

การสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียววมตัว Skin friction degradation due to shrinkage of expansive soil

กาญจนา หิริภูวัฒน์¹, พรพจน์ ต้นเส็ง²

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียววมตัวธรรมชาติ ที่พบใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การวิจัยได้ทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ฝังในดินเหนียววมตัวผสมกับดินเหนียวกระจายตัว ที่พบเป็นปริมาณมากในบริเวณเดียวกัน การทดสอบใช้ดินบดอัดในแบบทดสอบบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน ดินวมตัวที่มีอัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 50 และ 100 และใช้ท่อนเหล็กกลมขนาด 16 มิลลิเมตร กดลงในดินที่บดอัด โดยออกแบบให้แรงต้านต่อการกดเกิดเฉพาะแรงเสียดทานผิวเท่านั้น จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างดินแห้งในสภาวะแวดล้อมปกติ แล้วทำการทดสอบแรงต้านทานต่อการกดของแท่งเหล็กที่ฝังในดิน จากผลการทดสอบพบว่า แรงต้านที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน ซึ่งเกิดจากการหดตัวของดิน จึงได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นค่า Modulus of pile-soil reaction ของแรงเสียดทาน (k_{ps}) พบว่า k_{ps} แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินสำหรับดินที่มีดินเหนียววมตัวปนอยู่เกินกว่าร้อยละ 50 และในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor (α) กับปริมาณน้ำในดินซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเสาเข็มในดินที่มีดินเหนียววมตัวเป็นองค์ประกอบได้

คำสำคัญ: ดินเหนียววมตัว, มอนท์มอริลโลไนท์, 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.

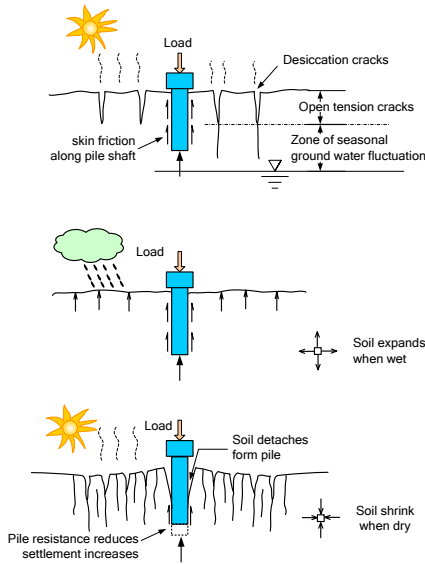
Keywords: Expansive soil, Montmorillonite, Skin friction, Shrinkage, Piles

1. บทนำ

ปัญหาดินเหนียววมตัวในประเทศไทยยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายในงานวิศวกรรมฐานรากมากนัก เนื่องจากมีกรณีศึกษาไม่มากนักในบริเวณตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับการบวมตัวของดินในบางพื้นที่ โดยดินที่พบเป็นดินเหนียวซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดินเหนียวแห้งที่พบนี้ที่มีความลึกประมาณ 5 เมตร โดยปัญหาที่พบเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ การบวมตัวและหดตัวของดินจากการนำดินจากแหล่งดินมาถมและ บดอัดปรับพื้นที่เพื่อก่อสร้างอาคาร และทำการตอกเสาเข็ม ซึ่งดินบริเวณนี้เป็นดินเหนียวแข็งมากจนตอกเสาเข็มลงได้ยาก ดังนั้นจึงตอกเสาเข็มได้ไม่ยาวมากเมื่อใช้งานสักระยะหนึ่งจะพบปัญหาการบวมตัวของดิน เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น และดินหดตัวเมื่อความชื้นในดินลดลง ความชื้นในดินบริเวณนี้แปรผันอย่างมากตามฤดูกาล กล่าวคือเมื่อถึงฤดูฝนดินจะมีความชื้นสูง และเมื่อถึงฤดูแล้งดินจะมีความชื้นลดลง

ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเสาเข็มสั้นที่ฝังในชั้นดินโดยรูปที่ 1 แสดงกลไกการบวมและหดตัวของดิน ที่ส่งผลต่อแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม เห็นได้ว่าเมื่อก่อสร้างเสาเข็มเสร็จในขณะที่ดินยังมีความชื้นในดินอยู่บ้าง แรงต้านแรงกระทำจากโครงสร้างเกิดจากแรงเสียดทานผิวและแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม เมื่อน้ำในดินเพิ่มขึ้นดินพองตัวออกและจับกับ

เสาเข็มแน่น ถึงแม้ว่าน้ำในดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนลดลง แต่ดินก็ยังสัมพันธ์กับเสาเข็มอยู่ และเมื่อน้ำในดินลดลง เนื่องจากการระเหยตามฤดูกาล ทำให้ดินหดตัว การหดตัวทำให้ดินแยกตัวออกจากเสาเข็ม ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานลดลง ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยรวมลดลงด้วย



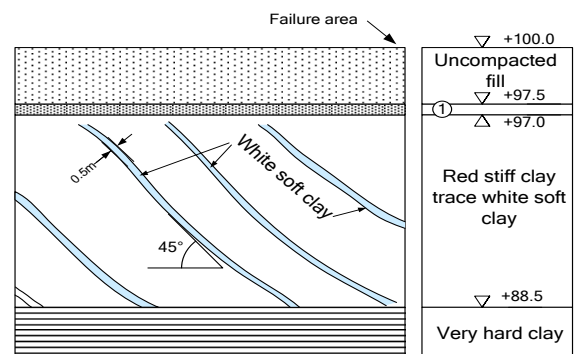
รูปที่ 1 แนวคิดด้านกำลังรับแรงเสียดทานที่ลดลง

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวววมตัว โดยดินเหนียวววมตัวที่นำมาศึกษานั้นเป็นดินเหนียวววมตัวที่พบในธรรมชาติที่พบในตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา การศึกษาจะเป็นการศึกษาในแบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วน เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเสาเข็มเนื่องจากการหดตัวของดินเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลงเนื่องจากการระเหย และเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มลดลง

2. ข้อมูลโครงสร้างสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดิน

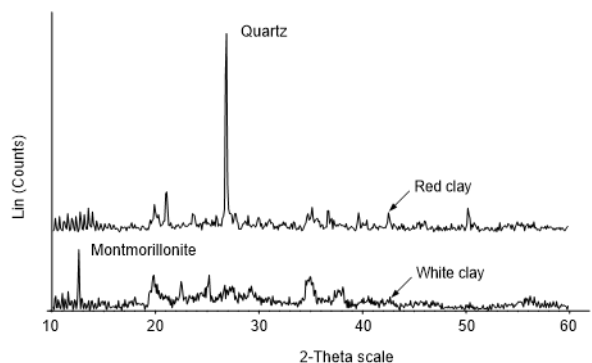
จากปัญหาดินเหนียวววมตัวที่พบได้มีการศึกษาลักษณะชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติเชิงกล, และพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดไว้ โดย พรพจน์ และคณะ (2550) ได้รายงานถึงชั้นดินเหนียวววมตัวที่พบตามธรรมชาติ หลังจากที่มีการขุดอ่างเก็บน้ำลึก 9 เมตร แล้วเกิด การวิบัติ จากลักษณะของชั้นดินดังรูปที่ 2 พบชั้นดินสีขาวที่หนาประมาณ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

