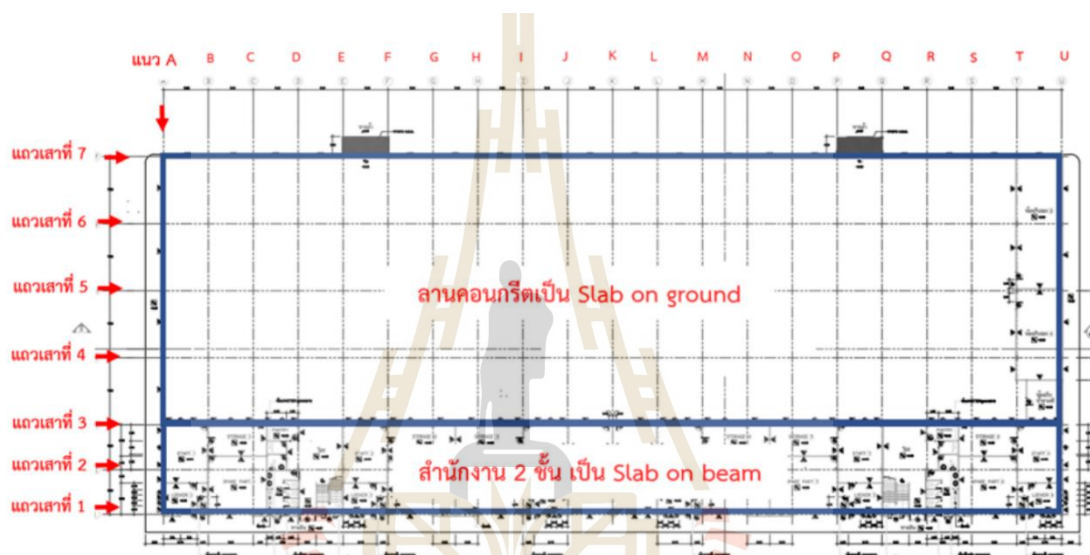
รูปที่ 2.14 เส้นโค้งการกระจายความเค้นตามแนวแกนของเสาเข็ม (Yunlong & Sai, 2015)



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งการกระจายหน่วยแรงเสียดทานเสาเข็ม (Yunlong & Sai, 2015)

การเปรียบเทียบเส้นโค้งการกระจายความเค้นตามแนวแกนและเส้นโค้งการกระจายหน่วยแรงเสียดทานเสาเข็ม ระหว่างการวัดในห้องปฏิบัติการและการจำลอง แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ สรุปได้ว่าวิธีการที่เสนอโดย Fan (2007) ให้ความสมเหตุสมผลการประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานการยกตัวของเสาเข็มเมื่อมีการขยายตัวด้วยดินบวมตัว

จุฬาลักษณ์ (2564) ได้วิเคราะห์ความเสียหายของอาคารโรงงานหลังหนึ่งใน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โครงสร้างโรงงานหลังนี้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก แบ่งเป็นโรงซ่อมบำรุงที่มีพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนดิน และส่วนที่เป็นสำนักงานเป็นพื้นสำเร็จรูปคอนกรีตอัดแรงแบบกลวงวางบนคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้เสาเข็มความยาว 5 เมตร เมื่อทำการสำรวจโครงสร้างอาคาร พบว่าคานที่ใช้รองรับการติดตั้งเครน ที่วางบนหัวเสาในแถวที่ 3 และแถวที่ 7 บริเวณช่วงกลางของอาคารตามผังอาคารในรูปที่ 2.16 เกิดการโก่งตัว โดยค่าระดับการยกตัวสูงถึง 82 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับเสาต้นที่อยู่ทางขวาสุด (ในแถว U) ซึ่งสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้

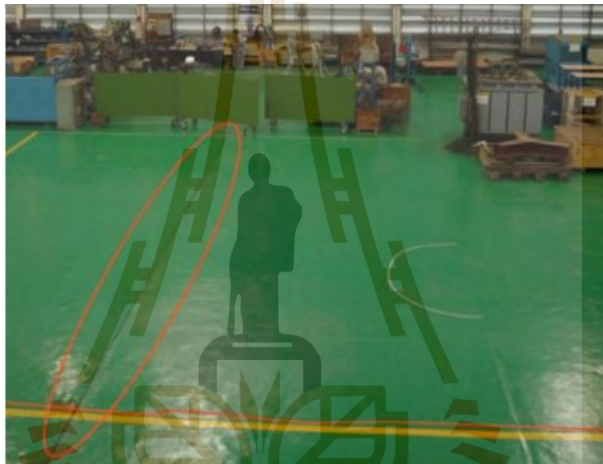


รูปที่ 2.16 ผังภายในของอาคารโรงงาน (จุฬาลักษณ์, 2564)

ความเสียหายอื่นๆที่พบในส่วนของสำนักงาน ได้แก่ ผนังของอาคารเกิดรอยแตกร้าว ดังรูปที่ 2.17 (a) และพื้นคอนกรีตเกิดรอยแยก ดังรูปที่ 2.17 (b) แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของโครงสร้างอาคารที่ไม่เท่ากัน สำหรับภายนอกอาคารพบการยกตัวของอิฐปูทางเท้ารอบอาคารดังรูปที่ 2.17 (c) จากการสำรวจความเสียหายที่กล่าวข้างต้นจึงทำการเจาะสำรวจชั้นดิน โดยเก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 0.00-6.00 เมตร. มาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และจำแนกประเภทดิน พบว่าช่วงความลึกตั้งแต่ 0.50 เมตร จากผิวดินลงไปเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง และที่ความลึกประมาณ 1.50-3.50 เมตร มีความชื้นในดินสูงกว่าที่ความลึกช่วงอื่นๆ



(a)



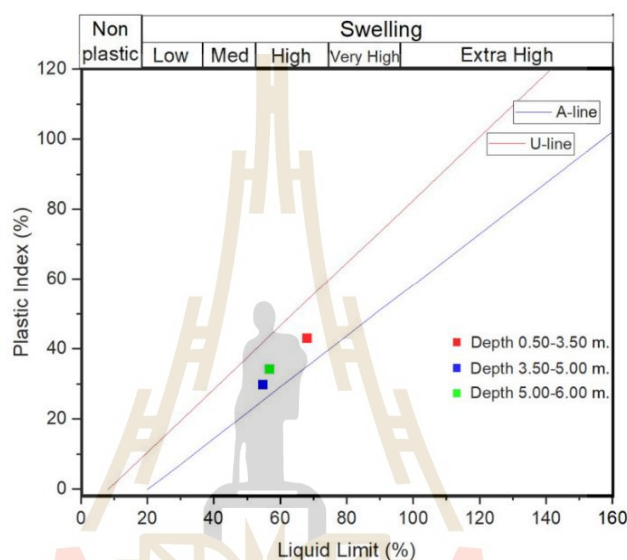
(b)



(c)

รูปที่ 2.17 (a) รอยร้าวของผนังภายในอาคารโรงงาน (b) รอยแยกของแผ่นพื้นคอนกรีตภายในอาคารโรงงาน (c) การยกตัวของอิฐปูทางเท้ารอบอาคารโรงงาน (จุฬาลักษณ์, 2564)

ทำการตรวจสอบการเป็นดินบวมตัวซึ่งใช้พิกัดอัตราเพอร์กเป็นตัวชี้วัด ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าช่วงความลึก 0.50-3.50 เมตร มีศักยภาพการบวมตัวสูง และช่วงความลึกตั้งแต่ 3.50-6.00 เมตร มีศักยภาพการบวมตัวปานกลาง นอกจากนี้ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่ดินเหนียวด้วยการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าตัวอย่างดินมีแร่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้ดินมีการบวมตัวและหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น เมื่อทำการสำรวจพื้นที่รอบอาคาร พบแหล่งเก็บน้ำใกล้กับอาคารที่เป็นสาเหตุของความชื้นสูงของดินในช่วง 1.50-3.50 เมตร



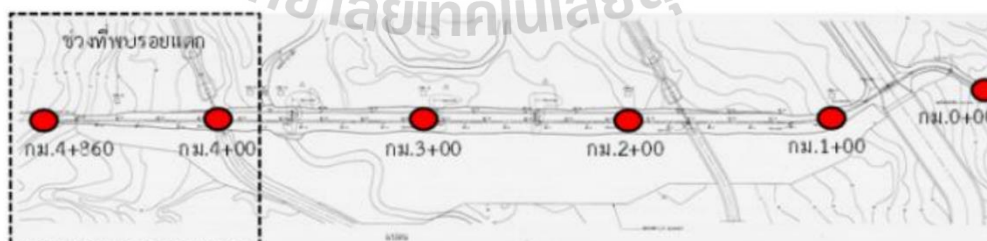
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินบวมตัว กับศักยภาพในการบวมตัว (จุฬาลักษณ์, 2564)

จากผลการศึกษา สรุปได้ว่าสาเหตุหลักที่ทำให้อาคารเกิดความเสียหาย คือ ชั้นดินใต้อาคารเป็นดินเหนียวบวมตัวที่มีความสามารถในการพองตัวสูง ข้อเสนอแนะทางออกแบบอาคารบนชั้นดินเหนียวบวมตัว ได้แก่ การสำรวจชั้นดินว่าชั้นดินเป็นดินบวมตัวหรือไม่ สำหรับพื้นคอนกรีตวางบนดินนั้น ชั้นดินใต้อาคารต้องได้รับการปรับปรุงคุณภาพให้หมดศักยภาพในการบวมตัวก่อนการก่อสร้างโดยความลึกที่มีการปรับปรุงคุณภาพคือความลึกที่น้ำหนักกดทับ (Overburden pressure) มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันการพองตัวของดิน (Swell pressure) สำหรับพื้นคอนกรีตบนคานควรก่อสร้างให้ลอยสูงกว่าระยะการยกตัวของผิวดินที่เกิดจากศักยภาพในการพองตัวของชั้นดิน และออกแบบเสาเข็มให้มีความยาวเกินชั้นดินที่เกิดการบวมตัวเพื่อให้แรงฝืดเพียงพอต่อการต้านการยกตัวของชั้นดิน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความดันในการพองตัว (Swell pressure) และศักยภาพในการพองตัว (Swell potential) เพื่อนำไปประเมินศักยภาพในการพองตัวของดิน รวมถึงการประมาณค่าการยกตัวของดินต่อไป

สุทธิศักดิ์ และคณะ(2558) ได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของรอยแตกตามยาวในถนนบนสันเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี ที่ลักษณะตัวเขื่อนถูกออกแบบเป็นเขื่อนดินถมประเภทแบ่งโซน (Zoned-Earth Dam) ประกอบด้วยชั้น Asphaltic concrete และ prime coat หนา 0.05 เมตร ชั้นหินคลุก หนา 0.20 เมตร ชั้นรองพื้นทางลูกรัง หนา 0.20 เมตร วัสดุเลือก “ก” และ “ข” หนาชั้นละ 0.30 เมตรจากรายงานตรวจสอบสภาพเขื่อน (กรมชลประทาน, 2556) พบว่ามีรอยแตกตามยาว (Longitudinal crack) มีขนาดความกว้างประมาณ 1-10 ซม. และมีความลึกประมาณ 65-75 ซม. ดังแสดงรูปที่ 2.19 ที่แสดงสภาพในปี พ.ศ.2557 บนสันเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ช่วง กม. 3+500 ถึง กม.4+860 ดังรูปที่ 2.20 แม้จะมีการซ่อมแซมชั้นทางด้วยการหยอดยางมะตอยเหลวหรือการบดอัดใหม่แล้วก็ตาม แต่การสำรวจยังพบรอยแตกตามยาวดังกล่าวเกิดขึ้น



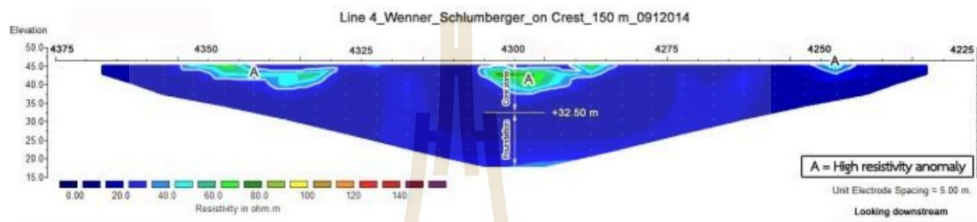
รูปที่ 2.19 รอยแตกตามยาวพบบนสันเขื่อนทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (กรมชลประทาน, 2556)



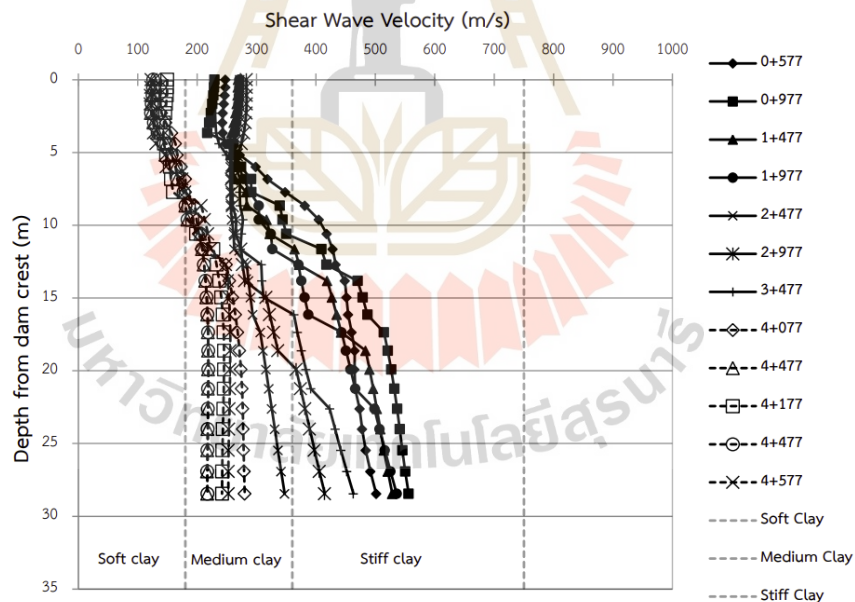
รูปที่ 2.20 บริเวณที่พบรอยแตกตามยาวตั้งแต่ กม.3+500 ถึง กม.4+860 (สุทธิศักดิ์, 2558)

การประเมินเบื้องต้นจากผลสำรวจ Resistivity (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะ-วิศวกรรมศาสตร์, 2557) ดังรูปที่ 2.21 พบว่าบริเวณที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงและมีลักษณะ

เป็นกระเปาะ สอดคล้องกับตำแหน่งที่เกิดรอยแตกตามยาว และความต้านทานไฟฟ้าต่ำในบริเวณที่ยังไม่มีรอยแตก ดังนั้น รอยแตกตามยาวดังกล่าวยังไม่ลุกลามต่อเนื่องกัน ผลการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือน (กรมชลประทาน, 2556) ดังรูปที่ 2.22 บริเวณที่พบรอยแตกตามยาว ช่วง กม.4+000 ถึงไหล่เขื่อนฝั่งซ้าย ส่วนบนของดินถมมีค่าความเร็วแรงเฉือนน้อยกว่า 180 เมตรต่อวินาที ดังนั้นดินในบริเวณนี้เป็นดินที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณที่ไม่พบรอยแตกตามยาว



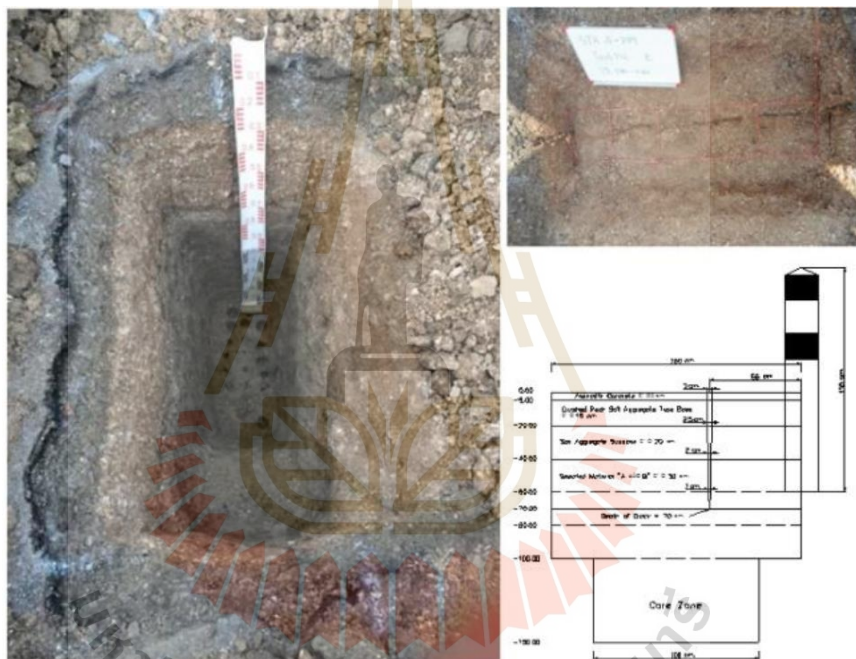
รูปที่ 2.21 ผลสำรวจ Resistivity (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2557)



รูปที่ 2.22 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนด้วยวิธี MASW (กรมชลประทาน, 2556)

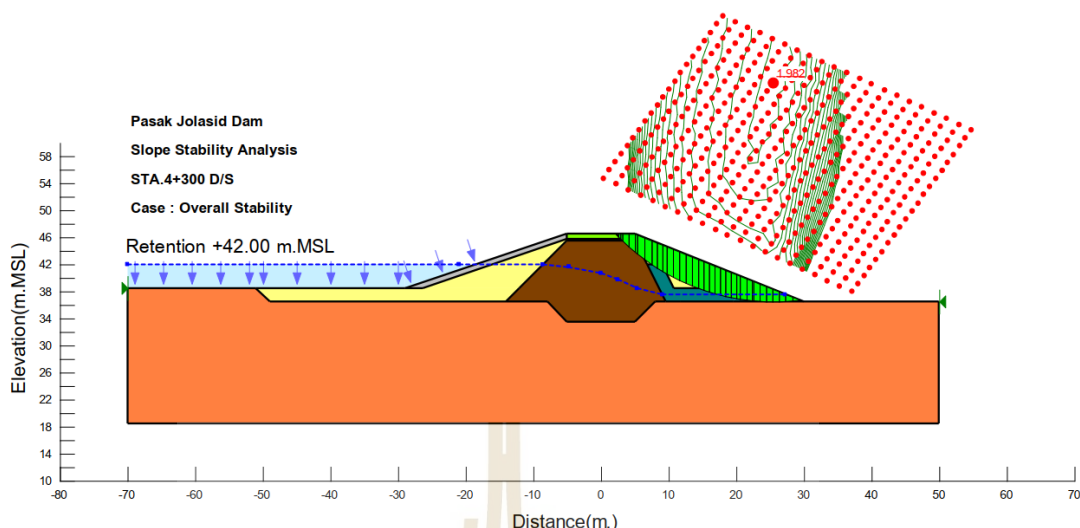
จากข้อมูลผลสำรวจที่กล่าวมา ได้ประเมินสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกบนสันเขื่อนเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เกิดจากกลไกทางด้านวิศวกรรม เช่น การทรุดตัว การเคลื่อนตัว หรือการสูญเสียเสถียรภาพของลาดชัน เป็นต้น และเกิดจากคุณสมบัติดินถมหรือชั้นทาง จึงได้ดำเนินการตรวจสอบสาเหตุการเกิดรอยแตกตามยาว โดยการขุดเปิดบ่อสำรวจ (Test Pit) ดังรูปที่ 2.23 จำนวน

3 บ่อ ที่ความลึก 1.50 เมตร แล้วทำการตรวจวัดขนาดและทิศทางของรอยแตก โดยชุดบริเวณที่มีรอยแตกตามยาวจำนวน 2 บ่อ คือ TP-1 (ด้านเหนือน้ำของ Sta.4+300) และ TP-2 (ด้านท้ายน้ำของ Sta.4+789) และอีกหนึ่งบ่อเป็นตำแหน่งที่ไม่มีรอยแตกตามยาว TP-3 (ด้านท้ายน้ำของ Sta.2+942) พบว่ารอยแตกที่สำรวจพบเป็นรอยแตกแนวตั้ง ไม่มีการเอียงตัวเข้าไปหาแนวแกนกลางเขื่อนหรือเปลือกเขื่อน ขนาดความกว้างรอยแตกไม่เกิน 10 เซนติเมตรและความลึกของรอยแตกไม่เกิน 80 เซนติเมตร รอยแตกเกิดในชั้นทางเป็นหลัก และดินถมเขื่อนใต้ชั้นทางในบริเวณที่มีรอยแตกตามยาวเป็นดินเหนียวสีเทาดำ สภาพดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก ส่วนดินถมเขื่อนใต้ชั้นทางบริเวณที่ไม่มีรอยแตกตามยาว เป็นดินเหนียวสีน้ำตาล มีเม็ดกรวดและทรายผสม ดินมีสภาพค่อนข้างแข็ง



รูปที่ 2.23 การขุดเปิดบ่อทดสอบ (สุทธิศักดิ์, 2558)

