

การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการยุบตัวของ
คาน้ำของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์
แบบไม่หยั่งลึกกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์

Laboratory Model Testing for Investigating the Consolidation Behavior of
Soft Clayey Deposit Improved by a Floating Soil-Cement Column with a
Cement Stabilized Slab

สุธี ปิยะพิพัฒน์^{1*} ศุภสิทธิ์ พงศ์วิเศษสิทธิ์²

^{1,2}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Suthee Piyaphipat^{1*} Supasit Pongsivasathit²

^{1,2}Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Corresponding author: Email: suthee.p@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการยุบตัวของคาน้ำ ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ แบบจำลองรูป ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.45 เมตร สูงเท่ากับ 0.8 เมตร ถูกนำเป็นแบบจำลองการทดสอบ ทำ การทดสอบ 4 กรณีศึกษาเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของ แผ่นพื้น ส่วนค่าพารามิเตอร์ได้แก่ อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก และน้ำหนักกระทำ ถูก กำหนดให้คงที่ ดินที่นำมาทำชั้นดินเหนียวเพื่อศึกษาคุณสมบัติได้แก่ ดินเหนียวกรุงเทพ จากผลการทดสอบพบว่า การ เพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ลดค่าการทรุดตัวของชั้นดินอย่างมีนัยสำคัญ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ ระบายน้ำของแผ่นพื้นไม่มีผลต่อคุณสมบัติการยุบตัวของคาน้ำ จากนั้นนำสูตรที่มีอยู่ของ Pongsivasathit และคณะ มา ประยุกต์ใช้กับทั้ง 4 กรณีศึกษาเพื่อหาค่าการทรุดตัวสุดท้าย นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบ พบว่า สูตรดังกล่าวให้ค่าการทรุดตัวเกินกว่าค่าที่วัดได้มากขึ้นเมื่อแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน เสาเข็มดินซีเมนต์ การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลอง

ABSTRACT

This research aims to investigate the consolidation behavior of soft clayey deposit improved by the floating soil cement column with the cement stabilized slab on the ground surface by the laboratory model test. The cylinder mold with 0.45 m in diameter and 0.8 m in height was used for the laboratory model test. Four cases of testing were conducted for investigating the effect of slab thickness and undrained shear strength of slab. The other parameters as the area improvement ratio,

the depth improvement ratio and loading intensity were fixed. Bangkok clay was used as soil sample for making a soft clayey deposit. As results, it can be seen that the increase of slab thickness reduces the consolidation settlement significantly. The undrained shear strength of slab effects on the consolidation behavior slightly. The existing method of Pongsivasathit et al. was applied to 4 cases of laboratory test for estimating the final consolidation settlement. The calculated results were compared with the measured results. Obviously, this method over-predicts gradually the settlement when the slab thickness increases gradually.

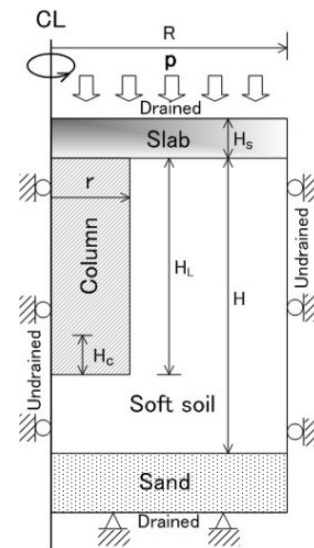
Keyword: Ground improvement, floating soil-cement column, laboratory model test.

1. บทนำ

เทคนิคการผสมปูนซีเมนต์แบบลึก (Deep Mixing Method) เพื่อให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาจับตัวกันกับดินแล้วแข็งตัวเป็นลักษณะของเสาเข็มในชั้นดิน ทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าการทรุดตัวลดลงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงขึ้น ([1], [2]) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ในปัจจุบันมีความพยายามที่จะลดราคาค่าก่อสร้างและลดผลกระทบอันเนื่องจากความยาวเสาเข็มไปรบกวนระดับน้ำใต้ดิน โดยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating Soil-Cement Column) ทั้งแบบที่มีและไม่มีแผ่นพื้นดินผสมซีเมนต์ (Cement Stabilized Slab) บนผิวดินหรือหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ ([3], [7]) การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าการทรุดตัวชั้นปฐมภูมิ แต่เนื่องจากพฤติกรรมการยุบตัวของคาน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้จะมีค่าซับซ้อนมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความยาวแบบปกติ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

JICE [5] ได้เสนอวิธีการคำนวณการทรุดตัวสุดท้ายของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน และวิธีนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น วิธีนี้ค่าการจมสัมพัทธ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (Area improvement ratio, α) เมื่อค่า α เป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (d_c) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่