ขึ้นมาได้นำไปบดอัดเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุถม โดยสมมุติว่าดินเหนียวแข็งและดินเหนียวววมตัวอาจมีการผสมกัน ในขั้นตอนการขุดดิน จึงได้ทดลองผสมดินเหนียวววมตัวสีขาวที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ แทนเป็น WH-00, WH-25, WH-50, WH-75 และ WH-100 ตามลำดับ เพื่อจำลองการเจือปน ดินเหนียวแข็งด้วยดินเหนียวววมตัว การทดสอบความเป็นพลาสติกของดินชี้ให้เห็นว่า ค่าดัชนีพลาสติกของดินเหนียวววมตัวเพิ่มขึ้นตามบริเวณ ดินเหนียวววมตัวที่มีในส่วนผสม ดังรูปที่ 4 เมื่อมีดินเหนียวววมตัวผสมเกินกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงมาก (Extremely high plasticity) โดยการทำจำแนกความเป็นพลาสติกที่สูงมากนี้ อ้างอิงจาก Head (1980)

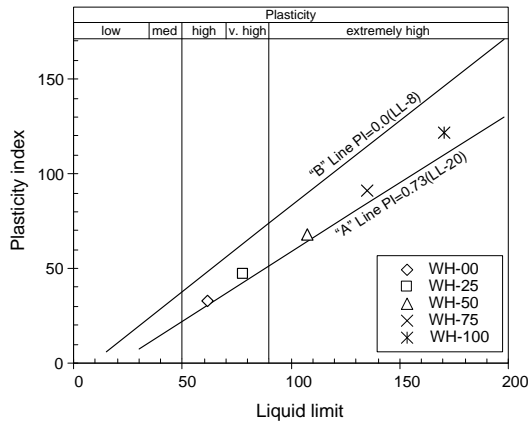


รูปที่ 2 รูปตัดชั้นดินจากการขุดอ่างเก็บน้ำลึก 9 เมตร (พรพจน์ และคณะ, 2550)

รูปที่ 3 ผลการทดสอบ Xray diffraction (พรพจน์ และคณะ, 2550)

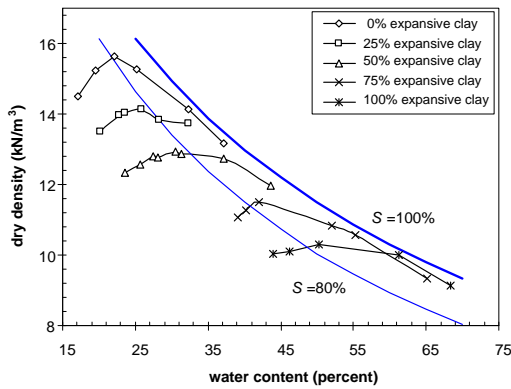


รูปที่ 3 ผลการทดสอบ Xray diffraction (พรพจน์ และคณะ, 2550)

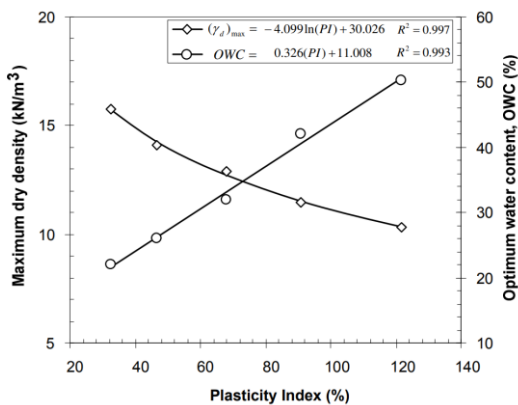


รูปที่ 4 ความเป็นพลาสติกของดินเหนียววมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)

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

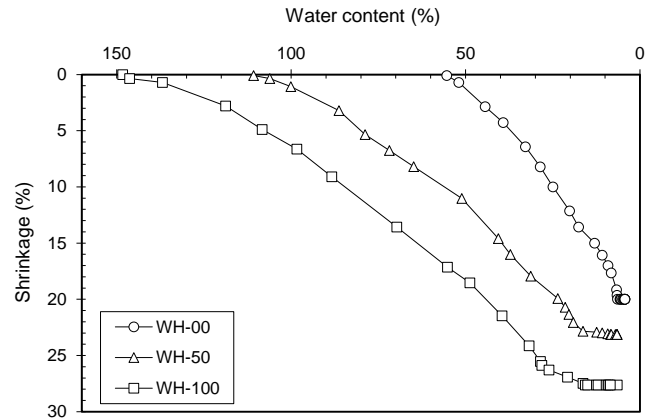


รูปที่ 5 การบดอัดดินเหนียววมตัว (พรพจน์ และคณะ, 2550)