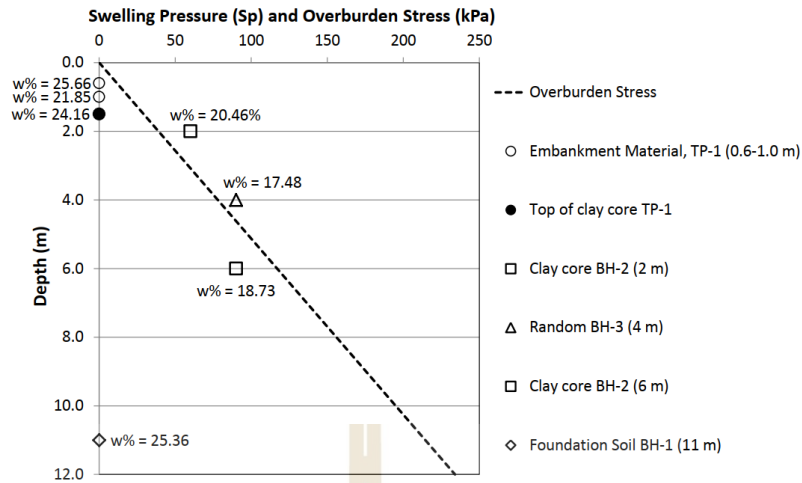
และทำการตรวจสอบการเสถียรภาพของลาดชัน โดยใช้โปรแกรม Slope/W 2007 ส่วนคุณสมบัติดินถมเขื่อนได้จากการทดสอบ Triaxial ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยเพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดชันเขื่อน (Overall Stability) และเสถียรภาพส่วนบนของตัวเขื่อน (Local stability) ดังรูปที่ 2.24 พบว่าผลวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำที่ Sta.4+300 มีค่า 1.981 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์อัตราส่วนความปลอดภัย



รูปที่ 2.24 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชั้นเขื่อน (สุทธิศักดิ์, 2558)

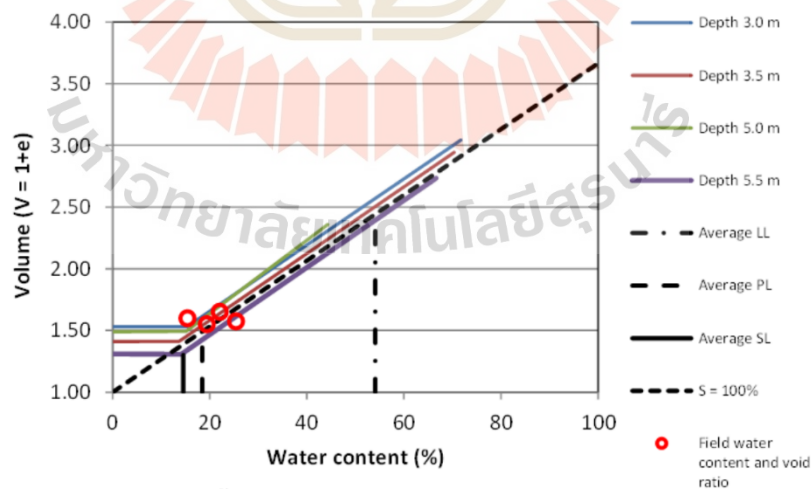
นอกจากนี้ยังสำรวจด้วยกล้อง GPS พบว่าลาดชั้นเขื่อนไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่ออกแบบไว้ ผลวิเคราะห์เสถียรภาพข้างต้น สรุปลงได้ว่ารอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียเสถียรภาพของลาดชั้นเขื่อน และมีการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) โดยใช้วิธีของ Meyerhof (1957) ส่วนคุณสมบัติดินถมเขื่อนได้จากการทดสอบ Direct Shear พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยทั้งทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้น กำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity) ของดินส่วนบนสันเขื่อน จึงไม่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรอยแตกตามยาว

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานดินของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ การทดสอบ Swelling Soil และการทดสอบ Collapsible Soil พบว่าดินถมตัวเขื่อนเป็นดินบวมตัว แต่การบวมตัวจะเกิดที่ระดับลึกไม่ได้ส่งผลให้เกิดรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน จากรูปที่ 2.25 แสดงผลการเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักกดทับ (Overburden Pressure) กับค่าแรงดันการบวมตัว (Swelling Pressure) พบว่าชั้นทางตั้งแต่ความลึก 1.0-4.0 เมตร จากสันเขื่อน มีค่าแรงดันจากดินบวมตัวสูงกว่าน้ำหนักกดทับ ด้วยพฤติกรรมดังกล่าว ชั้นทางด้านบนเสมือนมีแรงดันดินสูงกว่าการใช้งานในสภาพปกติ เป็นเหตุให้เกิดรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน สำหรับที่ระดับความลึก 6.0 เมตร ถึงแม้จะมีค่าแรงดันการบวมตัวสูง แต่เนื่องจากมีน้ำหนักกดทับมากกว่า จึงไม่มีผลต่อชั้นทาง

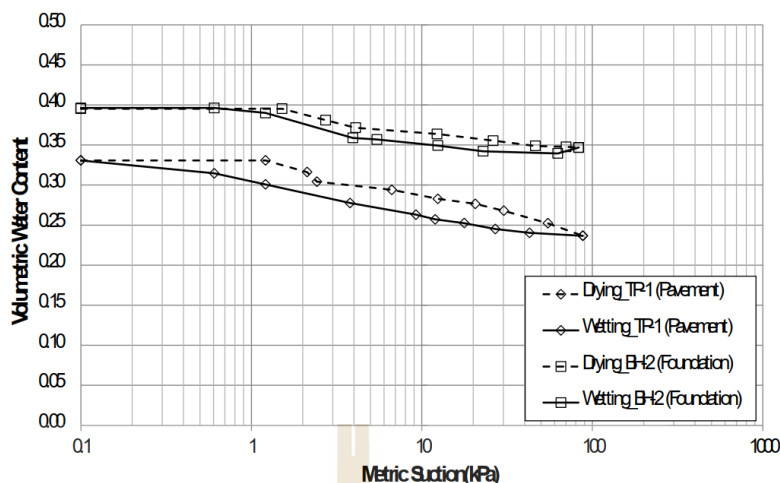


รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบค่า Swelling Pressure กับน้ำหนักดินกดทับ (สุทธิศักดิ์, 2558)

ผลการทดสอบ Shrinkage Volume Change ดังรูปที่ 2.26 พบว่าดินถมใต้เขื่อนช่วงที่มีการบวมตัว ดินสามารถหดตัวและขยายตัว 31-52 % และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน 10.92-71.75 % และทำการทดสอบ Soil Water Characteristic Curve, SWCC ของดินถมเขื่อนชั้นทาง และฐานราก โดยวิธี Point -Wise Measurement (อภินิติ และวิษณุพงศ์, 2550) ดังรูปที่ 2.27 พบว่าเมื่อดินถมเขื่อนกับฐานรากอ้อมตัวด้วยน้ำจะมีความพรุนมากกว่าชั้นทาง ทั้งยังมีพฤติกรรมการเกิดฮิสเทอริซิส (Hysteresis) คือการเพิ่ม ลดปริมาณน้ำในมวลดิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น



รูปที่ 2.26 ปริมาณน้ำในมวลดินและคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดิน (สุทธิศักดิ์, 2558)



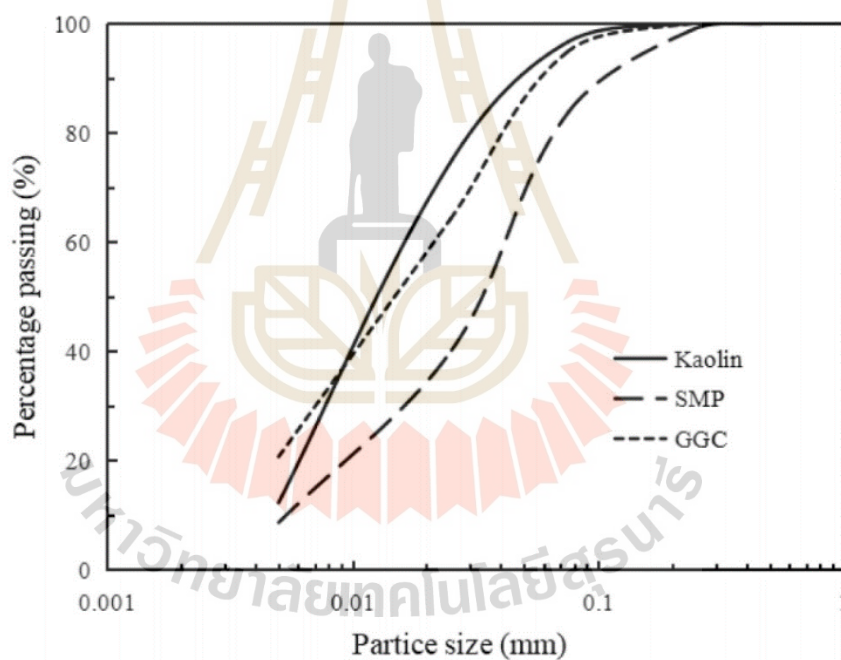
รูปที่ 2.27 Soil Water Characteristic Curve, SWCC ของดินถมเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (สุทธิศักดิ์, 2558)

การวิเคราะห์แบบจำลองการหลุดตัวจากคุณสมบัติของดินถมเขื่อนโดยใช้โปรแกรม SIGMA/W 2007 และวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) ร่วมกับแบบจำลองดิน (Elastic Plastic Model) พบว่าค่าการหลุดตัวมีค่าน้อยกว่าระยะการออกแบบเพื่อการหลุดตัว สุทธิศักดิ์ และคณะ (2558) ได้เสนอแนวทางการซ่อมรอยแตกตามยาว เช่น การขุดลอกดินบวมตัวออก แล้วบดอัดใหม่ การปรับปรุงคุณภาพดิน การเสริมแรงให้ชั้นทางโดยใช้ Geo-grid หรือการป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้น เช่น การปูแผ่นที่บ้น้ำ เป็นต้น และควรหลีกเลี่ยงการใช้ดินที่มีความสามารถในการบวมตัวในการก่อสร้างถนนในอนาคต

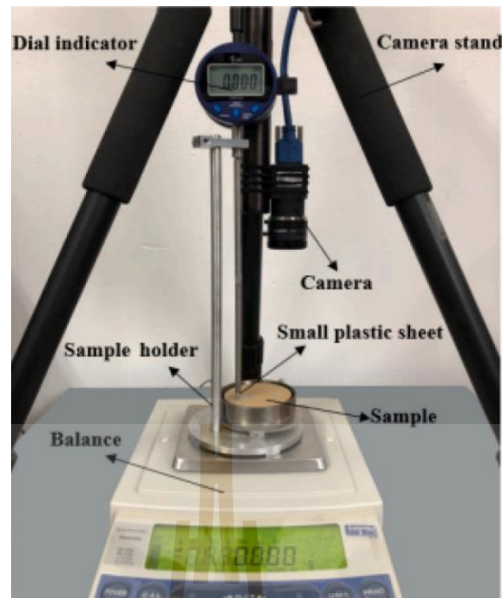
Tiande et al. (2021) ได้ทำการศึกษาการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน ในระหว่างการหดตัว และทำการวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (Soil water characteristic curve SWCC) ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดิน 3 ชนิด คือ Silicon Micropowder (SMP), Guangxi Guiping (GGC) และ kaolin ที่ถูกทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุและแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินแสดงในรูปที่ 2.28 ด้วยชุดเครื่องมือเลเซอร์สามเหลี่ยมที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งวัดการเสียรูปแนวแกนด้วยไดอัลเกจ (Dial Indicator) และในแนวรัศมีของตัวอย่างจากกล้องด้วยวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรชัน (The digital image correlation method) เป็นวิธีการหาการกระจายของแต่ละจุดบนพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบจากการถ่ายภาพลายจุดแบบสุ่มบนตัวอย่างที่ยังไม่เปลี่ยนรูป โดยการจับคู่และเปรียบเทียบภาพทั้งก่อนและหลังการเสียรูปของวัสดุ

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง (Tiande et al., 2021)

Soil	SMP	GGC	Kaolin
Specific gravity (Mg/m^3)	2.68	2.74	2.75
Liquid limit (%)	32.5	51.8	63.09
Plastic limit (%)	20.3	22.7	22.52
Plasticity index (%)	12.2	29.1	40.57
Saturated gravimetric water content (%)	25	38	37
Initial void ratio	0.675	1.03	1.04
Initial dry density (kg/m^3)	1600	1350	1350
Percentages of sand (%)	30	12	9
Percentages of silt (%)	61.9	65.4	73.8
Percentages of clay (%)	9.1	21.6	17.2

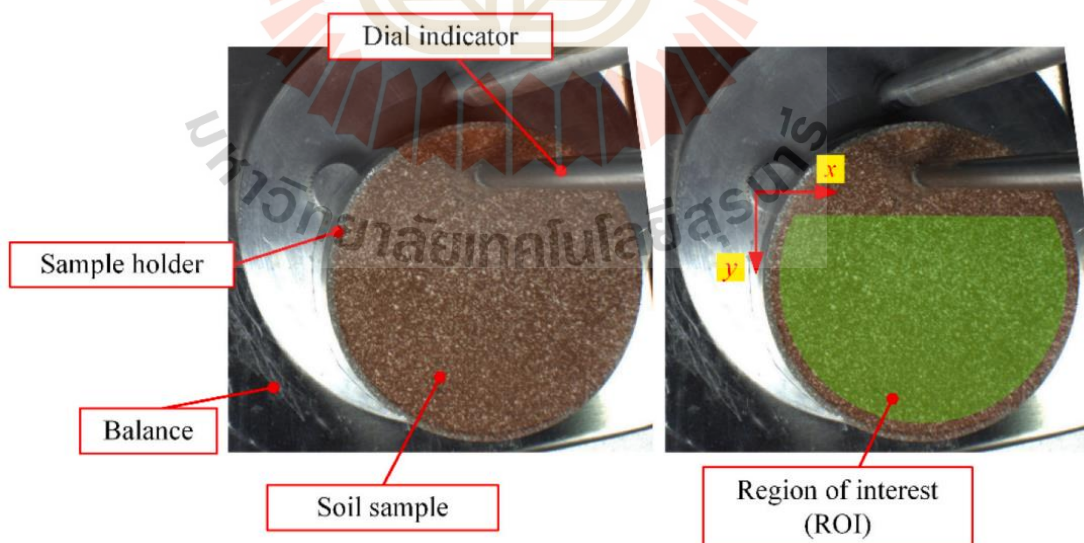


รูปที่ 2.28 การกระจายขนาดอนุภาคของดินทดสอบ (Tiande et al., 2021)



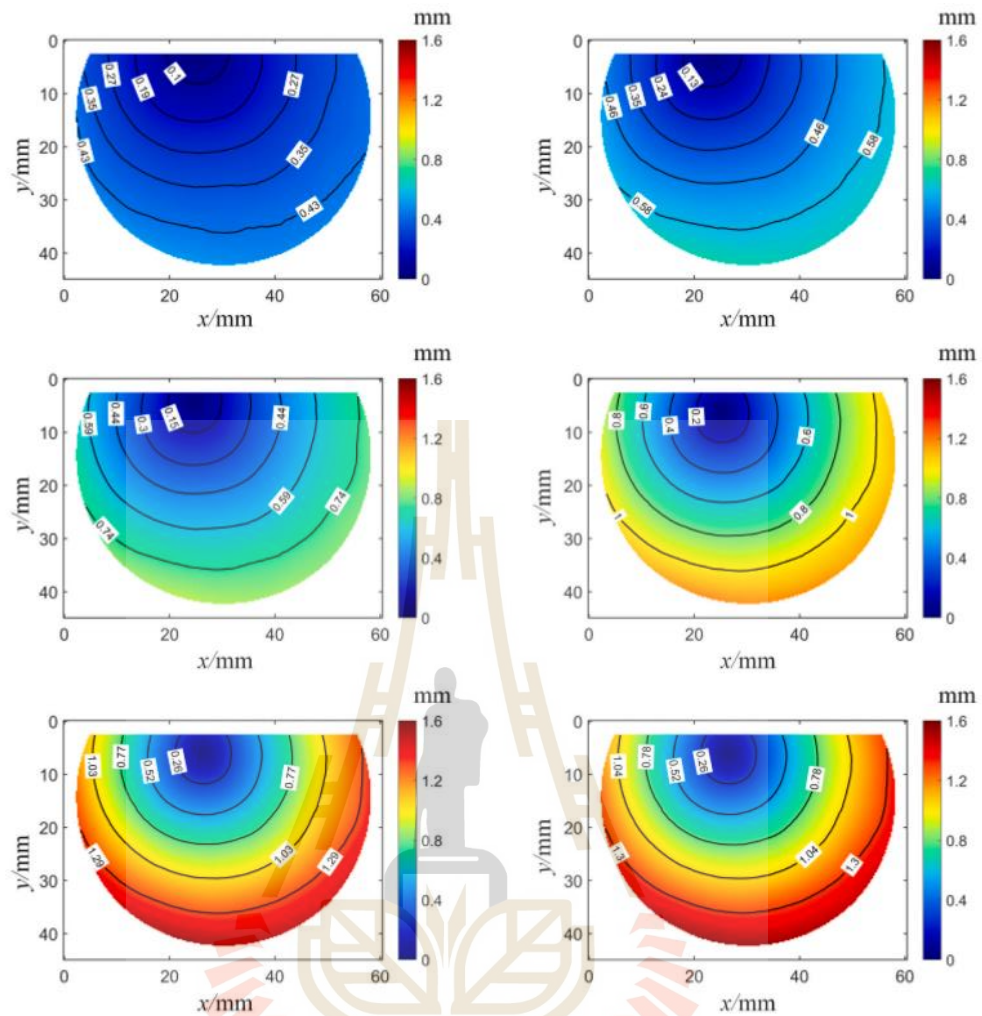
รูปที่ 2.29 ระบบทดสอบสำหรับทดสอบการหดตัว (Tiande et al., 2021)

ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (a) ที่แสดงภาพของวัสดุที่ยังไม่เกิดการเสียรูปเป็นภาพอ้างอิง จากนั้นทำการตีกรอบบริเวณที่สนใจดังรูปที่ 2.30 (b) โดยการจับคู่ภาพตัวอย่างจากการเสียรูปในแนวรัศมี ในกระบวนการหดตัวในเวลาที่แตกต่างกันเทียบกับภาพอ้างอิง ใช้เวลาการทดสอบ 60 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.31



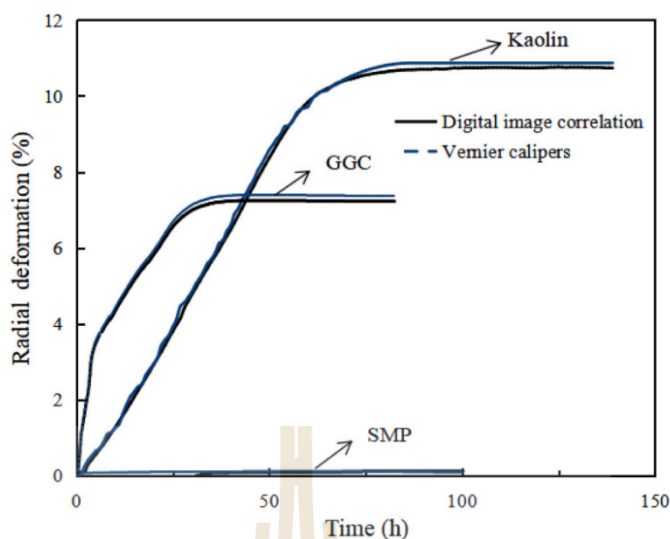
รูปที่ 2.30 ภาพอ้างอิงในวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน (The digital image correlation method)

(Tiande et al., 2021)



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการกระจายความสูงในแนวรัศมีและเส้นชั้นความสูงของ GGC (Tiande et al., 2021)

นอกจากนี้สามารถใช้เวอร์เนียร์เนียบคาลิเปอร์วัดการเสียรูปในแนวรัศมีของตัวอย่างดินได้โดยตรง ซึ่งเส้นโค้งการเปลี่ยนรูปในแนวรัศมีที่วัดโดยสองวิธีจะแสดงในรูปที่ 2.32 พบว่าทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันจนเกือบทับเป็นเส้นเดียวกัน ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการเสียรูปในแนวรัศมีที่วัดโดยวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรเลชัน (The digital image correlation method) มีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปในแนวรัศมีกับเวลาสำหรับวัสดุจีโอโพลิเมอร์และเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Tiande et al., 2021)