ที่ถูกปรับปรุง (d_e) โดยค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น แต่วิธีนี้ในทางปฏิบัติพบว่า ค่าการทรุดตัวที่ได้ ยังห่างจากค่าที่ได้จากการวัดในภาคสนามอยู่พอสมควร [3]



รูปที่ 1 แบบจำลองหนึ่งหน่วยสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

Chai et al. [3] ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit cell model) และทำการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วย วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จากนั้นทำการเสนอวิธีการคำนวณค่าการทรุดตัวสุดท้าย โดยวิธีนี้สามารถพิจารณาผลกระทบเนื่องจากค่า α และค่าอัตราส่วนการปรับปรุง

ความลึก (Depth improvement ratio, β) เมื่อค่า β คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของเสาเข็ม (H_L) ไม่รวมความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ กับความลึกของชั้นดินเหนียว (H) สำหรับค่าการทรุดตัว สามารถคำนวณได้จากการแบ่งดินเป็นสองชั้น โดยที่ชั้นบนหรือชั้นที่ถูกปรับปรุง (H_1) มีความหนาเท่ากับ $H-H_c$ แล้วใช้ทฤษฎียึดหยุ่นคำนวณหาการยุบตัวของชั้นดินชั้นนี้ โดยที่ค่า H_c ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นฟังก์ชันของค่า H_L , β และ α ส่วนชั้นล่างหรือชั้นดินที่ถือว่าไม่ได้ถูกปรับปรุง มีความหนาเท่ากับ $H-H_1$ ค่าการทรุดตัวของชั้นนี้ให้คำนวณจากคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวเพียงอย่างเดียว

จากนั้น Chai and Pongsivasathit [4] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา ของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก โดยที่ค่าองศาการยุบอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation) ของระบบนี้ สามารถหาได้จากทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำของดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้น (Double soil-layer consolidation theory) สำหรับวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of permeability, k) และค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume compressibility, m_v) ได้ถูกนำเสนอ แต่วิธีจะให้ค่าการทรุดตัวที่มากเกินไปในกรณีน้ำหนักบรรทุกทุก (Loading intensity, p) น้อยกว่า 50 kPa และจะให้ค่าต่ำเกินไปในกรณีที่ค่า p มากกว่า 150 kPa

Pongsivasathit et al. [6] ได้ทำการศึกษาทดลองภายในระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับดินที่อยู่บริเวณรอบๆ ด้วยการทดลองแบบจำลองในห้องปฏิบัติการควบคู่ไปกับการทำ FEM โดยใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตร (Axisymmetric Unit cell model) อีกครั้ง ในครั้งนี้ทั้งแบบมีและไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์กับกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยค่าอัตราส่วนการปรับปรุงความลึกเดียวกัน ค่าพารามิเตอร์ใหม่สำหรับกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ได้ถูกนำเสนอ ดังนี้

$$\beta' = \frac{H_L + H_s}{H + H_s} \quad (1)$$

เมื่อค่า β' คืออัตราส่วนการปรับปรุงความลึกในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์

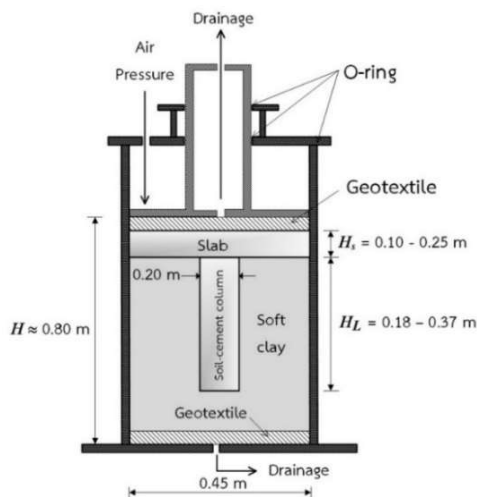
จากนั้น นำผลการศึกษาที่ได้มาปรับปรุงวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของ Chai and Pongsivasathit [4] โดยที่ H_c ถูกปรับปรุงให้เป็นฟังก์ชันของค่า H_L , อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (Area improvement ratio, α), อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก (Depth improvement ratio, β), น้ำหนักที่กระทำ (Loading intensity, p) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, s_u) ของดินเหนียวบริเวณปลายเสาเข็ม