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

รูปที่ 7 เป็นผลการทดสอบการหดตัวของดินที่มีดินเหนียววมตัวปนร้อยละ 0, 50 และ 100 เห็นได้ว่าตัวอย่างดินเหนียววมตัวมีการหดตัวสูงถึงร้อยละ 28 โดยปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นใกล้เคียงกับขีดจำกัดเหลวที่ 170.50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินจากแหล่งดินที่ขุดขึ้นมา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของดินเหนียวกับ 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

จากงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมา เห็นได้ว่าดินเหนียววมตัวที่พบในธรรมชาตินี้ หากนำไปใช้เป็นวัสดุถมอาจก่อให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขณะใช้งานได้ และปัญหาหลัก อีกประการหนึ่งคือการสูญเสียกำลังต้านทาน แรงเสียดทานผิวเนื่องจากการหด จนทำให้ดินไม่สัมผัสผิวเสาเข็มในกรณีที่มีดินเหนียว จึงดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาถึงแรงต้านทานผิวของเสาเข็มโดยมีรายละเอียดวิธีการวิจัยและผลการวิจัยต่อไป

3. วิธีวิจัย

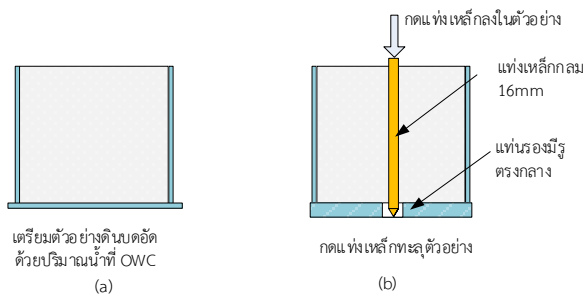
3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

การทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ฝังในดินเหนียววมตัวผสมกับดินเหนียวกระจายตัว ใช้ส่วนผสมดินที่แปรผันดินเหนียววมตัว 3 ชุด โดยผสมดินเหนียววมตัวเข้ากับดินเหนียวกระจายตัวด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก แสดงเป็นสัญลักษณ์ WH-00, WH-50 และ WH-100 ตามลำดับ และใช้ตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนเพื่อใช้เปรียบเทียบแรงเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ

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

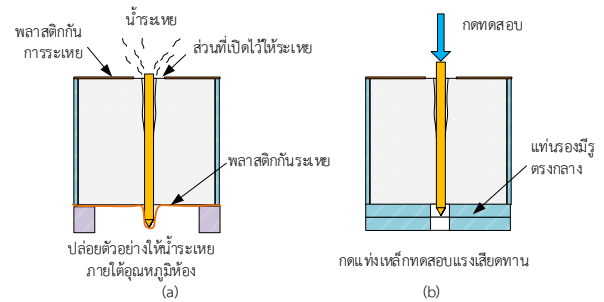
หลังการเตรียมตัวอย่างดินให้ใช้วิธีการบดอัดดินด้วยพลังงานบดอัดแบบมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ดังรูปที่ 8(a) ในการบดอัดใช้ปริมาณน้ำ เท่ากับปริมาณน้ำในดินที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดตามที่ได้มีการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินไว้ก่อนหน้านี้แล้ว หลังจากบดอัดดินแล้วกดแท่งเหล็กปลายแหลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 170 มิลลิเมตร ลงตรงจุดศูนย์กลางของหน้าตัดจนทะลุอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างเพื่อไม่ต้องพิจารณาผลเนื่องจากแรงดันที่ปลายเข็ม ดังรูปที่ 8(b) หลังจากนั้นหุ้มรอบตัวอย่างเพื่อป้องกันการระเหยด้วยพลาสติก ในการปล่อยให้ระเหยจะใช้วิธีเจาะช่องรอบแท่งเหล็กเพื่อจำกัดบริเวณที่เกิดการระเหยของน้ำไว้เฉพาะบริเวณที่ติดกับเสาเข็ม ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการหดตัวที่ทำให้แรงเสียดทานผิวลดลง