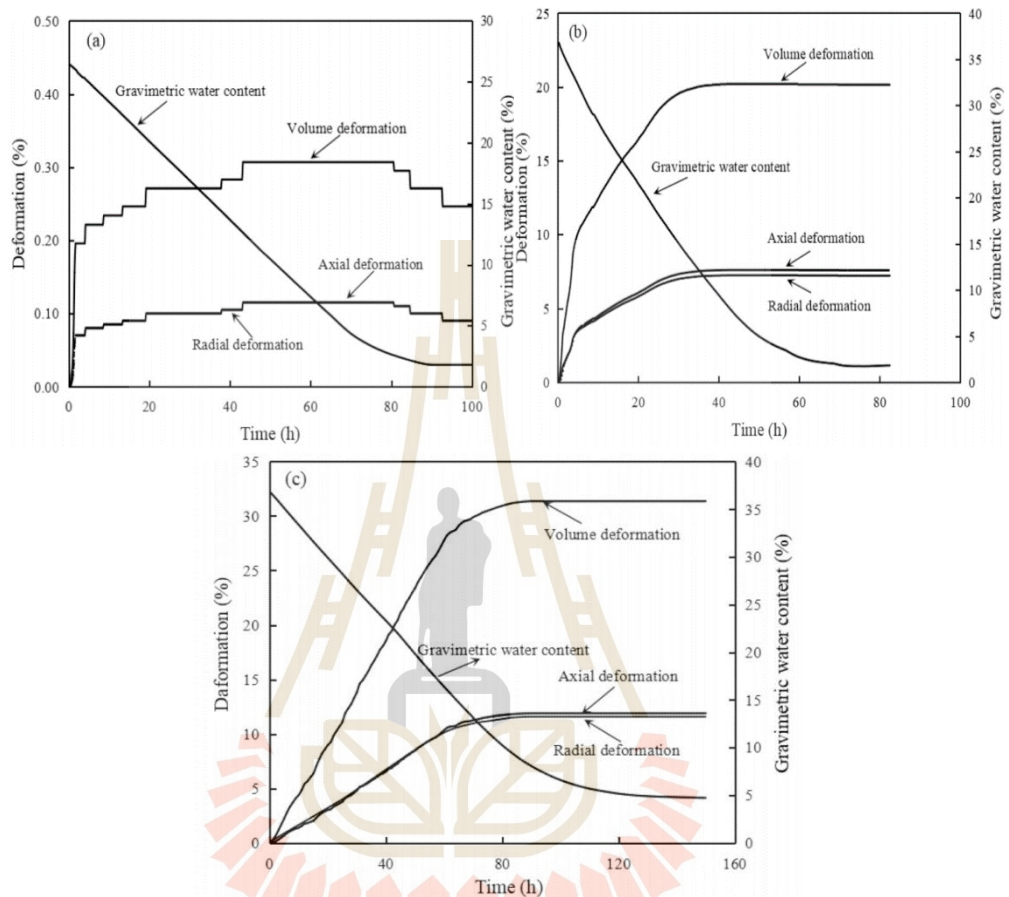
ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งการหดตัวดังแสดงใน รูปที่ 2.33 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความชื้นในดินอ้างอิง (Gravimetric Water Content) ของดินทดสอบทั้ง 3 ชนิด พบว่าการเปลี่ยนรูปในแนวรัศมีและการเปลี่ยนรูปในแนวแกนมีค่าใกล้เคียงกันมาก สำหรับตัวอย่างดิน SMP มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงสุด 0.31 % ซึ่งบ่งชี้ว่า SMP แทบจะไม่เกิดการหดตัวของปริมาตรกับการระเหยของน้ำในรูปรูพรุนเลย ส่วนการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนสูงสุดของตัวอย่างดิน GGC และ Kaolin คือ 7.2 % และ 11.9 % ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงสุดคือ 20.1 % และ 31.4% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าดินสองชนิดนี้มีการหดตัวตามการระเหยของน้ำในรูปรูพรุนและมีโครงสร้างในรูพรุนเปลี่ยนแปลงไป จากกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.34 พบว่าในกระบวนการหดตัวของตัวอย่างดิน GGC และ Kaolin จะมีการเปลี่ยนแปลง 3 ชั้น ดังนี้

ชั้นแรกสังเกตจากกราฟระดับความอึดตัวมีอัตราคงที่ ในชั้นตอนนี้ตัวอย่างได้สิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรแล้ว จากนั้นอากาศจะเริ่มเข้าสู่ดินทำให้ดินเปลี่ยนสถานะจากอึดตัวเป็นไม่อึดตัว การหดตัวของปริมาตรและการเสียรูปจะค่อยๆ ช้าลง

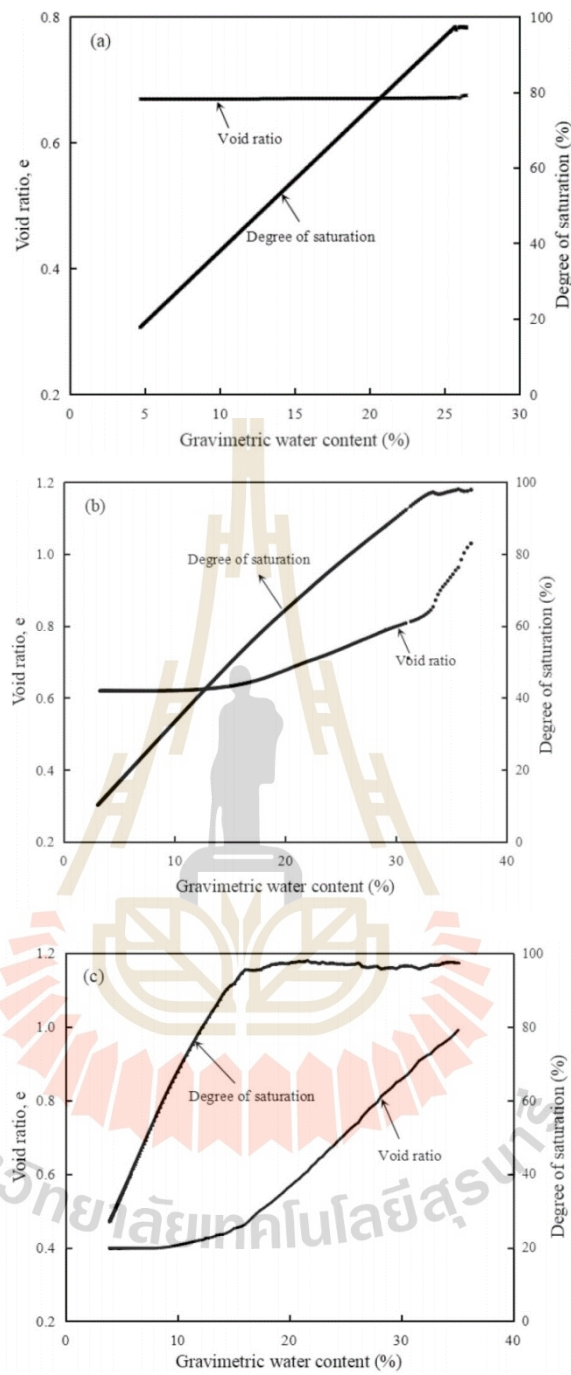
ชั้นที่สองเมื่อเกิดช่องว่างจากการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในดินเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรลดลงน้อยกว่าการระเหยความชื้น

ชั้นสุดท้ายปริมาตรของตัวอย่างดินแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ปริมาณน้ำในตัวอย่างลดลงอย่างช้าๆ และมีแนวโน้มเป็นค่าคงที่ จากกระบวนการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในระหว่างการหดตัว การระเหยของน้ำมักจะล่าช้ากว่าค่าความหดตัวของปริมาตร สำหรับค่าความพรุนของ

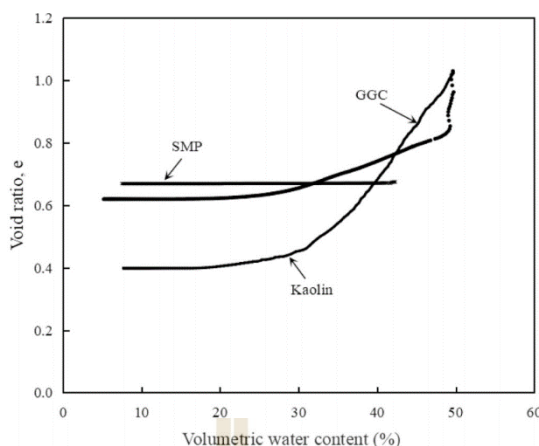
ตัวอย่างดิน SMP แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นแห้งเริ่มต้นสูง และการหดตัวของตัวอย่างดิน GGC และ Kaolin แสดงการหดตัวสามชั้นตอนที่แตกต่างกันในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.33 การเปลี่ยนแปลงการเสียรูปและปริมาณความชื้นต่อช่วงเวลา ในระหว่างการหดตัวของดิน ตัวอย่าง (a) SMP, (b) GGC และ (c) Kaolin (Tiande et al., 2021)

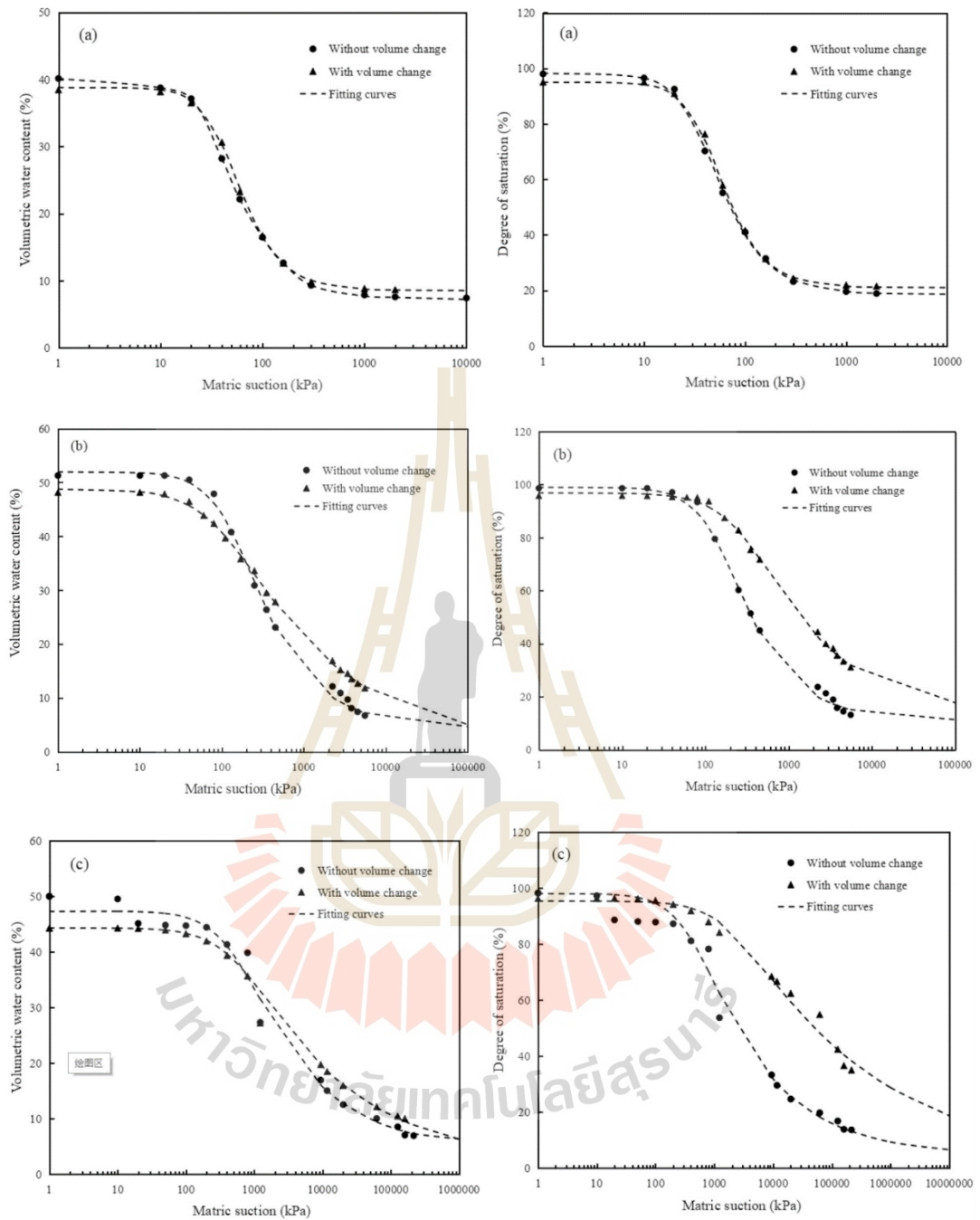


รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมวลของการหดตัวของดินตัวอย่าง (a) SMP, (b) GGC และ (c) Kaolin (Tiande et al., 2021)



รูปที่ 2.35 กราฟการหดตัวของดินตัวอย่าง SMP, GGC และ Kaolin (Tiande et al., 2021)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (Soil water characteristic curve, SWCC) ที่ได้จากแบบจำลอง Van Genuchten แสดงในรูปที่ 2.36 และตารางที่ 2.6 โดยไม่ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรระหว่างกระบวนการทำให้ดินแห้ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการหดตัวมีอิทธิพลอย่างมากต่อ SWCC การเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการหดตัวของตัวอย่างดิน SMP นั้นมีน้อยมาก และรูพรุนในกระบวนการหดตัวของดินค่อนข้างคงที่ ดังนั้น SWCC จึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่างดิน GGC และ Kaolin จะเห็นความแตกต่างของค่าปริมาณอากาศเข้าอย่างชัดเจน ปริมาณอากาศที่เข้าสู่ดินถูกกำหนดโดยรูพรุนที่กว้างที่สุด ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการคายน้ำ และอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) มีอิทธิพลอย่างมากต่อ SWCC สรุปได้ว่าผลกระทบต่อการหดตัวของดินต่อ SWCC กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมีความคล้ายคลึงกับผลของค่าความหนาแน่นแห้งบน SWCC ที่คำนึงถึงปริมาณความชื้นและช่องว่างของดิน



รูปที่ 2.36 เปรียบเทียบ SWCC ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและเปลี่ยนแปลงปริมาตรดินตัวอย่าง (a) SMP, (b) GGC และ (c) Kaolin. (Tiande et al., 2021)

ตารางที่ 2.6 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่มีวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยใช้แบบจำลอง Van Genuchten model (1980).

Parameters	SMP		GGC		Kaolin	
	without	with	without	with	without	with
α (1/kPa)	0.027	0.022	0.0067	0.0033	0.009	0.006
n	2.28	2.63	1.83	1.52	1.38	1.19
θ_s (%)	40.12	38.46	51.88	47.34	47.63	44.35
θ_r (%)	7.38	8.575	5.66	2.64	2.25	0



บทที่ 3

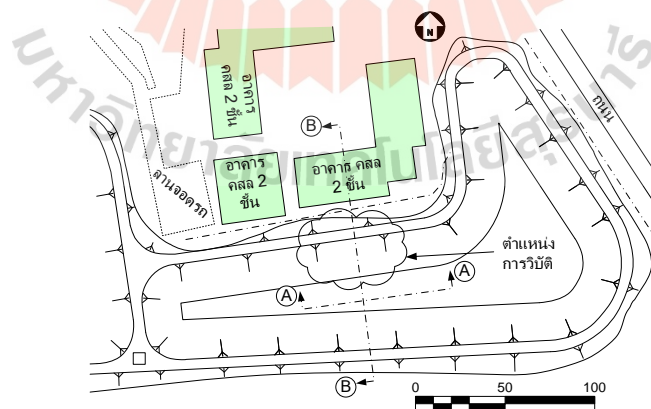
วิธีวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การสูญเสียกำลังรับแรงเสียดทานเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวรวมตัวที่พบใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา อันเกิดจากปริมาณน้ำในดินลดลง ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็มลดลง ดังนั้น จึงได้ออกแบบการทดสอบโดยใช้ดินบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน ที่จำลองสถานะที่ดินทั่วไปที่มีดินเหนียวรวมตัวเป็นส่วนผสม จึงทำการศึกษาถึงแรงเสียดทานผิวประลัยของเสาเข็มที่สถานะการหดตัวเนื่องจากการระเหยของน้ำที่แตกต่าง ดังนี้

3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ

3.1.1 แสดงตำแหน่งของแหล่งเก็บตัวอย่างดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวรวมตัวในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เพื่อใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งดินเหนียวรวมตัวที่ใช้ศึกษาโดย พรพจน์ และคณะ (2549) และรูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของแหล่งเก็บดินเหนียวกระจายตัวและดินเหนียวรวมตัวที่บริเวณคันอ่างเก็บน้ำใกล้หอพักสุรนารีเวศ 10



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งดินเหนียวรวมตัวที่ใช้ศึกษา (พรพจน์ ต้นเส็ง, ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร และคณะ, 2549)



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของแหล่งเก็บดินเหนียวกระจายตัว

3.1.2 ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้ดิน 2 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียวกระจายตัว (Red Clay) และ ดินเหนียวบวมตัว (White Clay) ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ประเภท โดยผสมดินเหนียวบวมตัวและดินเหนียวกระจายตัว ด้วยอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของดินที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดังรูปที่ 3.3 ถึง 3.5 แสดงลักษณะของเนื้อดินที่เตรียมตัวอย่างดินผสมใช้ในการทดสอบ และตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของดินเหนียวบวมตัวที่ปริมาณต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัย ดังนี้

1) ดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวร้อยละ 100 และ 0 ตามลำดับโดยใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่างดิน WH - 00



รูปที่ 3.3 ลักษณะดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัว WH - 00

2) ดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวอัตราร้อยละ 50 และ 50 ตามลำดับ โดยใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่างดิน WH – 50



รูปที่ 3.4 ลักษณะดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวที่ WH – 50

3) ดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวร้อยละ 00 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่างดิน WH - 100



รูปที่ 3.5 ลักษณะดินเหนียวกระจายตัวผสมดินเหนียวบวมตัวที่ WH – 100

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของดินเหนียวบวมตัวที่ปริมาณต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนที่ใช้ ทดสอบ	Percent by Weight	
	Red Clay	White Clay
WH-00	100	0
WH-50	50	50
WH-100	0	100

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและเชิงกลของดิน

3.2.1 การทดสอบพิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)

ทำการทดสอบเพื่อหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ด้วย Atterberg Limit ตามมาตรฐาน ASTM D 4318 –95, 2008 ของดินเหนียวกระจายตัว (Red Clay) และดินเหนียวบวมตัว (White Clay) ทั้ง 3 สัดส่วน โดยแสดงค่าพิกัดเหลวดังตารางที่ 3.2 และนำผลการทดสอบพิกัดเหลวใช้ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการหดตัว เมื่อมีปริมาณดินเหนียวบวมตัวในตัวอย่างดินที่แตกต่างกันในการทดสอบคุณสมบัติของดินเหนียวบวมตัว

ตารางที่ 3.2 พิกัดเหลวของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ

สัดส่วนที่ใช้ทดสอบ	Liquid Limit
WH-00	51.0
WH-50	91.6
WH-100	172.0

3.2.2 การทดสอบการบวมตัว (Swelling Soil Test)

การทดสอบการบวมตัว (Swelling Soil Test) โดยวิธี Consolidation Method C เรียกว่า Loading-After-Wetting ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ประเภท จากมาตรฐาน ASTM D 4546 (2003) ด้วยเครื่องทดสอบ Consolidometer ที่ใช้ Consolidation Cell สำหรับบรรจุตัวอย่างดิน วิธีนี้จะใช้สำหรับการวัดความเครียด (Strain) ของดินทดสอบ จากการให้โหลด (Load) หลังทำให้ตัวอย่างเปียกจนเกิดการบวมตัวหรือการเสียรูปยุบตัว ซึ่งการเพิ่มโหลดกับตัวอย่างทดสอบและวัดการเสียรูปจะใช้วิธีเหมือน ASTM D 2435 เปรียบเทียบการเสียรูปกับความเค้น (Verticle Stress) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) วัดความสูง, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และชั่งน้ำหนักวงแหวน (Cutting Ring)
- 2) ทำการกดวงแหวนลงบนตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ในแนวตั้ง จนให้ตัวอย่างดินพันขอบของวงแหวนเล็กน้อย และใช้เลื่อยเส้นลวดตักแต่งผิวดินให้เรียบเสมอบางวงแหวน
- 3) ชั่งน้ำหนักวงแหวนรวมกับน้ำหนักดินในวงแหวน และนำดินที่เหลือบางส่วนไปชั่งน้ำหนักหาปริมาณความชื้น

4) นำวงแหวนติดตั้งลงบน Consolidation Cell จากนั้นวางแผ่นหินพรุน (Porous Stone) ด้านบน แล้วนำไปติดตั้งบนเครื่องทดสอบ Consolidometer

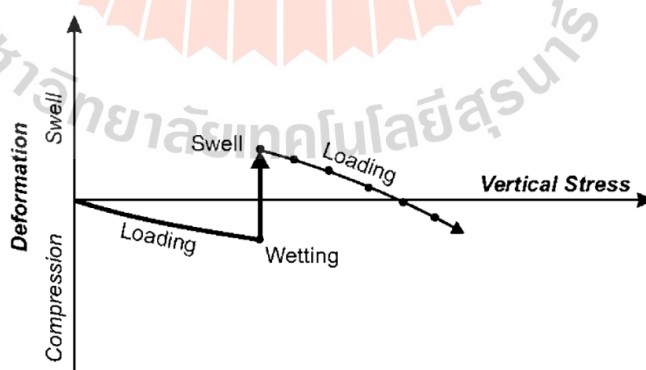
5) หลังจากได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วปรับแนวคานให้สมดุลวางน้ำหนักในชั้นแรกที่หน่วยแรงกดประมาณ 10 kPa ลงบนที่แขวนน้ำหนัก และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสีรูปร่าง (Dial Gauge) พร้อมปรับเข็มหน้าปัดให้อยู่ที่ศูนย์

6) เพิ่มหน่วยแรงกด (Stress) ต่อไปทุก 5 - 10 นาที โดยหน่วยแรงกดครั้งต่อไปจะมากกว่าหน่วยแรงกดก่อนหน้า 2 เท่า เช่น 20 kPa, 50 kPa และ 100 kPa ควรทำการเพิ่มน้ำหนักประมาณ 6-8 ครั้ง และบันทึกระยะเวลาการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเวลาการให้โหลดในชั้นนี้ไม่ควรเกิน 1 ชั่วโมง เพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบแห้ง

7) เติมน้ำกลั่นให้อยู่เหนือระดับตัวอย่างดิน ซึ่งในชั้นนี้ดินตัวอย่างจะเกิดการบวมตัว ให้บันทึกค่าการบวมตัวจาก Dial Gauge ตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ เช่น บันทึกค่าบวมตัวทุก 6 นาที, 12 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง จนถึง 72 ชั่วโมง

8) ทำการเพิ่มโหลดอีก 4 ครั้ง ต่อตัวอย่างทดสอบและวัดการทรุดตัวตามเวลาจาก Dial Gauge เหมือนข้อ 7.)

9) สร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัว (Swelling) ต่อเวลา (Time) ของดินตัวอย่างทั้ง 3 อัตราส่วน



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบการเสีรูปร่างกับความเค้นหลังทำให้ตัวอย่างเปียก (ASTM D 4546, 2003)

3.2.3 การทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage)

ในการทดสอบนี้เพื่อหาค่าการหดตัวเชิงเส้นตามมาตรฐาน BS 1377 : Part 2 :1990 ของดินผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมโครเมตร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่างดิน เมื่อดินแห้งจากการผสมปริมาณน้ำลงในดินด้วยค่าพิกัดจำกัดเหลวของดิน (Liquid Limit) และปล่อยให้ดินแห้งด้วยอากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดินกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น (Percentage of Linear Shrinkage) มีวิธีการทดสอบดังนี้

1) ทำความสะอาดแบบทดสอบกระบอกผ่าซีก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร แล้วทาจาระบี (Grease) ในแบบก่อนทำการทดสอบ เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะแบบ พร้อมชั่งน้ำหนักแบบทดสอบและจดบันทึก

2) นำตัวอย่างดินแต่ละสัดส่วนผสมกับน้ำจากค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ของแต่ละตัวอย่างดินดังแสดงในตารางที่ 3.2 คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วปาดดินลงในแบบทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (a)

3) วัดความยาวของดินในแบบแต่ละตัวอย่าง บันทึกเป็นค่าความยาวเริ่มต้น (The Original Length, L_0) และชั่งน้ำหนักดินพร้อมแบบทดสอบ

4) ปล่อยให้ดินในแบบแห้งที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดความยาวของดินที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่างๆ (The Length of the Dry Specimen, L_D) และชั่งน้ำหนักดินพร้อมแบบทุกครั้ง ที่วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของดินตัวอย่าง

5) สังเกตเมื่อดินเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวแล้ว ให้วัดค่าความยาวของดินในแบบทดสอบและนำตัวอย่างดินไปหาปริมาณความชื้น ดังรูปที่ 3.7 (b)

6) การคำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น (Percentage of Linear Shrinkage) ดังสมการ

$$\text{Percentage of Linear Shrinkage} = \left(1 - \frac{L_D}{L_0}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

โดย L_0 คือ ค่าความยาวเริ่มต้น (The Original Length) และ L_D ความยาวของดินที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่างๆ (The Length of the Dry Specimen) ซึ่งชุดการทดสอบและลักษณะการหดตัวแสดงดังรูปที่ 3.7 ตรงตามมาตรฐานการทดสอบ



รูปที่ 3.7 การทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (a) ก่อนการหดตัว (b) หลังสิ้นสุดการหดตัว

3.2.4 การทดสอบการบดอัด

จากผลการทดสอบการบดอัดโดย พรพจน์ และคณะ (2550) ดินที่มีดินเหนียว บวมตัวผสมอยู่นั้น จะมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ลดลงตามปริมาณที่ มากขึ้นของดินเหนียวบวมตัว ในงานวิจัยนี้ทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน ASTM D 698 ด้วย แบบหล่อทดสอบการบดอัดดิน (Mold) ขนาด 4 นิ้ว น้ำหนักค้อน 5.5 ปอนด์ ที่มีระยะยก 12 นิ้ว จำนวน 3 ชั้น และการกระทุ้งจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น

การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ โดยการนำตัวอย่างดินร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาผึ่งให้แห้งโดยอากาศ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดิน 3 สัดส่วน คือ WH-00, WH-50 และ WH-100 ดังแสดงในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน 3.1.2 นำดินตัวอย่างที่ต้องการมาทำการบดอัด เพื่อให้ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) และปริมาณความชื้น (Water Content) ใกล้เคียงกับรายงานวิจัยดังรูปที่ 2.9 และนำชุดการทดสอบการบดอัดไปทดสอบการสูญเสียแรง เสียดทานของผิวเสาเข็มต่อไป ดังรูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างดินบดอัด WH-50 ก่อนการกดเสาเข็มเหล็ก



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างดินบดอัด WH-50 ก่อนการติดตั้งเสาเข็มเหล็ก

3.2.5 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบไม่ได้เป็นตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างทดสอบจะเตรียมใหม่จากการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ที่ความหนาแน่นและความชื้นที่ต้องการใช้ทดสอบของดิน ทั้ง 3 สัดส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้เตรียมตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจากรายงานการวิจัย การทดสอบการบดอัดโดย พรพจน์ และคณะ (2550) โดยใช้แบบทดสอบ (Mold) เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 2 นิ้ว เมื่อดันตัวอย่างออกจากแบบสำหรับบดอัดแล้ว ทำการตัดแต่งตัวอย่างให้มีความสูง 4 นิ้ว และผิวของตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่างให้เรียบได้ระดับก่อนนำไปทดสอบ ดังรูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด เพื่อใช้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่า กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวกระจายตัวที่มีดินเหนียววมตัวผสม

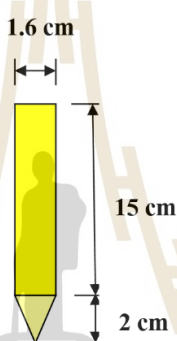


รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

3.3 การติดตั้งเสาเข็ม

จากการทดสอบการบดอัดที่จำลองสถานะที่ดินทั่วไปมีส่วนผสมของดินเหนียววมตัว ในปริมาณต่างๆ ได้ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) และปริมาณความชื้น (Water Content) แล้วของดินตัวอย่างแต่ละสัดส่วน มาทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียววมตัว ต่อหน่วยแรงเสียดทาน ดังนี้

1) เตรียมแท่งเหล็กกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ปลายกลึงแหลม 1 ด้าน ดังรูปที่ 3.10 เพื่อใช้ทดสอบหาหน่วยแรงเสียดทานผิวกับดินทั้ง 3 สัดส่วน โดยใช้แท่งเหล็กจำลองแทนเสาเข็ม ใช้แท่งเหล็กจำนวน 5 แท่งต่อสัดส่วน รวมใช้แท่งเหล็กปลายแหลมทั้งสิ้น 15 แท่ง

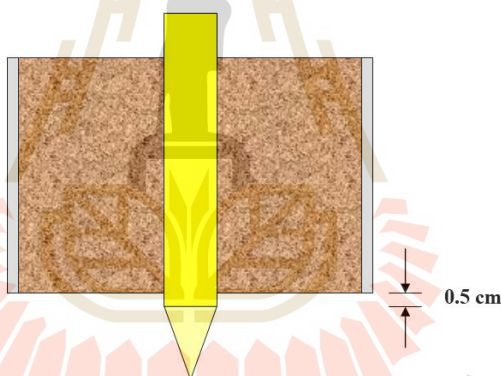


รูปที่ 3.10 ลักษณะแท่งเหล็กกลมที่ใช้จำลองแทนเสาเข็ม

- 2) ทำการบดอัดตัวอย่างดินที่สัดส่วน WH-00 ใส่ในแบบหล่อ (Mold) ด้วยปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในข้อ 3.2.4
- 3) ทำการบดอัดตัวอย่างดินซ้ำในข้อ 2.) โดยเปลี่ยนจากสัดส่วน WH-00 เป็น WH-50 และ WH-100 ชนิดละ 5 โมล ดังนั้น ตัวอย่างดินบดอัดที่ใช้ทดสอบทั้งหมดจำนวน 15 โมล
- 4) นำแผ่นเหล็กที่มีรูปกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ไว้ด้านบนและด้านล่างของแบบหล่อ (Mold) โดยให้รูของแผ่นเหล็กอยู่กึ่งกลางแบบหล่อดิน (Mold) เพื่อเป็นแนว ในการกดแท่งเหล็กกลม และป้องกันการพังของดินบริเวณด้านล่าง
- 5) กดแท่งเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ที่ได้จากข้อ 1) บริเวณกึ่งกลางดินบดอัดในแบบหล่อด้วยเครื่องกดทดสอบคอนกรีต ดังรูปที่ 3.11 และแสดงการจำลองการกดเสาเข็มเหล็กที่ฝังในดินบดอัดในแบบหล่อด้วยแท่งเหล็กกลม ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 กัดเสาเข็มเหล็กกลบนตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องกดคอนกรีต



รูปที่ 3.12 แสดงหน้าตัดแท่งเหล็กกลมที่ใช้จำลองแทนเสาเข็มฝังอยู่ในแบบหล่อ

3.4 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียววมตัวต่อหน่วยแรงเสียดทานผิวเสาเข็ม

1) หลังทำการติดตั้งเสาเข็มในตัวอย่างดินบดอัดแล้ว นำดินบดอัดในแบบหล่อทั้ง 15 โมล ที่ถูกกดด้วยแท่งเหล็ก มาหุ้มรองตัวอย่างด้วยพลาสติกใสทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อป้องกัน การสูญเสียความชื้น โดยเจาะช่องรอบแท่งเหล็กเพื่อจำกัดบริเวณที่เกิดการระเหยของน้ำไว้เฉพาะบริเวณที่ติดกับเสาเข็ม ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการหดตัวที่ทำให้แรงเสียดทานผิวลดลง

2) บันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างหลังจากปล่อยให้ตัวอย่างบดอัดระเหยที่อุณหภูมิห้องให้ปริมาณความชื้นในดินลดลง

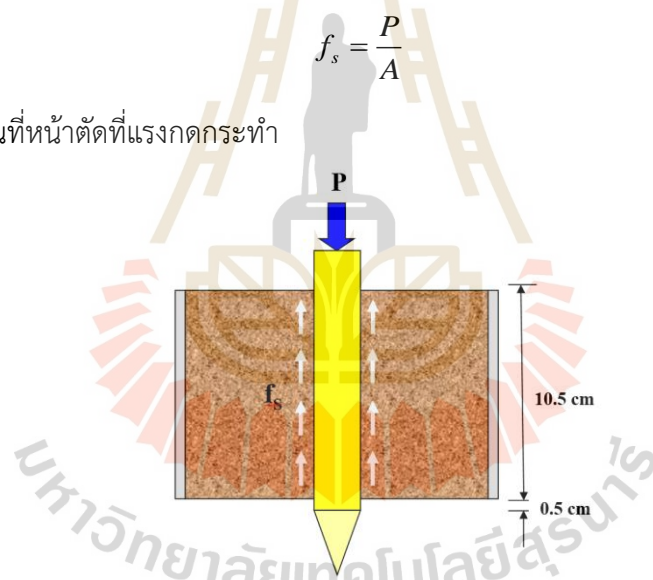
3) นำแบบหล่อที่มีปริมาณความชื้นลดลงทุก ๆ 10 - 15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นที่บดอัดจากการชั่งน้ำหนักแบบหล่อที่มีแท่งเหล็กกลมฝังอยู่ในดินบดอัด ที่ประกอบด้วยแผ่นเหล็กทั้งด้านบนและด้านล่างไปทดสอบหาแรงเสียดทานด้วยเครื่อง Compression Test Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยควบคุมความเร็วในการกดทดสอบที่ 1 mm/min ทำการกดแท่งเหล็กจนมีระยะการเคลื่อนตัวประมาณ 10 มิลลิเมตร หรือจนดินวิบัติจึงหยุดการทดสอบ บันทึกค่าแรงเสียดทานและระยะการเคลื่อนตัวที่ได้จากการทดสอบ

4) นำผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานและระยะการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ที่แสดงลักษณะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณแท่งเหล็กกลมที่ใช้จำลองแทนเสาเข็ม โดยที่ f_s คือ หน่วยแรงเสียดทาน P คือ แรงที่ใช้กด

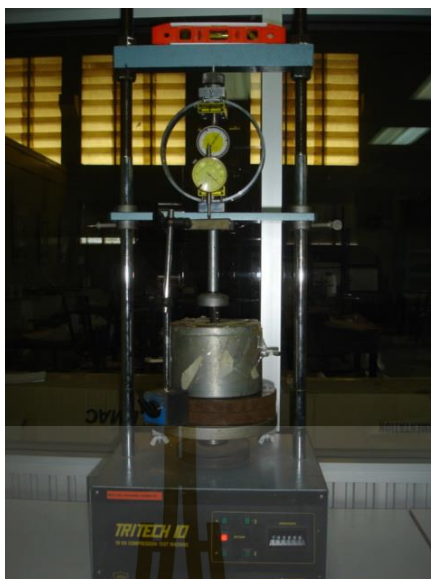
สามารถคำนวณแรงเสียดทานได้จากสมการ

$$f_s = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่แรงกดกระทำ



รูปที่ 3.13 ลักษณะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณแท่งเหล็กกลมที่ใช้จำลองแทนเสาเข็ม



รูปที่ 3.14 แสดงการประกอบติดตั้งเครื่องมือ

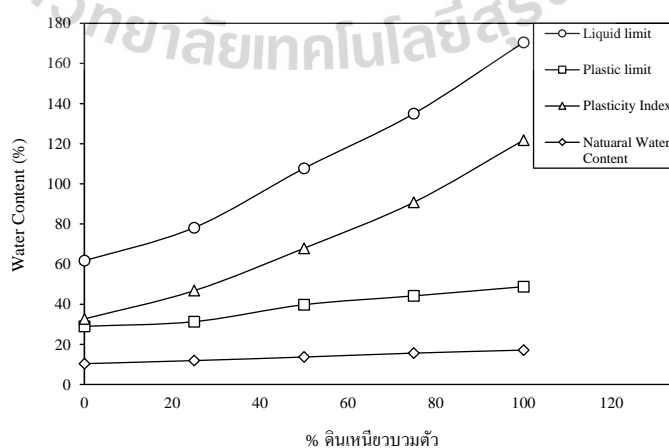


บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

จากผลการทดสอบวิธีของ Atterberg เพื่อหาค่าพิกัตต์เตอร์เปิร์ก (Atterberg Limit) ซึ่งประกอบด้วย ค่าพิกัตต์เหลว (Liquid Limit) และค่าพิกัตต์พลาสติก (Plastic Limit) นำมาใช้วิเคราะห์หาค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินตัวอย่างทั้ง 3 สัดส่วนคละ (WH-00, WH-50 และ WH-100) ดังรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียว บวมตัวกับค่าพิกัตต์เตอร์เปิร์ก (Atterberg Limit) พบว่าเมื่อสัดส่วนของปริมาณดินเหนียวบวมตัว เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index มีค่าสูงขึ้น ค่า PI ที่ตัวอย่างดิน WH-100 และ WH-00 มีค่าเท่ากับร้อยละ 121.7 และ 32.7 ตามลำดับ สำหรับดินที่มีดินเหนียว บวมตัวผสมมีค่า PI มากกว่า 3 เท่าของดินที่ไม่มีดินบวมตัวผสม เมื่อ PI แสดงถึงความเป็นพลาสติก ของดินที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูงและเป็นดินที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูง (การหดตัวและ ขยายตัว) ดังนั้น ดินที่มีปริมาณดินเหนียวบวมตัวผสมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูง เมื่อมี การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และเมื่อเปรียบเทียบความเป็นพลาสติกด้วยดัชนีพลาสติก (Holtz and Gibbs, 1956) พบว่า ดินเหนียวกระจายตัวที่มีดินเหนียวบวมตัวผสมร้อยละ 0 ถึง 25 จัดเป็น High Plasticity และ ผสมมากกว่าร้อยละ 50 จัดเป็น Extremely High Plasticity

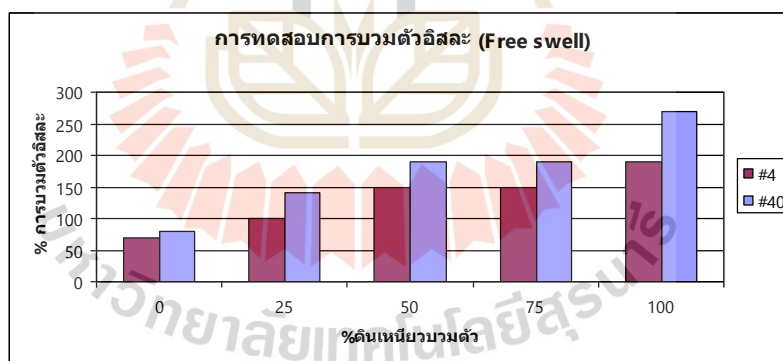


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวบวมตัวกับ Atterberg Limit

4.2 ผลการทดสอบการบวมตัวและหดตัวอย่างอิสระ

4.2.1 ผลการทดสอบการบวมตัวอย่างอิสระ Free swell test

จากการทดสอบการบวมตัวอย่างอิสระ (Free Swell Test) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวอย่างง่ายของดิน โดยทดสอบให้ดินตัวอย่างบวมตัวอย่างอิสระ และศึกษาค่าการบวมตัวของเม็ดดินที่มีขนาดแตกต่างกันของตัวอย่างดินทั้ง 2 ตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณดินเหนียวบวมตัวเพิ่มขึ้นในดินตัวอย่างการบวมตัวอย่างอิสระของตัวอย่างดินเหนียวบวมตัวของเม็ดดินที่มีขนาดแตกต่างกันได้ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวใกล้เคียงกัน ดังนั้น ขนาดของเม็ดดินจึงไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของดินเหนียว WH-00 แต่สำหรับตัวอย่างดินที่มีดินเหนียวบวมตัวผสมอยู่ ได้แก่ WH-25, WH-50, WH-75 และ WH-100 น้ำสามารถซึมเข้าสู่ดินเม็ดละเอียดได้ง่ายกว่าดินเม็ดหยาบ และในปริมาณที่เท่ากันดินที่มีเม็ดละเอียดมีพื้นที่ผิวโดยรวมมากกว่าดินเม็ดหยาบ ซึ่งเมื่อดินเกิดการบวมตัวอย่างอิสระได้ทุกทิศทางสำหรับดินเม็ดละเอียดจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้มากกว่า จึงทำให้ตัวอย่างดิน มีดินเหนียวบวมตัวผสมมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวแตกต่างกันและตัวอย่างดินเหนียวบวมตัว WH-100 มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวแตกต่างกันมากที่สุด

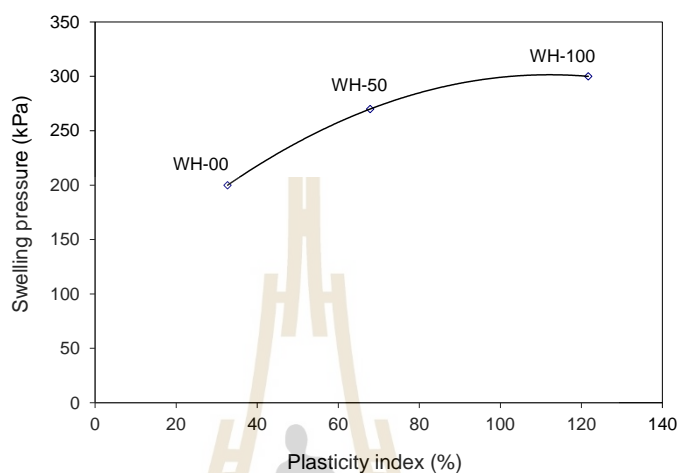


รูปที่ 4.2 การบวมตัวอย่างอิสระ (Free Swell Test)

4.2.2 ผลการทดสอบการบวมตัว (Swelling Soil Test)

เมื่อวิเคราะห์โดยพิจารณาจากผลการทดสอบแรงดันเนื่องจากการบวมตัวของตัวอย่างดินทั้ง 3 สัดส่วนคละ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการบวมตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงแรงดัน เนื่องจากการบวม (Swelling pressure) กับ Plasticity Index ที่มีค่าแรงดันการบวมตัว อยู่ระหว่าง 200 ถึง 300 kPa ซึ่งมีระดับการบวมตัว (Swelling Potential) ในระดับสูงถึงสูงมาก (Thomas et al., 2000) เมื่อเทียบกับงานวิจัยต่างๆ (Lew, 2010) แสดงผลระดับการบวมตัวของดิน

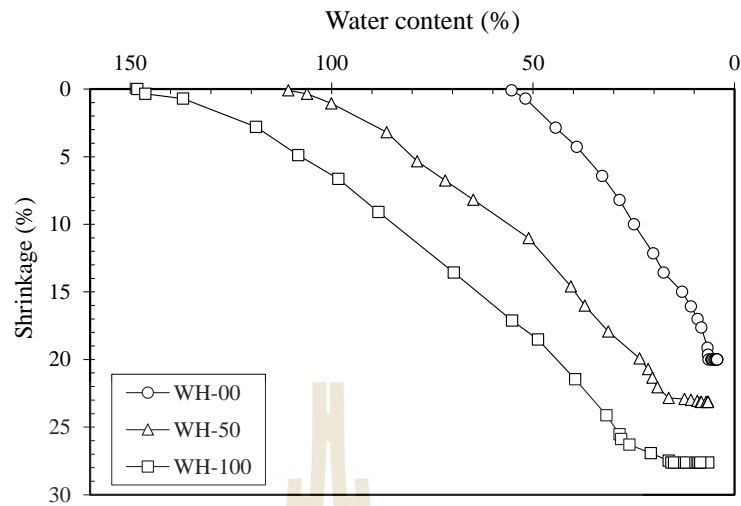
ซึ่งในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าแรงดันเนื่องจากบวมตัวแปรผันตามดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ปริมาณดินเหนียวบวมตัวที่เพิ่มขึ้น เกิดแรงดันบวมตัวในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในมวลดินสูงขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเนื่องจากการบวมตัวกับดัชนีพลาสติกของดินเหนียวบวมตัวในงานวิจัยนี้