รูปที่ 8 (a) การเตรียมตัวอย่างดินบดอัด และ (b) การกดแท่งเหล็กกลวงกลางตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงเสียดทานผิว

3.3 การทดสอบแรงเสียดทานของเสาเข็ม

การทดสอบแรงเสียดทานของเสาเข็มได้ทดสอบในกรณีตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำในดินร้อยละ 100, 90, 80, 40 และ 30 ของปริมาณน้ำในดินเริ่มต้น ซึ่งน้ำในดินที่ลดลงเกิดจากการระเหยผ่านช่องที่เจาะไว้บริเวณรอบแท่งเหล็กที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 9(a) เมื่อน้ำในดินระเหยจนได้ปริมาณน้ำในดินตามต้องการซึ่งตรวจสอบได้จากการตรวจสอบน้ำหนักของตัวอย่างนำดินตัวอย่างมาทดสอบ โดยการให้แรงกดกระทำต่อปลายแท่งเหล็กโดยใช้อัตรากด 1 มิลลิเมตรต่อนาทีโดยใช้เครื่องกดทดสอบดังรูปที่ 10 การกดใช้แผ่นเหล็กรูปโดนัทรองเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันที่ปลายเข็ม ในการทดสอบกดจนกระทั่งแท่งเหล็กเคลื่อนตัวเกินกว่า 10 มิลลิเมตรซึ่งผ่านจุดที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดขึ้นในตัวอย่าง



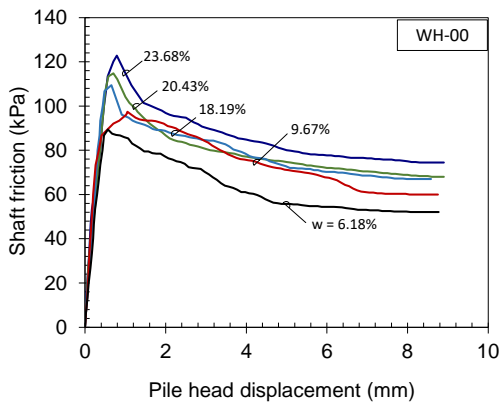
รูปที่ 9 (a) การปล่อยให้ น้ำในตัวอย่างดินระเหยผ่านรูระเหยรอบแท่งเหล็ก (b) การทดสอบกดแท่งเหล็กเพื่อหาแรงเสียดทานผิว



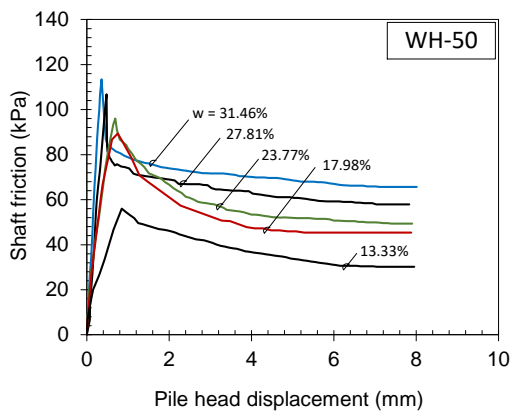
รูปที่ 10 ภาพถ่ายการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ผิวแท่งเหล็กในตัวอย่างที่ปล่อยให้ระเหยในอุณหภูมิห้อง