4.2.3 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage)

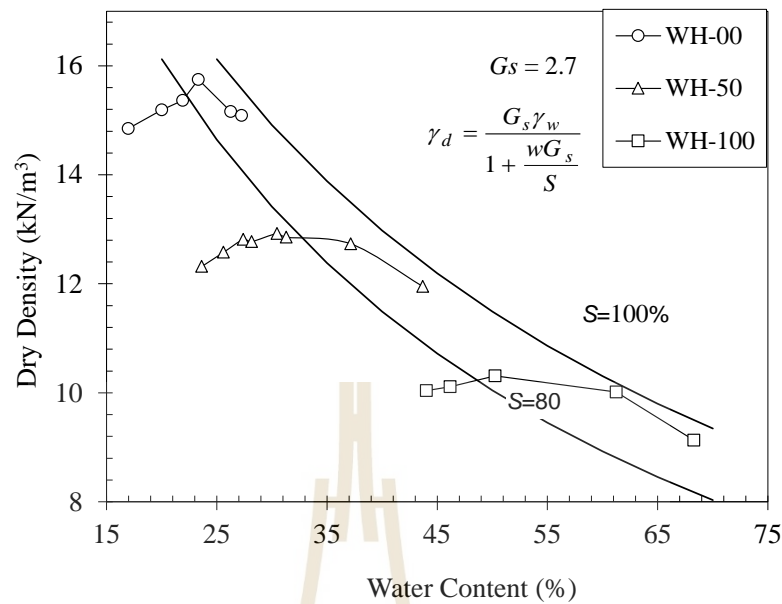
จากการทดสอบการหดตัวเชิงเส้นของตัวอย่างดินที่ทำการศึกษาทั้ง 3 สัดส่วน แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวต่อเวลาดังแสดงรูปที่ 4.4 พบว่าค่าการหดตัวมีความสอดคล้องกับปริมาณดินเหนียวบวมตัวที่ผสมในดินตัวอย่าง การหดตัวของตัวอย่างดิน WH-100 ที่มีดินเหนียวบวมตัวสูงสุดสิ้นสุดกระบวนการหดตัวก่อนตัวอย่างดินที่มีปริมาณดินเหนียวบวมตัวลดลงตามลำดับ และที่เวลาทดสอบเท่ากัน การหดตัวของตัวอย่างดิน WH-100 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นสูงสุด สำหรับดินตัวอย่างที่มีดินเหนียวบวมตัวปนอยู่เพิ่มขึ้นจะมีอัตราการหดตัวลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณดินเหนียวบวมตัวในตัวอย่าง และเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงถึงจุดหนึ่งพบว่าดินไม่มีการหดตัวเพิ่มขึ้นเพราะดินมีความชื้นเข้าสู่พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit) ทำให้ดินอยู่ในสถานะของแข็ง ดินตัวอย่างจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อปริมาณความชื้น

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการบดอัด

จากผลการทดสอบการบดอัด ดังแสดงรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดินทั้ง 3 สัดส่วนคละ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) 15.75 kN/m^3 , 12.92 kN/m^3 และ 10.31 kN/m^3 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามปริมาณสัดส่วนของดินเหนียวบวมตัวที่เพิ่มขึ้น

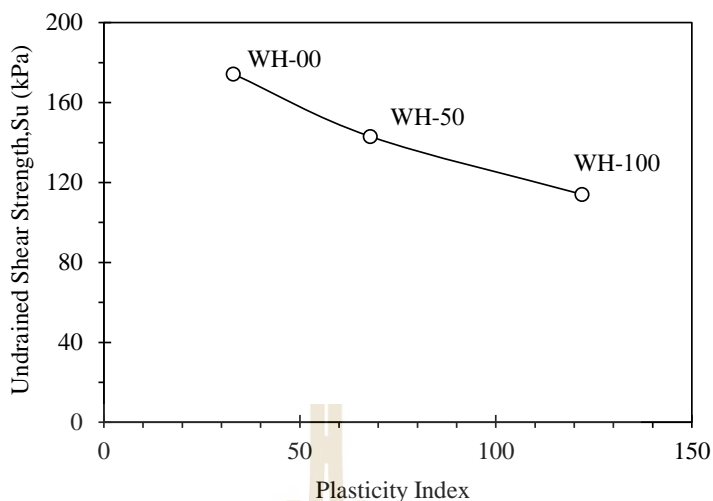


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ

จากค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ของตัวอย่างดินทั้งสามชนิดชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบของดินที่มีศักยภาพในการบวมตัวสูงผสมอยู่ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง และมีปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากดินมีค่าพิกัดพลาสติกสูงทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำมากในการเปลี่ยนสถานะของดินแห้งที่บดอัดแล้ว เกิดช่องว่างในดินสูง ทำให้ดินมีสถานะเป็นกึ่งของแข็ง ที่บดอัดแล้วมีช่องว่างอากาศลดลง

4.4 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

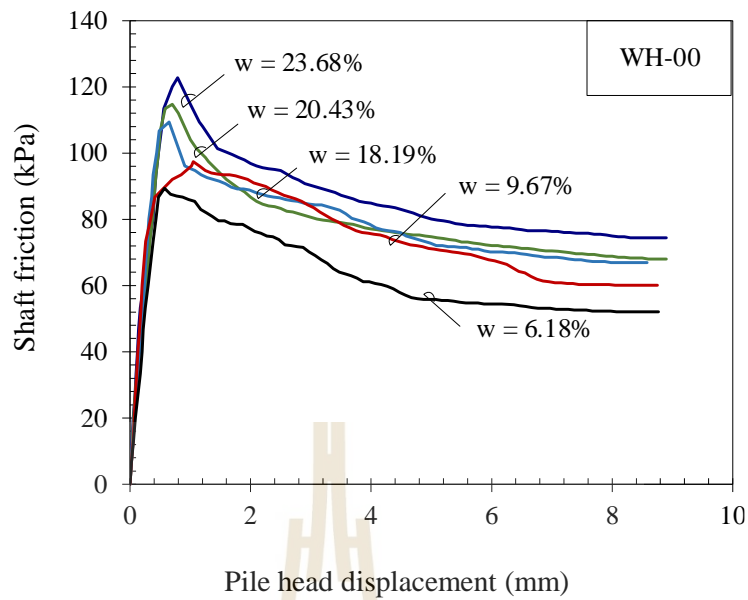
เมื่อพิจารณาจากกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ในงานวิจัยนี้ได้จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินบดอัดปั้นใหม่ที่ปริมาณน้ำเหมาะสม ดังรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนต่อดัชนีพลาสติก สังเกตเห็นว่า กำลังรับแรงเฉือนแปรผกผันต่อดัชนีพลาสติก เนื่องจากดินเหนียวบวมตัวมีศักยภาพการบวมตัวสูงเมื่อมีดัชนีพลาสติกที่สูงขึ้นส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลง



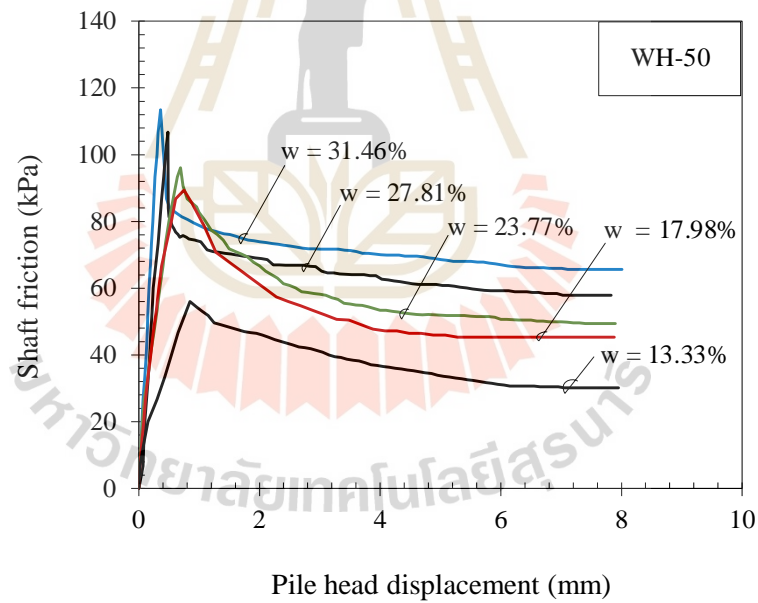
รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงเฉือน (Undrained Shear Strength) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม กับดัชนีพลาสติก

4.5 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวรวมตัวต่อหน่วยแรงเสียดทาน

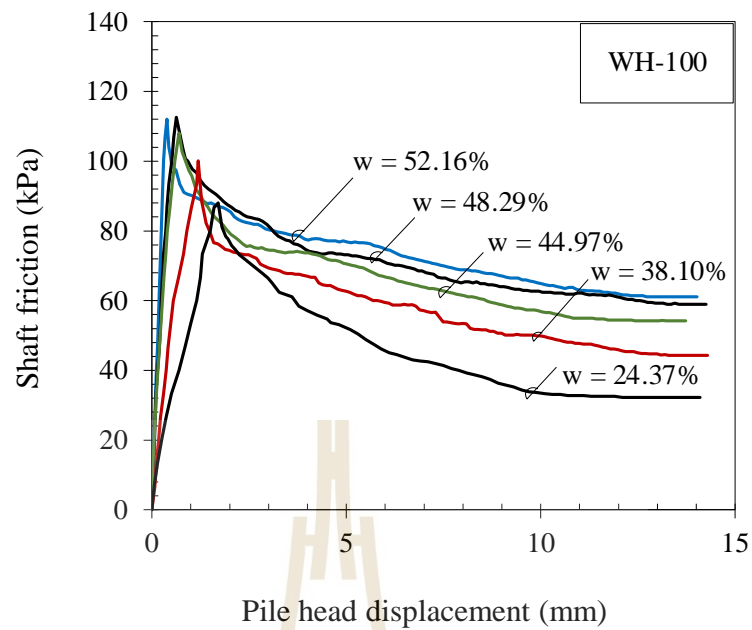
จากผลการทดสอบหาอิทธิพลของดินเหนียวรวมตัวที่ส่งผลกระทบต่อหน่วยแรงเสียดทาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวรวมตัวต่อหน่วยแรงเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัว (Displacement) สำหรับส่วนผสม WH-00 มีค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวสูงสุด (τ_p) อยู่ระหว่าง 89 ถึง 122 kPa ตัวอย่างชนิดที่มีดินเหนียวรวมตัวเป็นส่วนผสม WH-50 และ WH-100 มีค่าระหว่าง 56 ถึง 113 kPa และ 88 ถึง 112 kPa ตามลำดับ เห็นได้ว่าการทดสอบในทุกความชื้นในดิน ก่อนถึง τ_p การพัฒนาหน่วยแรงเสียดทาน มีลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อหน่วยแรงเสียดทานผิวพัฒนาจนถึงขีดสุดแล้วมีการลดลงเหลือเป็นหน่วยแรงเสียดทานผิวคงค้าง (τ_c) ที่ตัวอย่าง WH-00, WH-50 และ WH-100 มีค่า τ_c ในช่วง 52 kPa ถึง 74 kPa, 30 ถึง 65 และ 32 ถึง 61 ตามลำดับ พบว่าค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลงตามปริมาณสัดส่วนคละของดินเหนียวรวมตัว



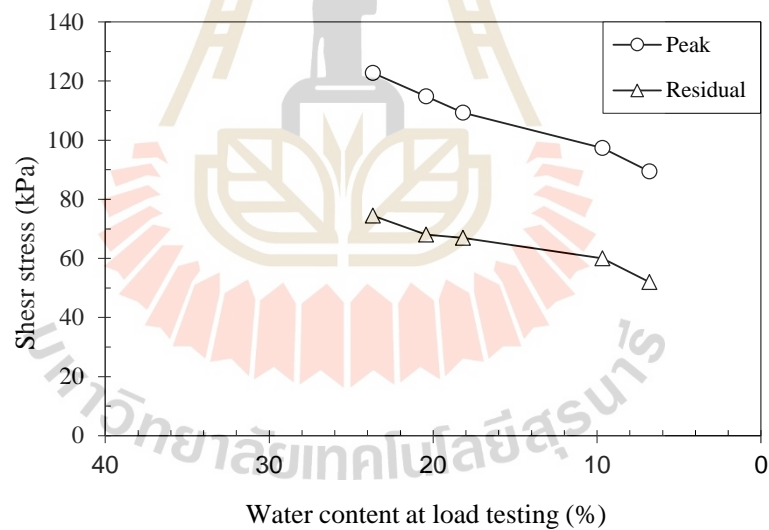
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียตทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน WH-00



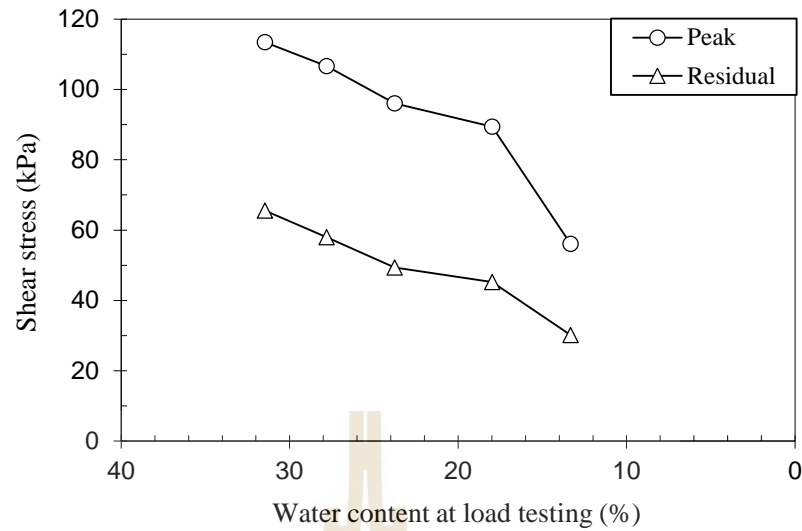
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียตทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน WH-50



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน WH-100

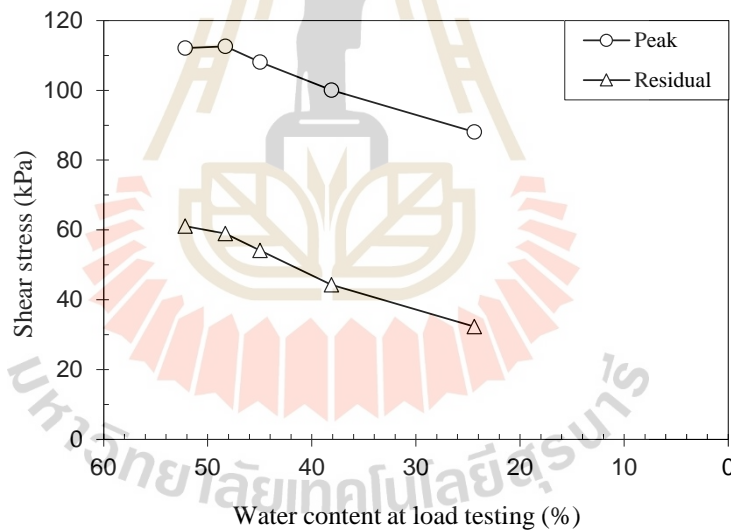


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการลดลงของปริมาณน้ำในตัวอย่าง WH-00



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (Stress) ต่อการลดลงของปริมาณน้ำในตัวอย่าง

WH-50



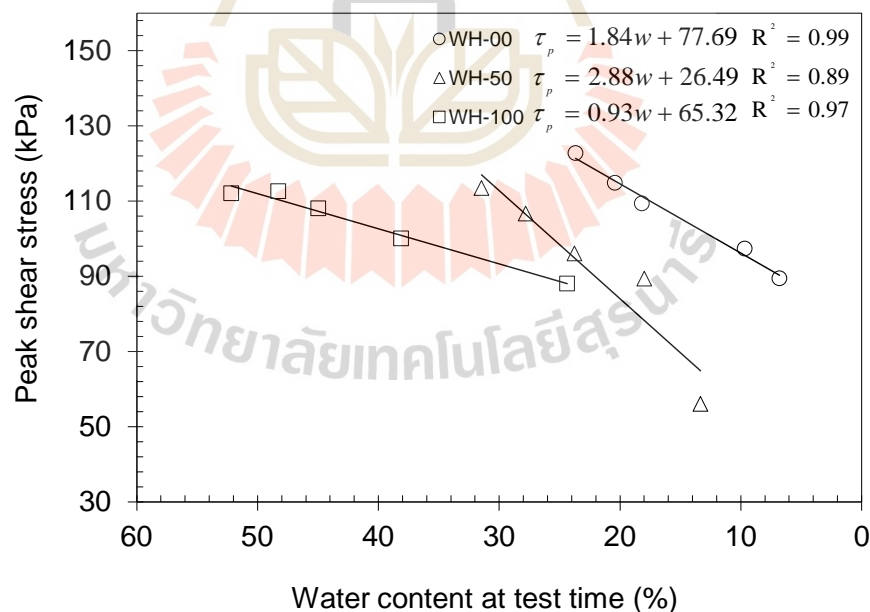
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (Stress) ต่อการลดลงของปริมาณน้ำในตัวอย่าง

WH-100

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (Stress) ต่อการทรุดตัว Displacement) เมื่อพิจารณา หน่วยแรงเฉือนของตัวอย่างดินทั้ง 3 สัดส่วน ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ที่แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและหน่วยแรงคงค้างต่อปริมาณความชื้น พบว่า หน่วยแรงเฉือนสูงสุดและหน่วยแรงคงค้างจากปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content) ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ค่าหน่วยแรงเฉือนแปรผันตามปริมาณความชื้น

ที่ลดลง สันเกตได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง หน่วยแรงเสียดทานมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของดินเหนียวรวมตัวปนอยู่ตามลำดับ

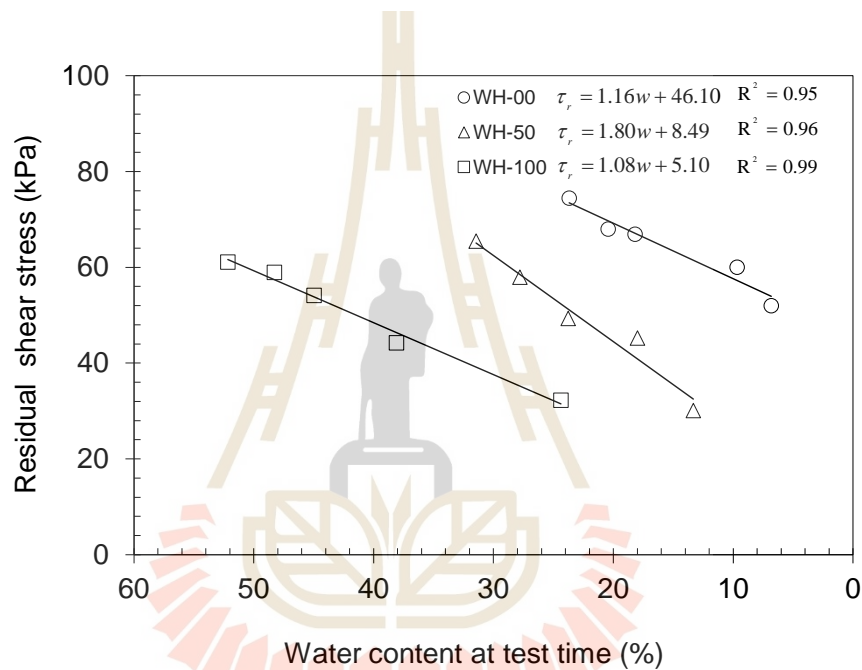
จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัว (Displacement) เมื่อนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับปริมาณน้ำในดินของแต่ละอัตราส่วนผสมพบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสร้างสมการเชิงเส้นของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อทราบค่าปริมาณน้ำในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในดิน พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และแสดงสมการเชิงเส้นดังตารางที่ 4.2 ที่จำแนกสมการตามปริมาณดินบวมตัวผสมในตัวอย่าง โดยหลักการคือ ปริมาณน้ำในดินที่ลดลงทำให้ดินหดตัว จึงมีแรงเสียดทานสูงสุดลดลง สำหรับการนำไปใช้ออกแบบเมื่อสำรวจดินถมที่ใช้ในการก่อสร้างพบว่ามีดินเหนียวรวมตัวผสมอยู่ สามารถประมาณค่าแรงเสียดทานผิวเสาเข็มที่ลดลงเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวรวมตัวเมื่อทราบค่าปริมาณน้ำในดินได้ โดยออกแบบเสาเข็มให้มีกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น โดยคิดเผื่อการสูญเสียค่าแรงเสียดทานผิวเสาเข็มที่ได้จากสมการโดยอิทธิพลของดินเหนียวรวมตัวเพื่อเพิ่มความปลอดภัยต่องานก่อสร้างในอนาคต



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 4.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในดินตัวอย่าง

ส่วนผสม	สมการความสัมพันธ์	R^2
WH-00	$\tau_p = 1.84w + 77.69$ (1)	0.99
WH-50	$\tau_p = 2.88w + 26.49$ (2)	0.89
WH-100	$\tau_p = 0.93w + 65.36$ (3)	0.97

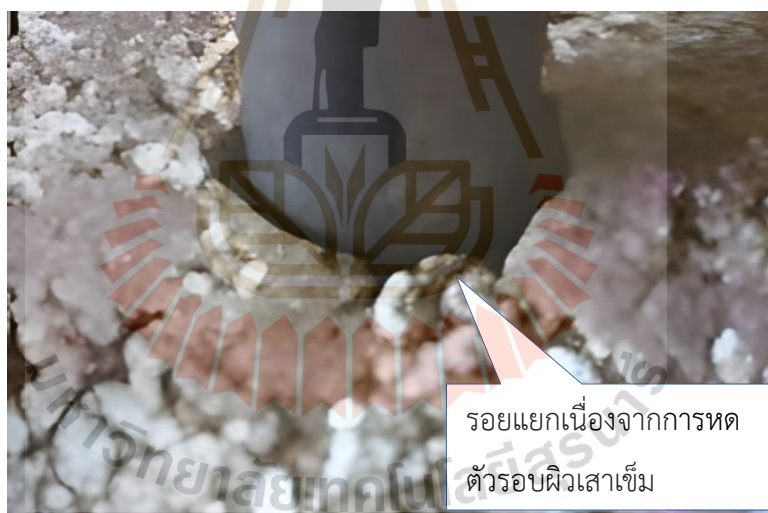


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนคงค้างกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิห้อง

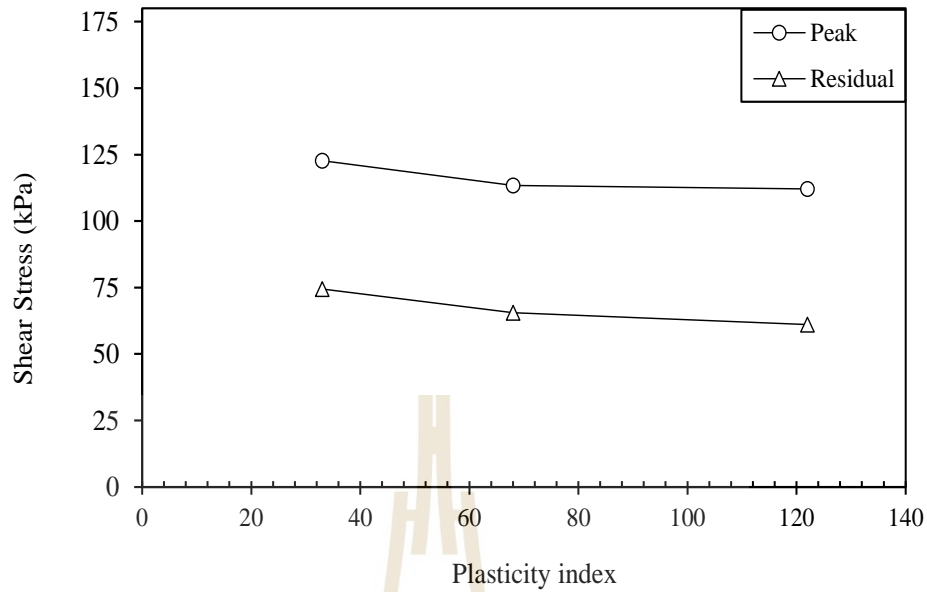
ตารางที่ 4.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_r กับปริมาณน้ำในดินตัวอย่าง

ส่วนผสม	สมการความสัมพันธ์	R^2
WH-00	$\tau_r = 1.16w + 46.10$ (4)	0.95
WH-50	$\tau_r = 1.80w + 8.49$ (5)	0.96
WH-100	$\tau_r = 1.08w + 5.10$ (6)	0.99

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในเสาเข็มและปริมาณน้ำในดินตัวอย่าง พบว่าแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มลดลงเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งการลดลงของน้ำในดินนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำบริเวณรอบเสาเข็ม และทำให้ดินตามแนวเส้นรอบวงของเสาเข็มหดตัว การหดตัวของดินนี้ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินลดลง และเมื่อเกิดช่องว่างระหว่างเสาเข็มกับการระเหยจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากรอยแยกที่เกิดจากการหดตัว ทำให้เกิดพื้นที่ระเหยเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.15 เป็นภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบที่มีการระเหยของน้ำจนกระทั่งดินรอบเสาเข็มหดตัว ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับดินลดลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างสูงสุด ของตัวอย่างทั้ง 3 สัดส่วนมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.16 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับดัชนีพลาสติก เมื่อมีดินเหนียววมตัวเป็นส่วนผสมค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงตามลำดับ เห็นได้ว่า กำลังรับแรงเฉือนแปรผกผันกับปริมาณดินวมตัวที่มีในส่วนผสมที่ 50 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดไม่ขึ้นกับปริมาณดินวมตัวที่มีในส่วนผสม สำหรับกำลังรับแรงเฉือนคงค้างนั้นแปรผกผันกับปริมาณดินเหนียววมตัวที่มีในส่วนผสม

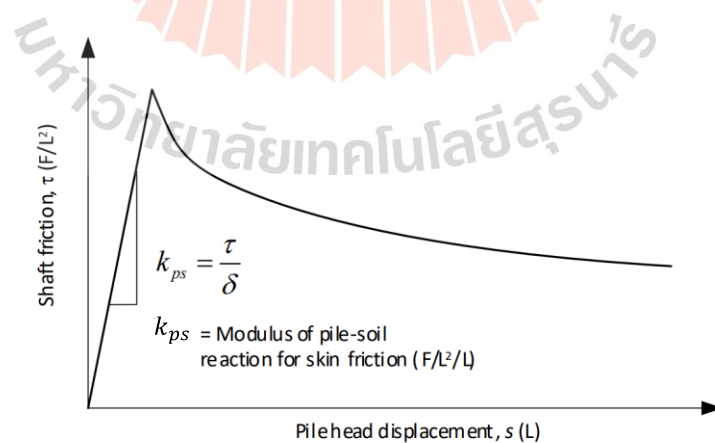


รูปที่ 4.15 รอยแยกระหว่างดินกับแท่งเหล็กเนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างดิน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับดัชนีพลาสติก

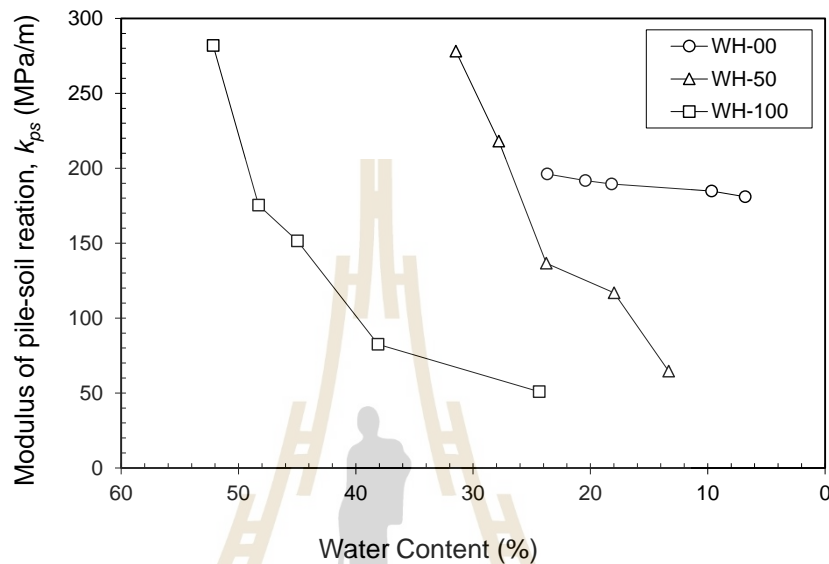
จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงก่อนถึงจุดที่มีหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความชันของผลการทดสอบเป็นอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ดังสมการ (4.1) ในที่นี้เรียกว่า Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิว, k_{ps} ดังรูปที่ 4.17 จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง k_{ps} กับปริมาณน้ำในดินของแต่ละอัตราส่วนผสมได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 การหาค่า Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิวจากความสัมพันธ์ส่วนที่เป็นเส้นตรงก่อนถึงจุดที่มีหน่วยแรงสูงสุด

$$k_{ps} = \frac{\tau}{\delta} \quad (4.1)$$

เมื่อ k_{ps} คือ Modulus of pile-soil reaction , τ คือ Stress และ δ คือ การทรุดตัว



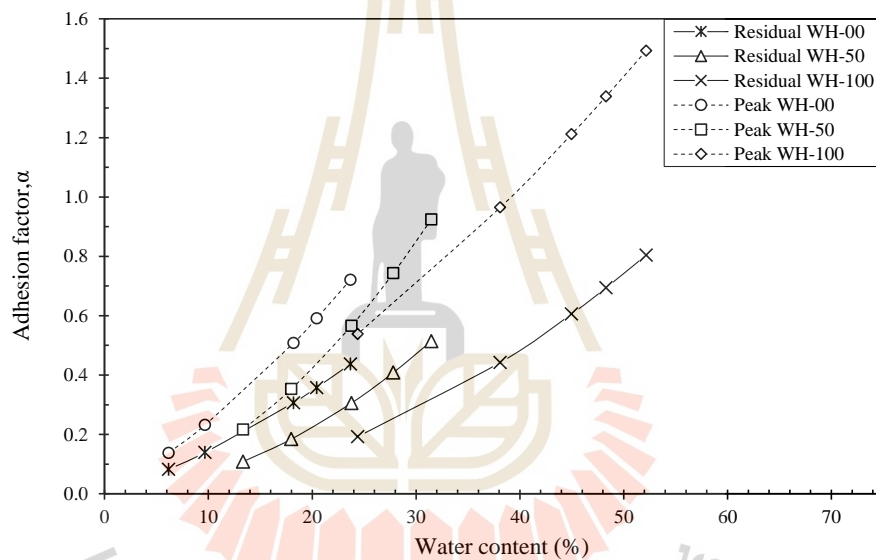
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิว กับปริมาณน้ำในตัวอย่างทดสอบ

จากรูปที่ 4.18 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of pile-soil reaction, k_{ps} กับปริมาณน้ำในดิน พบว่า k_{ps} แปรผันตรงกับปริมาณน้ำในดิน โดยเฉพาะกับตัวอย่างที่มีดินเหนียว บวมตัวเป็นส่วนผสมที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราส่วน WH-100 และ WH-50 มีค่าอยู่ในช่วง 50.82 ถึง 281.88 MPa/m และ 64.61 ถึง 278.02 MPa/m ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ WH-00 อยู่ในช่วง 180.90 ถึง 196.13 MPa/m ที่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของความชื้นในตัวอย่างที่มีดินเหนียวบวมตัวผสมตั้งแต่ 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์มีอิทธิพลต่อการลดลงของ k_{ps} อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น หากจะใช้ดินเหนียวที่มีส่วนผสมของดินเหนียวบวมตัว เจือปนจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการหดตัวของดินอันจะทำให้ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็มลดลง โดยเฉพาะการใช้เสาเข็มสั้นในพื้นที่ซึ่งความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น ซึ่งก็มีโอกาสที่เสาเข็มจะฝังอยู่ในชั้นดินที่มีส่วนประกอบเป็นดินเหนียวบวมตัวได้

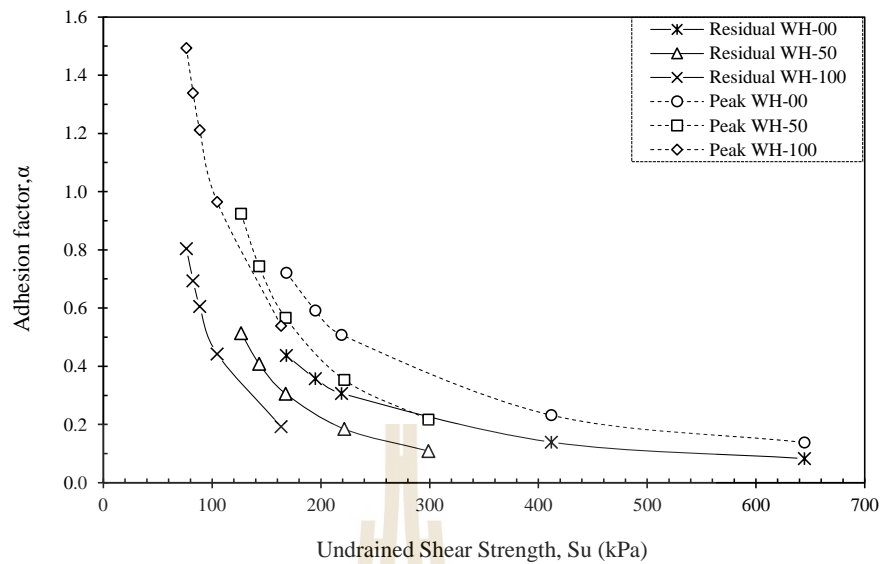
เพื่อพัฒนาผลที่ได้จากงานวิจัยเพื่อใช้ในการออกแบบเสาเข็ม จึงได้ทำการคำนวณย้อนกลับ ดังสมการ (4.2) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะระหว่างตัวอย่างดินบวมตัวกับเสาเข็มเหล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ตัวแปรเป็น α ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$\alpha = \frac{\tau_p}{S_u} \quad (4.2)$$

โดยใช้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Undrained shear strength, S_u) ในงานวิจัยนี้ได้จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินบดอัดปั้นใหม่ที่ปริมาณน้ำเหมาะสมของแต่ละสัดส่วน ได้แก่ WH-00, WH-50 และ WH-100

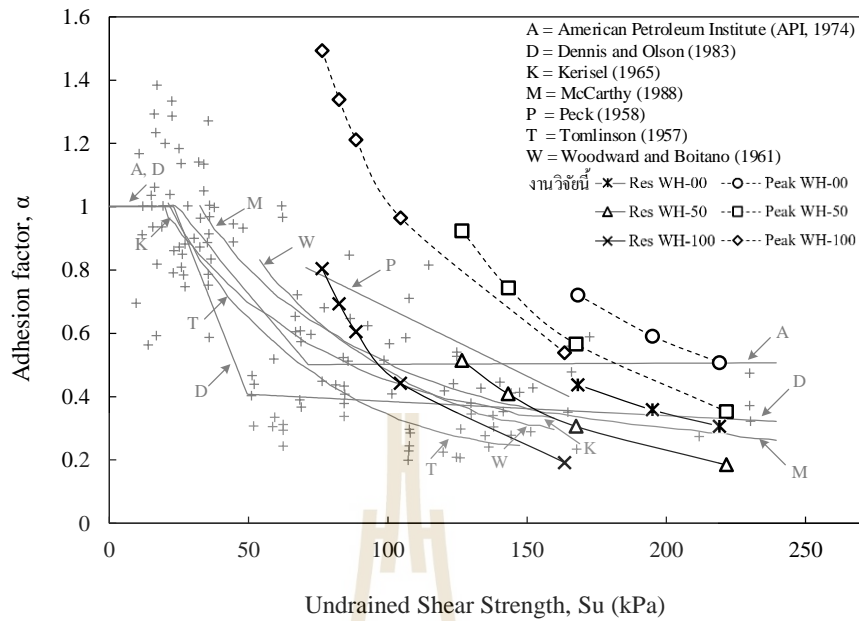


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor กับปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor กับ Undrained shear strength

จากผลการทดสอบกำลังแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength (UCS) ได้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Undrained shear strength, S_u) และผลการทดสอบหน่วยแรงเสียดทานผิวสูงสุดและหน่วยแรงเสียดทานคงค้างของการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็ก ซึ่งสามารถสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion factor, α) กับ ปริมาณความชื้นในตัวอย่างดิน ดังแสดงรูปที่ 4.19 พบว่า α แปรผันตามปริมาณความชื้น เนื่องจากงานวิจัยเพื่อหาการสูญเสียแรงเสียดทานจากการหดตัวของดินเหนียวรวมตัว ดังนั้น α ที่ได้จากการทดสอบ แสดงผลการแปรผันต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน โดยปริมาณน้ำเริ่มต้นได้จากปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum water content, OWC) เท่านั้น ซึ่งปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นจากการติดตั้งเสาเข็มมีค่าแตกต่างจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเพื่อเปรียบเทียบกับการนำไปใช้งาน จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion factor, α) กับ ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Undrained shear strength, S_u) ดังรูปที่ 4.20 ที่แสดงว่า α แปรผกผันต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน โดยที่ค่าแรงเสียดทานสูงสุดส่งผลให้ค่า α สูงกว่าค่าที่ได้จากแรงเสียดทานคงค้าง



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor กับ Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบกำลังเสาะเข็ม (Vesic, 1977) กับงานวิจัยนี้

จากรูปที่ 4.21 เมื่อนำค่า α ที่ได้จากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่รายงานโดย Vesic (1977) จากค่า α ส่วนใหญ่ได้จากการทดสอบเสาะเข็มจนเกิดการหลุดตัวสูง ซึ่งหน่วยแรงเฉือนที่ได้จากผลการทดสอบจะเป็นหน่วยแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Stress) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ใช้ Residual Shear Stress ที่ได้จากการทดสอบการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาะเข็ม ในการคำนวณค่า α เพื่อให้สอดคล้องกับที่ Vesic (1977) ได้เสนอไว้ และงานวิจัยนี้ยังได้นำหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Stress) ในการคำนวณค่า α โดยทำขึ้นไว้เพื่อเปรียบเทียบเท่านั้น

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางกลของดินเหนียวกระจายตัว และดินเหนียวรวมตัวที่พบใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ Xray Diffraction การทดสอบ พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก การทดสอบการหดตัวเชิงเส้น การทดสอบการบดอัด การทดสอบ การบวมตัว และการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด และศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียแรงเสียดทานผิว ของเสาเข็มกับดินบดอัดแบบมาตรฐานที่มีดินเหนียวกระจายตัวและดินเหนียวรวมตัวผสมเป็น อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ตัวอย่างดินเหนียวกระจายตัวและดินเหนียวรวมตัวที่พบ มีแร่ Quartz และ แร่ Montmorillonite เป็นองค์ประกอบหลัก ตามลำดับ จากผลการทดสอบพิกัดเหลวและพิกัด พลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวกระจายตัวที่มีดินเหนียวรวมตัวเป็นส่วนผสม พบว่า ดินที่มีดินเหนียว บวมตัวผสมเกินกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงมาก (Extremely High Plasticity) จากผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้น พบว่า เปอร์เซ็นต์การหดตัวของ ดินที่มีดินเหนียวรวมตัวผสมมีค่ามากกว่าดินเหนียวกระจายตัว จากผลการทดสอบการบดอัดของดิน เหนียวรวมตัวผสมดินเหนียวรวมตัว พบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดแปรผกผันตามปริมาณดิน เหนียวรวมตัวที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ในเชิงคุณสมบัติทางกล จากผลการทดสอบแรงดัน เนื่องจากรวมตัว เมื่อปริมาณดินเหนียวรวมตัวที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงดันบวมตัวในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ตามลำดับ และผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด จากดินบดอัดแบบมาตรฐาน ค่ากำลังต้านทาน แรงเฉือน (Undrained shear strength, S_u) แปรผกผันต่อปริมาณดินเหนียวรวมตัว บ่งชี้ว่า ดินเหนียวรวมตัวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อกำลังต้านทานแรงที่ลดลง ตามลำดับ

2) จากผลการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม แสดงว่า แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลง เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินลดตามลำดับ ดังความสัมพันธ์หน่วยแรง เสียดทาน (Stress) ต่อการทรุดตัวในตัวอย่างดิน และในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างหน่วย แรงเสียดทานผิวกับการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นค่า Modulus of pile-soil reaction, k_{ps} พบว่า k_{ps} ของเสาเข็มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อดินมีดินเหนียวรวมตัวผสมอยู่เกินกว่าร้อยละ 50 ซึ่งในทาง ปฏิบัตินั้น อาจเป็นไปได้ยากที่จะระบุปริมาณของดินเหนียวรวมตัว งานวิจัยนี้จึงได้เสนอความสัมพันธ์

ระหว่างดัชนีพลาสติกกับปริมาณของดินเหนียวรวมตัว เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับของดินเหนียวรวมตัวที่อยู่ในดิน และเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor, α กับปริมาณน้ำในดิน พบว่า α แปรผันต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำในมวลดิน โดยปริมาณน้ำเริ่มต้นได้จาก OWC เท่านั้น ซึ่งการติดตั้งเสาเข็ม ปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นมีค่าแตกต่างจากการทดสอบ ดังนั้น จึงได้เสนอ α กับ ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Undrained shear strength, S_u) เพื่อใช้พิจารณาในการออกแบบเสาเข็มในชั้นดินที่มีศักยภาพในการรวมตัวได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียแรงเสียดทานของผิวเสาเข็มจากการหดตัวสำหรับการศึกษาในอนาคตต้องทดสอบถึงแรงดันเนื่องจากการรวมตัวของดิน เพื่อพิจารณาผลกระทบของแรงเสียดทานผิวเสาเข็มจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในมวลดินต่อไป



บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน (2556). “การวิเคราะห์พฤติกรรมพร้อมทั้งแก้ไขปัญหาลำน้ำเชื่อมป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี” จุลสารสำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา. ปีที่ 4 ฉบับที่ 39. กรกฎาคม 2559
- จุฬาลักษณ์ ทองแท่ง และ เศรษฐพงษ์ เศรษฐบุปผา (2564) การวิเคราะห์ความเสียหายของอาคารโรงงานเนื่องจากดินบวมตัวใน อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26, การประชุมรูปแบบออนไลน์
- ณรงค์เดช ยังสุขเกษม (2565) พฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวบวมตัวต่ำปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใหม่, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
- ปริญญช ยวงใย และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ (2562) อุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดินมาตรฐาน, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57
- พรพจน์ และคณะ (2549) การวิบัติของคันดินอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ในชั้นดินเหนียวกระจายตัวแทรกด้วยชั้นดินเหนียวบวมตัว, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 จ.ภูเก็ต
- พรพจน์ และคณะ (2550) ผลของการบวมตัวและหดตัวของดินเหนียวบวมตัวอัดต่อฐานรากตื้น, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 จ. พิษณุโลก
- พรพจน์ ต้นเส็ง และพลอนันต์ สดโคกกรวด (2552) อิทธิพลของปูนขาวต่อการหดตัวของดินเหนียวบวมตัวที่พบในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, มนตรี จินากุลวิวัฒน์, เมฆ เมฆขาว และ เอกพงษ์ แน่นอุดร (2558) ผลกระทบของดินบวมตัวต่อความปลอดภัยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 20, จ. ชลบุรี
- สุธินันท์ กั้นเงิน และ เศรษฐพงษ์ เศรษฐบุปผา (2563) การวิเคราะห์การยกตัวของถนนผิวคอนกรีตจากผลการทดสอบศักยภาพในการบวมตัวของดิน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 25, จ. ชลบุรี

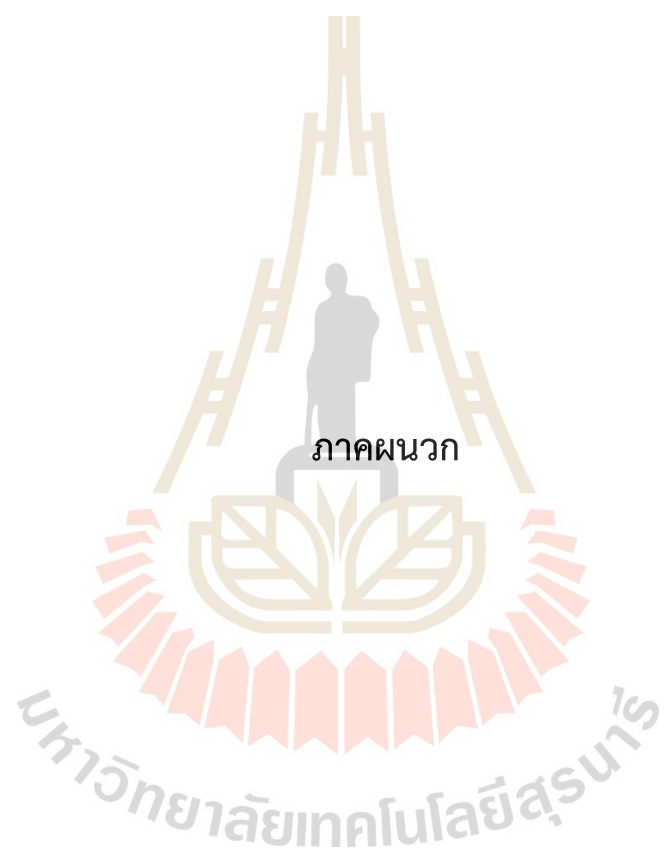
- อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ (2551) การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46
- เมฆ เมฆขาว, มนตรี จินากุลวิวัฒน์ และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ (2558) การประเมินศักยภาพการบวมตัวของดินถมตัวเชื่อมกรณีศึกษาเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์, การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่ 20, จ. ชลบุรี
- ฤทธิพล จันทราชภูร์ และ ประพจน์ ชุนทอง (2553) การศึกษาวิธีดัดจีโอเมคคอร์ริเลชั่น: การพัฒนา และประเมินความแม่นยำ, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48
- Al-Rawas A. A. and Qarnaruddin M. (1998) A Case Study on Expansive Soils and Rocks of Al-Khod in Northern Oman, Proceedings of the 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri.
- Al-Homoud and Al-Suleiman (1997) Loss in serviceability of pavements due to expansive clay subgrades. Environmental and Engineering Geoscience, III (1) (1997), pp. 277-294
- American Standards for Testing Materials (2003) Standard Test methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM D 2435 - 04.
- American Standards for Testing Materials (2003) Standard Test methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, ASTM D 4546.
- BS 1377: Part 2: 1990: Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes British Standards Institution. BSI. -1990- British Standards Institution
- B. Soundara and R.G. Robinson (2012), Swelling Pressure and Uplift of Piles in Expansive Soils, Proceedings of the First Asian Workshop on Physical Modelling in Geotechnics.
- Chen F.H. (1988) Foundations on Expansive Soils (2nd Edition), Elsevier Science Publications, New York.

- Chen, F.H. & Ma, G.S. (1987). Swelling and shrinkage behavior of expansive clays. Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils, vol. 1, New Delhi, India, 127-129.
- Chen, F. H. (1975) Foundations on expansive soils. Elsevier, Amsterdam
- C.S. Gourley, D. Newill and H.D. Schreiner (1993), EXPANSIVE SOILS: TRL'S RESEARCH STRATEGY, Proceedings of THE 1ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING CHARACTERISTICS OF ARID SOILS, LONDON JULY 6-7, 1993
- Dasog S. G. and Mermut R. A. (2013), Expansive soil and clays, Encyclopedia of Natural Hazard.
- Day W. R. (2010) Foundation Engineering Handbook: Design and Construction with the 2006 International Building Code, ASCE Press, McGraw-Hill Companies, Inc.
- D. P. Coduto, "Foundation Design Principles and Practices", Prentice-Hall, Inc, New Jersey, (2001).
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- H. B. Seed, et al., "Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 88, No. 3, 1962, pp. 53-87.
- Holt, W.C., and Hart S.S., 1978 Home construction on shrinking and swelling soil Colorado Geological survey. Issue of special publication.
- Holtz, W.C. (1959) Expansive clays- properties and problems. Journal of the Colorado School of Mines 54(4), 89-125.
- Holt, W.G., and Gibbs H.J. (1956). Engineering properties of expansive clays. Transactions, ASCE, vol. 121, pp. 641-677.
- J. D. Rogers, R. Olshansky and R. B. Rogers (1993), Damage to foundations from expansive soils. Claims people 3 No. 4 pp. 1-4.

- Liu Y. and Vanapali S. K. (2015), Estimation of uplift shaft friction for a single pile in expansive soil using the mechanics of unsaturated soils, Proceedings of the the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference GéoQuébec 2015
- Lew B. (2010) Structure damage due to expansive soils: a case study. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, vol.15 , 1317-1324.
- M. J. Tomlinson, "Foundation Design and Construction", Prentice Hall, (2001).
- N. A. Shayea, "The Combined Effect of Clay and Moisture Content on the Behavior of Remolded unsaturated Soils", Engineering Geology, vol. 62, (2001), pp. 319-342.
- O'Neill, M.W. and Poormoayed, N. (1980) "Methodology for foundations on expansive clay". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 106, Issue GT 12, pp 1345-1367.
- SA Mofiz and MN Islam (2010), Modeling and numerical analysis of expansive soil in stress path tests, Proceedings of GeoFlorida 2010: advances in analysis, modeling and design, West Palm Beach, Florida, USA, 20-24 February 2010
- Skempton AW (1953). The colloidal activity of clays. In: Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering. Zurich, Switzerland, ICOSOMEF, pp 57-61.
- Thomas, P.J., Baker, J.C. & Zelazny, L.W. (2000) Relationship of map unit variability to shrink-swell indicators. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 262-268
- Van der Merwe, D.H. (1964) Prediction of Heave from the Plasticity Index and Percentage of Clay Fraction of Soils. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 6, 103-107.

Wen T., Wang P., Shao L., and Guo X. (2021), Experimental investigations of soil shrinkage characteristics and their effects on the soil water characteristic curve, *Engineering Geology*.







รายชื่อบทความและวารสารทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

กาญจนา หิรัญวัฒน์, พรพจน์ ตันเส็ง (2566). การสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวบวมตัว, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (The 28th National Convention on Civil Engineering, GTE44) วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมภูเก็ต เกรซแลนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต



การสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวววมตัว Skin friction degradation due to shrinkage of expansive soil

กาญจนา ทิระวัฒน์¹, พรพจน์ ดันเส็ง²

^{1,2} สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา
E-mail address: ¹kanchanahiranwatthana@gmail.com, ²pompot@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวววมตัวธรรมชาติ ที่พบใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การวิจัยได้ทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ฝังในดินเหนียวววมตัวผสมกับดินเหนียวกระจายตัว ที่พบเป็นปริมาณมากในบริเวณเดียวกัน การทดสอบใช้ดินบดอัดในแบบทดสอบบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน ดินบวมตัวที่ใช้มีอัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 50 และ 100 และใช้ท่อนเหล็กกลมขนาด 16 มิลลิเมตร กดลงในดินที่บดอัด โดยออกแบบให้แรงต้านต่อการก่อกัดเฉพาะแรงเสียดทานผิวเท่านั้น จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างดินแห้งในสภาวะแวดล้อมปกติ แล้วทำการทดสอบแรงต้านทานต่อการก่อกัดของเหล็กที่ฝังในดิน จากผลการทดสอบพบว่า แรงต้านที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน ซึ่งเกิดจากการหดตัวของดิน จึงได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นค่า Modulus of pile-soil reaction ของแรงเสียดทาน (k_{ps}) พบว่า k_{ps} แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินสำหรับดินที่มีดินเหนียวววมตัวปบอยู่เกินกว่าร้อยละ 50 และในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor (α) กับปริมาณน้ำในดินซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเสาเข็มในดินที่มีดินเหนียวววมตัวเป็นองค์ประกอบได้

คำสำคัญ: ดินเหนียวววมตัว, มอนทอร์ริลโลไนท์, แรงเสียดทานเสาเข็ม, การหดตัว, เสาเข็ม

Abstract

This research discusses the loss of pile surface friction due to the contraction of the natural expansive soil found in Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. The research was tested on the surface friction of piles embedded in a mixture of expansive soil and clay found in large quantities in the same area. The soil sample is prepared with stand compaction method. The expansive soil used had a mixture ratio of 0, 50, and 100. The 16 mm diameter steel rod is pushed through the compacted soil sample to avoid end resistance to

the steel rod. The soil is left to dry under ambient conditions. From the test results, it was found that the resistance at the pile surface decreased when soil water content was changing caused by soil shrinkage. Therefore, the correlation between surface resistance and pile subsidence was established as the modulus of pile-soil reaction of friction (k_{ps}). The k_{ps} vary with changing of soil water content for clay soil with swelling 50 %. In this research, the relationship between adhesion factor (α) and water content in the soil was proposed, which could be used as a guideline for the design of piles in clay-swelling soils.

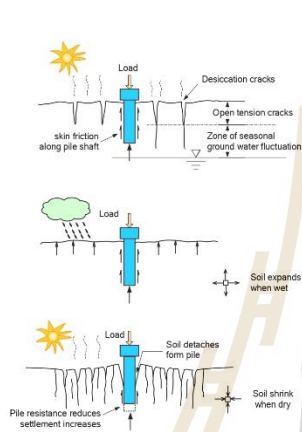
Keywords: Expansive soil, Montmorillonite, Skin friction, Shrinkage, Piles

1. บทนำ

ปัญหาดินเหนียวววมตัวในประเทศไทยยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายในงานวิศวกรรมฐานรากมากนัก เนื่องจากมีกรณีศึกษาน้อยแต่ทั่วไปบริเวณตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับการบวมตัวของดินในบางพื้นที่ โดยดินที่พบเป็นดินเหนียวซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดินเหนียวแหล่งที่พบนี้มีความลึกประมาณ 5 เมตร โดยปัญหาที่พบเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ การบวมตัวและหดตัวของดินจากการนำดินจากแหล่งดินมาถมและ บดอัดปรับพื้นที่เพื่อก่อสร้างอาคาร และทำการตอกเสาเข็ม ซึ่งดินบริเวณนี้เป็นดินเหนียวแข็งมากจนตอกเสาเข็มลงได้ยาก ดังนั้นจึงตอกเสาเข็มได้ไม่ยาวมากเมื่อใช้งานสักระยะหนึ่งจะพบปัญหาการบวมตัวของดิน เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น และดินหดตัวเมื่อความชื้นในดินลดลง ความชื้นในดินบริเวณนี้แปรผันอย่างมากตามฤดูกาล กล่าวคือเมื่อถึงฤดูฝนดินจะมีความชื้นสูง และเมื่อถึงฤดูแล้งดินจะมีความชื้นลดลง

ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเสาเข็มสั้นที่ฝังในชั้นดินโดยรูปที่ 1 แสดงกลไกการบวมและหดของดิน ที่ส่งผลต่อแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม เห็นได้ว่าเมื่อก่อสร้างเสาเข็มเสร็จในขณะที่ดินยังมีความชื้นในดินอยู่บ้าง แรงต้านแรงกระทำจากโครงสร้างเกิดจากแรงเสียดทานผิวและแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม เมื่อน้ำในดินเพิ่มขึ้นดินพองตัวออกและจับกับ

เสาเข็มแน่น ถึงแม้ว่าน้ำในดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนลดลง แต่ดินก็ยังสัมผัสกับเสาเข็มอยู่ และเมื่อน้ำในดินลดลง เนื่องจากการระเหยตามฤดูกาล ทำให้ดินหดตัว การหดตัวทำให้ดินแยกตัวออกจากเสาเข็ม ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานลดลง ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยรวมลดลงด้วย



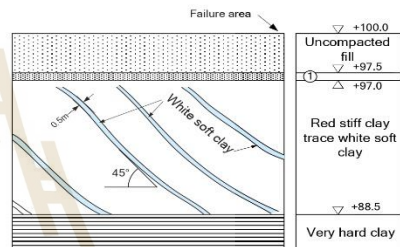
รูปที่ 1 แนวคิดด้านกำลังรับแรงเสียดทานที่ลดลง

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวรวมตัว โดยดินเหนียวรวมตัวที่นำมาศึกษานี้เป็นดินเหนียวรวมตัวที่พบในธรรมชาติที่พบในตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา การศึกษาจะเป็นการศึกษาในแบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วน เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลงเนื่องจากการระเหย และเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ลดลง

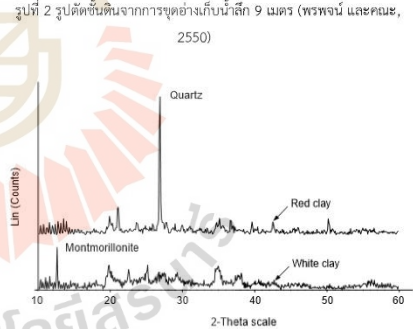
2. ข้อมูลโครงสร้างสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดิน

จากปัญหาดินเหนียวรวมตัวที่พบได้มีการศึกษาลักษณะชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติเชิงกล, และพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดไว้ โดย พรพจน์ และคณะ (2550) ได้รายงานถึงชั้นดินเหนียวรวมตัวที่พบตามธรรมชาติ หลังจากที่มีการขุดอ่างเก็บน้ำลึก 9 เมตร แล้วเกิด การวิบัติ จากลักษณะของชั้นดินดังรูปที่ 2 พบชั้นดินสีขาวที่หนาประมาณ 500 มิลลิเมตร แทรกสลับกับชั้นดินสีน้ำตาลเป็นแนวเอียง 45 องศา กับแนวราบ จึงได้ทำการศึกษาถึงสาเหตุของการวิบัติโดยนำตัวอย่างดิน มาทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) ดังแสดง รูปที่ 3 พบว่าดินที่มีสีขาว มีแร่ Montmorillonite เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อทดสอบหาไอออนที่อยู่ในดินพบว่ามีแคลเซียมไอออนเป็นหลัก เหตุนี้แร่องค์ประกอบหลักจึงเป็น Calcium montmorillonite และ ชั้นดินเหนียวแข็งสีแดง มีแร่องค์ประกอบหลักเป็น Quartz จากแหล่งดิน ที่ขุด

ขึ้นมาได้นำไปบดอัดเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุถม โดยสมมติว่าดินเหนียวแข็งและดินเหนียวรวมตัวอาจมีการผสมกัน ในขั้นตอนการขุดดิน จึงได้ทดลองผสมดินเหนียวรวมตัวสีขาวที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ แทนเป็น WH-00, WH-25, WH-50, WH-75 และ WH-100 ตามลำดับ เพื่อจำลองการเจือปน ดินเหนียวแข็งด้วยดินเหนียวรวมตัว การทดสอบความเป็นพลาสติกของดินชี้ให้เห็นว่า ค่าดัชนีพลาสติกของดินเหนียวรวมตัวเพิ่มขึ้นตามบริเวณ ดินเหนียวรวมตัวที่มีส่วนผสม ดังรูปที่ 4 เมื่อมีดินเหนียวรวมตัวผสมเกินกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงมาก (Extremely high plasticity) โดยการจำแนกความเป็นพลาสติกที่สูงมากนี้ อ้างอิงจาก Head (1980)



รูปที่ 2 รูปตัดชั้นดินจากการขุดอ่างเก็บน้ำลึก 9 เมตร (พรพจน์ และคณะ, 2550)

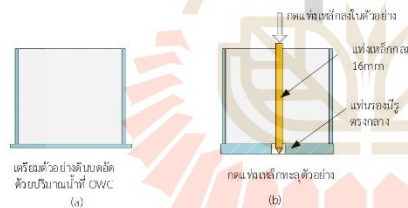


รูปที่ 3 ผลการทดสอบ X-ray diffraction (พรพจน์ และคณะ, 2550)

น้ำในดินเนื่องจากการระเหย ในงานวิจัยได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compressive strength) ของตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้ปริมาณน้ำเหมาะสม และทดสอบแรงดันจากการบวมตัว (swelling pressure) ของตัวอย่างดินที่บดอัดโดยใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ด้วยมาตรฐาน ASTM D 4546-08 One-Dimensional swell or collapse of cohesive soils method C

3.2 การติดตั้งเสาเข็ม

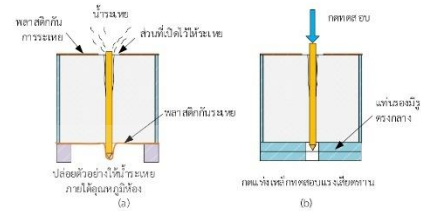
หลังการเตรียมตัวอย่างดินให้ใช้วิธีการบดอัดดินด้วยพลังงานบดอัดแบบมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ดังรูปที่ 8(a) ในการบดอัดใช้ปริมาณน้ำ เท่ากับปริมาณน้ำในดินที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดตามที่ได้มีการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินไว้ก่อนหน้าแล้ว หลังจากบดอัดดินแล้ววัดแห้งเหล็กปลายแหลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 170 มิลลิเมตร ลงตรงจุดศูนย์กลางของหน้าตัดจนทะลุอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างเพื่อไม่ต้องพิจารณาผลเนื่องจากแรงดันที่ปลายเข็ม ดังรูปที่ 8(b) หลังจากนั้นหุ้มรอบตัวอย่างเพื่อป้องกันการระเหยด้วยพลาสติก ในการปล่อยให้ระเหยจะใช้วิธีเจาะช่องรอบแห้งเหล็กเพื่อจำกัดบริเวณที่เกิดการระเหยของน้ำไว้เฉพาะบริเวณที่ติดกับเสาเข็ม ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการหดตัวที่ทำให้แรงเสียดทานผิวลดลง



รูปที่ 8 (a) การเตรียมตัวอย่างดินบดอัด และ (b) การกดแห้งเหล็กลงกลางตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงเสียดทานผิว

3.3 การทดสอบแรงเสียดทานของเสาเข็ม

การทดสอบแรงเสียดทานของเสาเข็มได้ทดสอบในกรณีที่มีตัวอย่างมีปริมาณน้ำในดินร้อยละ 100, 90, 80, 40 และ 30 ของปริมาณน้ำในดินเริ่มต้น ซึ่งน้ำในดินที่ลดลงเกิดจากการระเหยผ่านช่องที่เจาะไว้บริเวณรอบแห้งเหล็กที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 9(a) เมื่อน้ำในดินระเหยจนได้ปริมาณน้ำในดินตามต้องการซึ่งตรวจสอบได้จากการตรวจสอบน้ำหนักของตัวอย่างน้ำดินตัวอย่างมาทดสอบ โดยการให้แรงกดกระทำต่อปลายแห้งเหล็กโดยใช้ข้อตรากด 1 มิลลิเมตรต่อมาโดยใช้เครื่องทดสอบดังรูปที่ 10 การกดใช้แผ่นเหล็กรูปโดนัทรองเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันที่ปลายเข็ม ในการทดสอบกดจนกระทั่งแห้งเหล็กเคลื่อนตัวเกินกว่า 10 มิลลิเมตรซึ่งผ่านจุดที่จุดหน่วยแรงสูงสุดขึ้นในตัวอย่าง



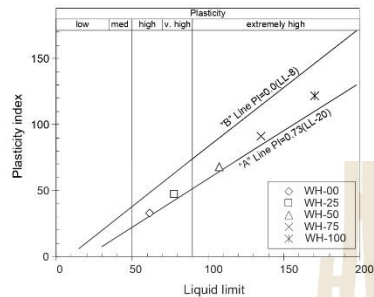
รูปที่ 9 (a) การปล่อยให้น้ำในตัวอย่างดินระเหยผ่านรูระเหยรอบแห้งเหล็ก (b) การทดสอบกดแห้งเหล็กเพื่อหาแรงเสียดทานผิว