4. ผลการวิจัย

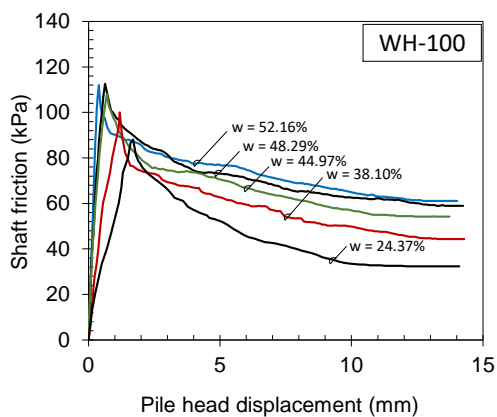
ผลการทดสอบแรงต้านทานต่อการกดของแท่งเหล็กที่ฝังในดินจากรูปที่ 11 ถึง 13 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่มีปริมาณน้ำในดินต่าง ๆ สำหรับส่วนผสม WH-00 ค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวสูงสุด (τ_p) มีค่าระหว่าง 90-124 kPa ตัวอย่างชนิดที่มีดินเหนียวบวมตัวเป็นส่วนผสม WH-50 และ WH-100 มีค่าระหว่าง 56-112 kPa และ 84-112 kPa ตามลำดับ เห็นได้ว่าการทดสอบในทุกความชื้นในดิน ก่อนถึง τ_p การพัฒนาหน่วยแรงเสียดทานมีลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อหน่วยแรงเสียดทานผิวพัฒนาจนถึงขีดสุดแล้วมีการลดลงเหลือเป็นหน่วยแรงคงค้าง (τ_r)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่แปรผันปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน (ส่วนผสมแบบ WH-00)

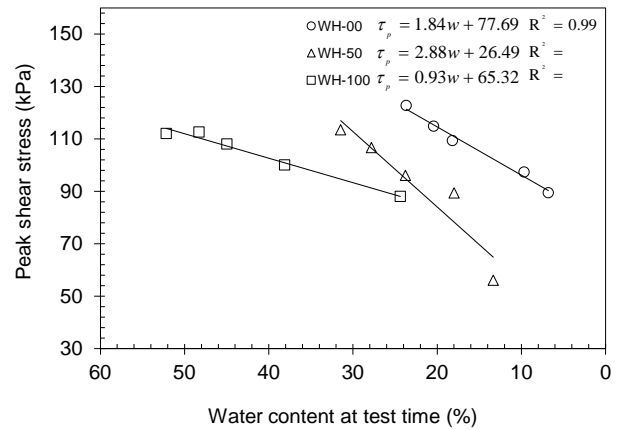


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่แปรผันปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน (ส่วนผสมแบบ WH-50)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับการเคลื่อนตัวของแท่งเหล็กที่แปรผันปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน (ส่วนผสมแบบ WH-100)

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



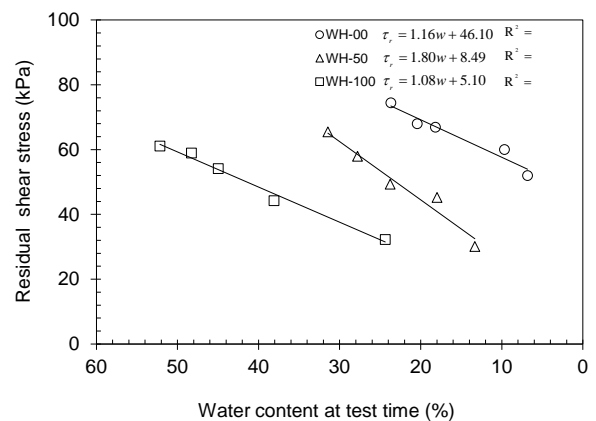
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิห้อง

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	$\tau_p = 0.93w + 65.32$ (3)	0.97

ส่วนในกรณีของ τ_r กับปริมาณน้ำในดินก็มีความสัมพันธ์ในลักษณะ

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



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนคงค้างกับปริมาณน้ำในดินหลังจากปล่อยให้ระเหยออกจากดินที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ_r กับปริมาณน้ำในตัวอย่าง