รูปที่ 10 ภาพถ่ายการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ผิวแห้งเหล็กในตัวอย่างที่ปล่อยให้ระเหยในอุณหภูมิห้อง

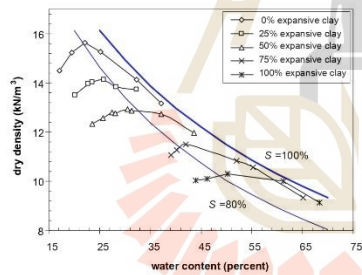
4. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบแรงต้านทานต่อการกดของแห้งเหล็กฝังในดินจากรูปที่ 11 ถึง 13 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแห้งเหล็กที่ปริมาณน้ำในดินต่าง ๆ สำหรับส่วนผสม WH-00 ค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวสูงสุด (T_p) มีค่าระหว่าง 90-124 kPa ตัวอย่างชนิดที่มีดินเหนียวรวมตัวเป็นส่วนผสม WH-50 และ WH-100 มีค่าระหว่าง 56-112 kPa และ 84-112 kPa ตามลำดับ เห็นได้ว่าการทดสอบในทุกความชื้นในดิน ก่อนถึง T_p การพัฒนาหน่วยแรงเสียดทานมีลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อหน่วยแรงเสียดทานผิวพัฒนาจนถึงขีดสุดแล้วมีการลดลงเหลือเป็นหน่วยแรงคงค้าง (T_c)

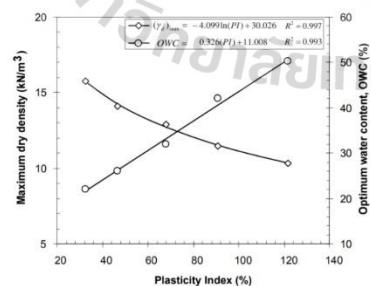


รูปที่ 4 ความเป็นพลาสติกของดินเหนียวบวมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)

ผลการทดสอบการบดอัด ดังรูปที่ 5 ชี้ให้เห็นว่าดินที่มีดินเหนียว บวมตัวเจือปนอยู่เพิ่มขึ้นในตัวอย่าง ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง และมีปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพลาสติก, ความหนาแน่นแห้งสูงสุด, และปริมาณน้ำเหมาะสมจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 ทำให้ทราบความเป็นพลาสติกของดิน เมื่อดินมีค่าดัชนีพลาสติกสูงขึ้น

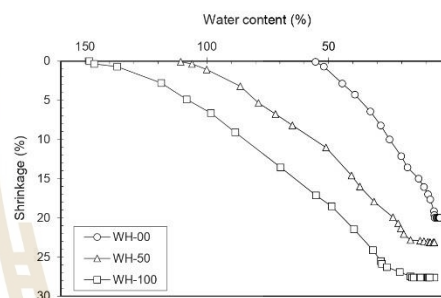


รูปที่ 5 การบดอัดดินเหนียวบวมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพลาสติก, ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณน้ำเหมาะสมของดินเหนียวที่มีดินเหนียวบวมตัวผสม (พรพจน์ และคณะ, 2550)

รูปที่ 7 เป็นผลการทดสอบการหดตัวของดินที่มีดินเหนียวบวมตัวปนร้อยละ 0, 50 และ 100 เห็นได้ว่าตัวอย่างดินเหนียวบวมตัวมีการหดตัวสูงถึงร้อยละ 28 โดยปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นใกล้เคียงกับขีดจำกัดเหลวที่ 170.50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินจากแหล่งดินที่ชุดขึ้นมา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดของดินเหนียวกับ ปริมาณน้ำในดิน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินจากแหล่งดิน

Item	Red clay	White clay
Specific gravity	2.70	2.71
Total Unit weight (kN/m ³)	19.8	19.0
Liquid Limit (%)	61.8	170.5
Plasticity index (%)	32.7	121.7
Activity	0.81	1.47
Pinhole test (ASTM D 4647)	D1	No test
Percent dispersion (ASTM D 4221 90)	54.5	No test

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมา เห็นได้ว่าดินเหนียวบวมตัวที่พบในธรรมชาตินี้ หากนำไปใช้เป็นวัสดุถมอาจก่อให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขณะใช้งานได้ และปัญหาหลัก อีกประการหนึ่งคือการสูญเสียกำลังต้านทาน แรงเสียดทานผิวเนื่องจากการหด จนทำให้ดินไม่สัมผัสผิวเสาเข็มในกรณีที่มีดินเหนียว จึงดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาถึงแรงต้านทานผิวของเสาเข็มโดยมีรายละเอียดวิธีการวิจัยและผลการวิจัยต่อไป

3. วิธีวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

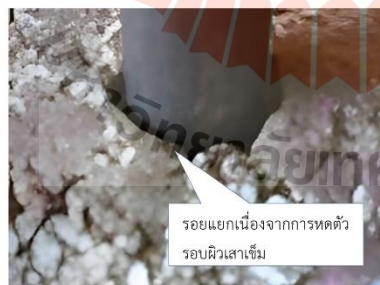
การทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ฝังในดินเหนียวบวมตัวผสมกับดินเหนียวกระจายตัว ใช้ส่วนผสมดินที่แปรผันดินเหนียวบวมตัว 3 ชุด โดยผสมดินเหนียวบวมตัวเข้ากับดินเหนียวกระจายตัวด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก แสดงเป็นสัญลักษณ์ WH-00, WH-50 และ WH-100 ตามลำดับ และใช้ตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนเพื่อใช้เปรียบเทียบแรงเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ

ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_r กับปริมาณน้ำในตัวอย่าง

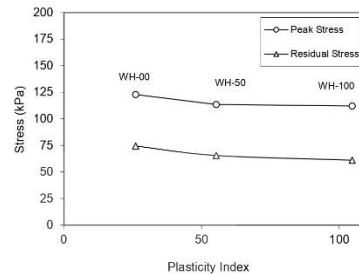
ส่วนผสม	สมการความสัมพันธ์	R^2
WH-00	$\tau_r = 1.16w + 46.10$ (4)	0.95
WH-50	$\tau_r = 1.80w + 8.49$ (5)	0.96
WH-100	$\tau_r = 1.08w + 5.10$ (6)	0.99

จากตารางที่ 2 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_r กับปริมาณน้ำในตัวอย่าง และตารางที่ 3 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_r และจำแนกสมการตามปริมาณดินบวมตัวผสมในตัวอย่าง โดยหลักการคือปริมาณน้ำในดินที่ลดลงทำให้ดินหดตัว จึงมีแรงเสียดทานสูงสุดลดลงสำหรับการนำไปใช้ออกแบบเมื่อสำรวจดินถมที่ใช้ในการก่อสร้างพบว่าดินเหนียวบวมตัวผสมอยู่ สามารถประมาณค่าแรงเสียดทานผิวเสาเข็มที่ลดลงเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวบวมตัวได้ โดยออกแบบเสาเข็มให้มีกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น โดยคิดเผื่อการสูญเสียค่าแรงเสียดทานผิวเสาเข็มที่ได้จากสมการ โดยอิทธิพลของดินเหนียวบวมตัวเพื่อเพิ่มความปลอดภัยต่องานก่อสร้างในอนาคตได้

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในเสาเข็มและปริมาณน้ำในดิน เห็นได้ว่าแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มลดลงเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งการลดลงของน้ำในดินนี้เกิดขึ้นเนื่องจากภาระของน้ำบริเวณรอบเสาเข็ม และทำให้ดินตามแนวเส้นรอบวงของเสาเข็มหดตัว การหดตัวของดินนี้ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินลดลง และเมื่อเกิดช่องว่างระหว่างเสาเข็มกับ การระเหยจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากรอยแยกเนื่องจากการหดตัวทำให้เกิดพื้นที่ระเหยเพิ่มขึ้น รูปที่ 16 เป็นภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบที่มีการระเหยของน้ำจนกระทั่งดินรอบเสาเข็มหดตัว ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับดินลดลง



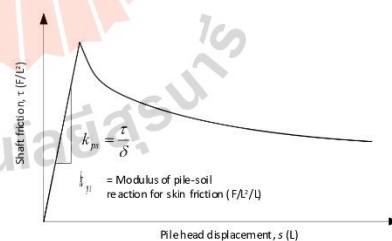
รูปที่ 16 รอยแยกระหว่างดินกับเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างดิน



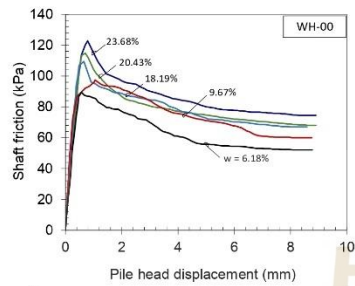
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับดัชนีพลาสติก

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างสูงสุดของตัวอย่างทั้ง 3 สัดส่วนมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ดังรูปที่ 17 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและ กำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับดัชนีพลาสติก เมื่อมีดินเหนียวบวมตัวเป็นส่วนผสมค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงตามลำดับ เห็นได้ว่า กำลังรับแรงเฉือนแปรผกผันกับปริมาณดินบวมตัวที่มีในส่วนผสมที่ 50 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดไม่ขึ้นกับปริมาณดินบวมตัวที่มีในส่วนผสม สำหรับกำลังรับแรงเฉือนคงค้างนั้นแปรผกผันกับปริมาณดินเหนียวบวมตัวที่มีในส่วนผสม

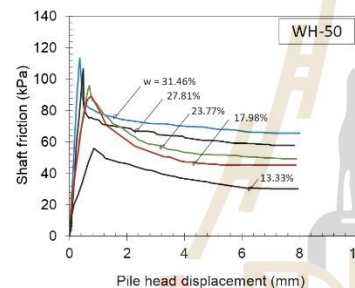
จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงจนถึงจุดที่มีหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความชันของผลการทดสอบเป็นอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ในที่นี้เรียกว่า Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิว, k_{ps} ดังรูปที่ 18 จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง k_{ps} กับปริมาณน้ำในดินของแต่ละอัตราส่วนผสมได้ดังรูปที่ 19



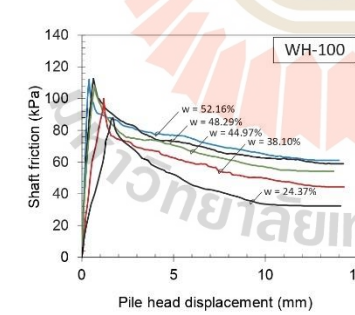
รูปที่ 18 การหาค่า Modulus of pile soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิวจากความสัมพันธ์ส่วนที่เป็นเส้นตรงจนถึงจุดที่มีหน่วยแรงสูงสุด



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่แปรผันปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน (ส่วนผสมแบบ WH-00)

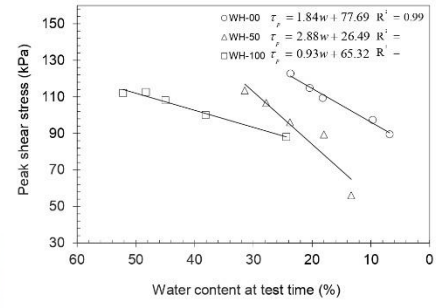


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่แปรผันปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน (ส่วนผสมแบบ WH-50)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่แปรผันปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน (ส่วนผสมแบบ WH-100)

จากผลการทดสอบเมื่อนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในดินของแต่ละอัตราส่วนผสมพบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันเชิงเส้นโดย τ_p มีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง ดังรูปที่ 14 และสรุปเป็นสมการ (1) ถึง (3) ในตารางที่ 2



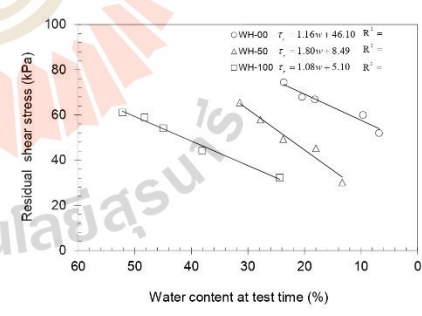
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 2 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในตัวอย่าง

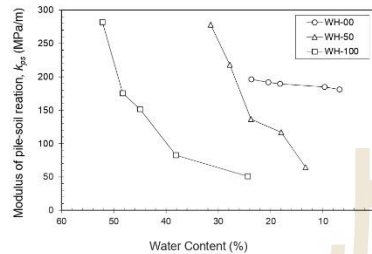
ส่วนผสม	สมการความสัมพันธ์	R^2
WH-00	$\tau_p = 1.84w + 77.69$ (1)	0.99
WH-50	$\tau_p = 2.88w + 26.49$ (2)	0.89
WH-100	$\tau_p = 0.93w + 65.36$ (3)	0.97

ส่วนในกรณีของ τ_r กับปริมาณน้ำในดินก็มีความสัมพันธ์ในลักษณะ

คล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่าง τ_p กับปริมาณน้ำในดินดังรูปที่ 15 และสรุปเป็นสมการ (4) ถึง (6) ในตารางที่ 3



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนคงค้างกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิวกับปริมาณน้ำในตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 19 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง k_{ps} กับปริมาณน้ำในดิน พบว่า k_{ps} แปรผกผันตรงกับปริมาณน้ำในดิน โดยเฉพาะกับตัวอย่างที่มีดินเหนียวบวมตัวเป็นส่วนผสมที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราส่วน WH-100 และ WH-50 มีค่าอยู่ในช่วง 50.82 ถึง 281.88 MPa/m และ 64.61 ถึง 278.02 MPa/m ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ WH-00 อยู่ในช่วง 180.90 ถึง 196.13 MPa/m ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของความชื้นในตัวอย่างที่มีดินเหนียวบวมตัวผสมตั้งแต่ 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์มีอิทธิพลต่อการลดลงของ k_{ps} อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นหากจะใช้ดินเหนียวที่มีส่วนผสมของดินเหนียวบวมตัวเจือปนจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการหดตัวของดินอันจะทำให้ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็มลดลง โดยเฉพาะการใช้เสาเข็มสั้นในพื้นที่ซึ่งความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น ซึ่งก็มีโอกาสที่เสาเข็มจะฝังอยู่ในชั้นดินที่มีส่วนประกอบเป็นดินเหนียวบวมตัวได้

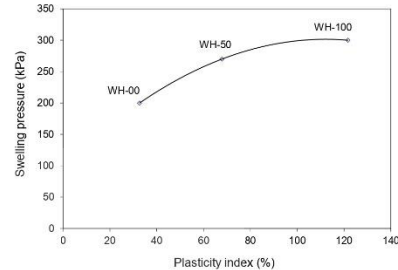
เพื่อพัฒนาผลที่ได้จากงานวิจัยเพื่อใช้ในการออกแบบเสาเข็ม จึงได้ทำการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะระหว่างตัวอย่างดินบวมตัวกับเสาเข็มเหล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ตัวแปรเป็น α_{ss} ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$\alpha_{ss} = \frac{\tau_p}{S_u} \quad (7)$$

โดยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ S_u ในงานวิจัยนี้ได้จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสมดังตารางที่ 4

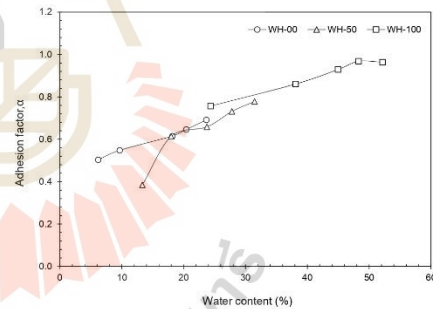
ตารางที่ 4 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม

Sample	S_u (t/m ²)
WH - 00	17.77
WH - 50	14.58
WH - 100	11.63



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเนื่องจากการบวมตัวของดินเหนียวบวมตัวในงานวิจัยนี้

เมื่อวิเคราะห์โดยพิจารณาจากผลการทดสอบแรงดันเนื่องจากการบวมตัว (Swelling Pressure) แสดงผลการทดสอบเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันการบวมตัวต่อสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวบวมตัว ดังรูปที่ 20 สามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวบวมตัวที่พบเป็นดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกสูงที่มีค่าแรงดันการบวมตัวอยู่ระหว่าง 200-300 kPa ซึ่งระดับการบวมตัวอยู่ในระดับสูงมาก Very High เมื่อเปรียบเทียบกับจากการประเมินดินที่มีศักยภาพในการบวมตัว Holtz and Gibbs (1956)



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor (α) กับปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน

จากการทดสอบกำลังแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength (UCS) ได้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Undrained shear strength, S_u) ดังแสดงในตารางที่ 4 ปริมาณดินเหนียวบวมตัวที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงของดินลดลงตามลำดับ บ่งชี้ให้เห็นว่าดินเหนียวบวมตัวมีผลต่อกำลังต้านทานแรงที่ลดลง จากการทดสอบหน่วยแรงเสียดทานผิวสูงสุดของการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็ก และการทดสอบ UCS แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor (α) ต่อปริมาณน้ำในตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 21 พบว่า α แปรผันตามปริมาณความชื้นเนื่องจากการวิจัยนี้เพื่อหาการสูญเสียแรงเสียดทานจากการหดตัวของดินเหนียวบวมตัว ดังนั้น α ที่ได้จากการทดสอบแสดงผลการแปรผันต่อการ

เปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน โดยปริมาณน้ำเริ่มต้นได้จาก Optimum water content (OWC) เท่านั้น ซึ่งการติดตั้งเสาเข็ม ปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นมีค่าแตกต่างจากการทดสอบที่ OWC

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปเป็นดังนี้

1. ผลการทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มเมื่อปล่อยให้ตัวอย่างทดสอบแห้งในสภาวะแวดล้อมปกติพบว่า แรงดันที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินซึ่งเกิดจากการหดตัวของดินสังเกตได้จากดินโดยรอบเสาเข็มแยกตัวจากผิวเสาเข็มทำให้ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็มลดลงจึงส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลดลง ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเนื่องจากปริมาณน้ำในดินลดลงไว้ด้วย

2. ในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นค่า Modulus of pile-soil reaction ของแรงเสียดทาน, K_{ps} พบว่า K_{ps} ของเสาเข็มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อดินมีดินเหนียวรวมตัวปนอยู่เกินกว่าร้อยละ 50 ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอาจเป็นไปได้ยากที่จะระบุปริมาณของดินเหนียวรวมตัว งานวิจัยนี้จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพลาสติกกับปริมาณของดินเหนียวรวมตัวเป็นตัวชี้วัดถึงระดับของดินเหนียวรวมตัวที่อยู่ในดิน

3. ในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor, α กับปริมาณน้ำในดินสำหรับใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวรวมตัวซึ่งอยู่ในพื้นที่ซึ่งปริมาณน้ำในดินมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณนายอิทธิเดช มุขวันโน, คุณพนม เนียมเพราษ, คุณวรพรรณ ปรารบภัย และ คุณสุวิษา สมบุญ ที่ให้การช่วยเหลือในทำการทดสอบเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Standards for Testing Materials (2014) Standard Test methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM D 698 - 12.
- [2] American Standards for Testing Materials (2003) Standard Test methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, ASTM D 4546.
- [3] Al-Rawas A. A. and Qamaruddin M. (1998), A Case Study on Expansive Soils and Rocks of Al-Khod in Northern Oman, Proceedings of the 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri.

- [4] Bowles, J.E. (1996). *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.123-132.
- [5] B. Soundara and R.G. Robinson (2012). Swelling Pressure and Uplift of Piles in Expansive Soils, Proceedings of the First Asian Workshop on Physical Modelling in Geotechnics.
- [6] Chen F.H. (1988) Foundations on Expansive Soils (2nd Edition), Elsevier Science Publications, New York.
- [7] Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering (8th edition), Cengage Learning, Boston, MA, USA.
- [8] Eide, O., Aas, G., and Josang, T. (1972). "Special Application of Cast-in-Place Slurry Trench Walls for Tunnel in Soft Clay in Oslo. Proc. 5 ECSMFE, Madrid 1972, Vol1, pp 485-498.
- [9] พรพจน์ และคณะ (2549) การวิบัติของคันดินอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ในชั้นดินเหนียวกระจายตัวแทรกด้วยชั้นดินเหนียวรวมตัว, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 จ.ภูเก็ต
- [10] พรพจน์ และคณะ (2550) ผลของการบวมตัวและหัวตัวของดินเหนียวรวมตัวบดอัดต่อฐานรากคันดิน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 จ. พิษณุโลก
- [11] พรพจน์ ดันเส็ง และพลอนันต์ สดโคกกรวด (2552) อิทธิพลของปูนขาวต่อการหดตัวของดินเหนียวรวมตัวที่พบในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [12] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์, มนตรี จินากุลวิวัฒน์, เมฆ เมฆขาว และเอกพงษ์ เน้นอุตร (2558) ผลกระทบของดินบวมตัวต่อความปลอดภัยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 20, จ. ชลบุรี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกาญจนา หิรัญวัฒน์ เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 18 กรกฎาคม 2540 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสุนารีวิทยา และระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า นครราชสีมา ในปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษา กับ บริษัท ศุภาลย์ จำกัด (มหาชน) เป็นระยะเวลา 4 เดือน และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพ.ศ. 2563 และมีผลงานเผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (The 28th National Convention on Civil Engineering, GTE44) ระหว่างวันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมภูเก็ต เกรซแลนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต จำนวน 8 หน้า