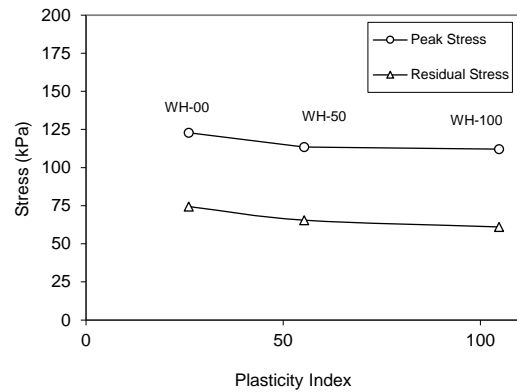
ส่วนผสม	สมการความสัมพันธ์	R^2
WH-00	$\tau_r = 1.16w + 46.10$ (4)	0.95
WH-50	$\tau_r = 1.80w + 8.49$ (5)	0.96
WH-100	$\tau_r = 1.08w + 5.10$ (6)	0.99

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

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในเสาเข็มและปริมาณน้ำในดิน เห็นได้ว่าแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มลดลงเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งการลดลงของน้ำในดินนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำบริเวณรอบเสาเข็ม และทำให้ดินตามแนวเส้นรอบวงของเสาเข็มหดตัว การหดตัวของดินนี้ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินลดลง และเมื่อเกิดช่องว่างระหว่างเสาเข็มกับ การระเหยจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากรอยแยกเนื่องจากการหดตัวทำให้เกิดพื้นที่ระเหยเพิ่มขึ้น รูปที่ 16 เป็นภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบที่มีการระเหยของน้ำจนกระทั่งดินรอบเสาเข็มหดตัว ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับดินลดลง



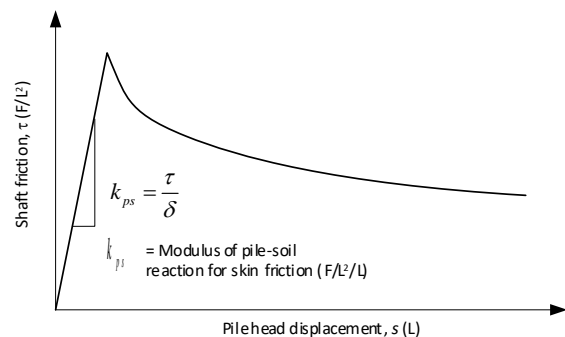
รูปที่ 16 รอยแยกระหว่างดินกับแท่งเหล็กเนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างดิน



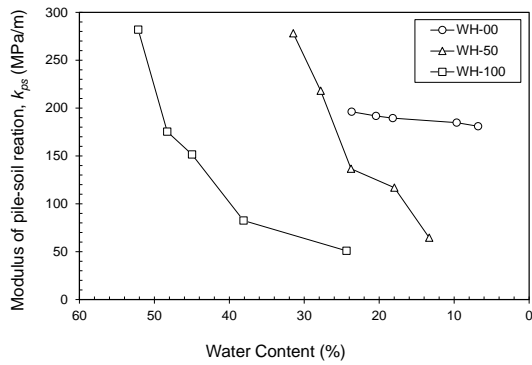
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับดัชนีพลาสติก

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

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



รูปที่ 18 การหาค่า Modulus of pile-soil reaction สำหรับแรงเสียดทานผิวจากความสัมพันธ์ส่วนที่เป็นเส้นตรงก่อนถึงจุดที่มีหน่วยแรงสูงสุด



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 ดังนั้นหากจะใช้ดินเหนียวที่มีส่วนผสมของดินเหนียวบวมตัวเจือปนจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการหดตัวของดินอันจะทำให้มีสัมประสิทธิ์ระหว่างดินกับเสาเข็มลดลง โดยเฉพาะการใช้เสาเข็มสั้นในพื้นที่ซึ่งความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น ซึ่งก็มีโอกาสที่เสาเข็มจะฝังอยู่ในชั้นดินที่มีส่วนประกอบเป็นดินเหนียวบวมตัวได้

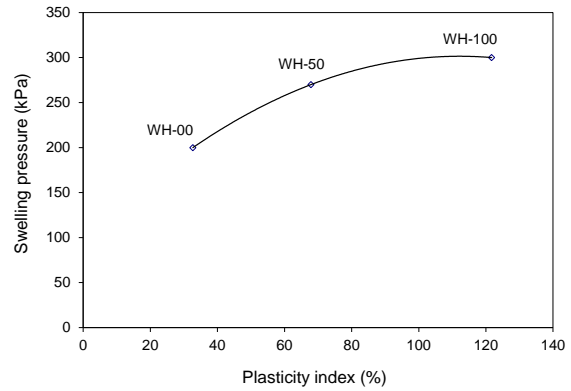
เพื่อพัฒนาผลที่ได้จากงานวิจัยเพื่อใช้ในการออกแบบเสาเข็ม จึงได้ทำการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะระหว่างตัวอย่างดินบวมตัวกับเสาเข็มเหล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ตัวแปรเป็น α_{ss} ซึ่งคำนวณจากสมการ

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

โดยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ S_u ในงานวิจัยนี้ได้จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสมดังตารางที่ 4

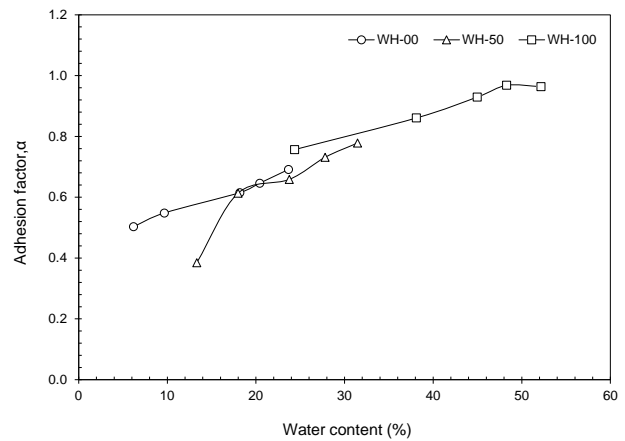
ตารางที่ 4 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม

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



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเนื่องจากการบวมตัวกับดัชนีพลาสติกของดินเหนียวบวมตัวในงานวิจัยนี้

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 แปรผันตามปริมาณความชื้นเนื่องจากงานวิจัยนี้เพื่อทำการสูญเสียแรงเสียดทานจากการหดตัวของดินเหนียวบวมตัว ดังนั้น α ที่ได้จากการทดสอบแสดงผลการแปรผันต่อการ

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

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปเป็นดังนี้

1. ผลการทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มเมื่อปล่อยให้ตัวอย่างทดสอบแห้งในสภาวะแวดล้อมปกติพบว่า แรงต้านที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินซึ่งเกิดจากการหดตัวของดินสังเกตได้จากดินโดยรอบเสาเข็มแยกตัวจากผิวเสาเข็มทำให้ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็มลดลงจึงส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลดลง ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงการสูญเสียแรงเสียดทานผิวเนื่องจากปริมาณน้ำในดินลดลงไว้ด้วย

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

3. ในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor, α กับปริมาณน้ำในดินสำหรับใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวรวมตัวซึ่งอยู่ในพื้นที่ซึ่งปริมาณน้ำในดินมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณนายอิทธิเดช มุขวันโน, คุณพนม เนียมเพราะ, คุณวรพรรณ ปราบภัย และ คุณสุวิชชา 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) ผลของการบวมตัวและหัวตัวของดินเหนียวรวมตัวบดอัดต่อฐานรากตื้น, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 จ. พิษณุโลก
- [11] พรพจน์ ต้นเส็ง และพลอนันต์ สดโคกกรวด (2552) อิทธิพลของปูนขาวต่อการหดตัวของดินเหนียวรวมตัวที่พบในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [12] สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, มนตรี จินากุลวิวัฒน์, เมฆ เมฆขาว และเอกพงษ์ แน่นอุดร (2558) ผลกระทบของดินบวมตัวต่อความปลอดภัยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 20, จ. ชลบุรี