อย่างไรก็ตามการที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์วางบนเสาเข็มนั้น เพื่อช่วยลดความเข้มข้นของหน่วยแรง (Stress concentration, n) ที่กระทำบนเสาเข็ม พบว่าความยึดหยุ่นของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลลงเมื่อมีความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (Slab thickness, H_s) เพิ่มขึ้น ยิ่งความหนาของแผ่นพื้นมากๆ แผ่นพื้นยังมีพฤติกรรมเป็นวัสดุแข็งเกร็ง แต่ในการวิเคราะห์ด้วย FEM ของ Pongsivasathit et al. [6] ได้สมมติให้ค่าความหนาของแผ่นพื้นคงที่เท่ากับ 1 เมตร ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบวัสดุยึดหยุ่น ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ที่มีผลต่อค่า H_s และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้น ($(q_u)_{slab}$) เพื่อหาข้อสรุปในการปรับปรุงวิธีการหาค่าการทรุดตัวกับเวลาของระบบนี้ต่อไป

2. แบบจำลองทดสอบและวัสดุที่ใช้

รูปที่ 2(a) และ 2(b) แสดงรูปแบบจำลองทดสอบและภาพจำลองภายในของแบบจำลอง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.45 เมตร และมีความสูงเท่ากับ 0.8 เมตร ทำจากวัสดุ PVC

ดินที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ถูกเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน มีคุณสมบัติของดินดังแสดงในตารางที่ 1 ในการบรรจุจะค่อยๆ ไล่ดินลงไปโดยระมัดระวังไม่ให้เกิดช่องว่างในระหว่างบรรจุ ส่วนซีเมนต์ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพชั้นดินสำหรับประเทศไทย ใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ทำจากวัสดุประเภท Polypropylene ที่มีความหนาแน่นประมาณ 140 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการช่วยระบายที่บริเวณด้านล่างและด้านบนของแบบจำลองทดสอบ การเร่งอัตราการทรุดตัวใช้ Mini-PVD ที่ทำจาก แผ่นใยสังเคราะห์ม้วนเป็นแท่งประมาณ 3 ชั้นซ้อนกัน มีหน้าตัดประมาณ 30×9 ตารางมิลลิเมตร



(a) ภาพรูปตัดจำลองภายในของแบบจำลอง



(b) แบบจำลองทดสอบ

รูปที่ 2 แบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

สำหรับกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 2 กรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 4 ใช้สำหรับศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้น ส่วนกรณีที่ 3 และ 4 ใช้สำหรับตรวจสอบผลกระทบเนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้น ($(q_u)_{slab}$) จากตารางที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 16.42% และ 25.65 % ของน้ำหนักดินแห้ง มีค่ากำลังรับแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u) เท่ากับ 400 kPa และ 800 kPa ตามลำดับ ซึ่งได้จากผลการทดสอบแรงกดอัดทิศทางเดียวของดินเหนียวกรุงเทพฯ ผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่างๆ

3. ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว

เริ่มจากวางแผ่นใยสังเคราะห์จำนวน 3 แผ่นที่ด้านล่างของแบบจำลองเพื่อเป็นชั้นระบายน้ำ จากนั้นหาจาระบีบางๆ ที่บริเวณผิวด้านในของแบบจำลอง เพื่อลดแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นระหว่างดินเหนียวกับผนังของแบบจำลอง จากนั้นนำดินเหนียวตัวอย่างผสมกับน้ำ (Reconstituted soil samples) ให้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 68% ซึ่งสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลว ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อการบรรจุดินลงในแบบจำลอง จากนั้นค่อยๆ บรรจุดินเหนียวลงในแบบจำลองโดยระวังไม่ให้เกิดช่องว่าง จนกระทั่งชั้นดินเหนียวมีความหนาประมาณ 800 มิลลิเมตร จึงทำการใส่ Mini-PVD ที่กึ่งกลางของแบบจำลองโดยใช้แท่งเหล็กดันเข้าไปในชั้นดินเหนียวจนถึงด้านล่าง แล้ววางทับด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จำนวน 3 แผ่นที่ผิวบนของชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบอุปกรณ์ให้น้ำหนักกระทำด้วยแรงดันลม ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นเริ่มให้น้ำหนักกระทำคงที่เท่ากับ 40 kPa เพื่อให้ดินยุบอัดตัวคายน้ำ ภายใต้สภาพการระบายน้ำแบบสองทาง (Two-ways drainage) ในระหว่างการให้น้ำหนักกระทำ ทำการจดบันทึกค่าการทรุดของชั้นดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดดิน	w_L (%)	w_p (%)	γ_t (kN/m ³)	v	λ	e_0	G_s	k_h ($\times 10^{-5}$ m/day)	k_v ($\times 10^{-5}$ m/day)
Bangkok clay	46.64	35.15	16.321	0.3	0.2496	1.38	2.67	0.432	0.432

หมายเหตุ: w_L คือค่าขีดจำกัดความเหลว, w_p คือค่าขีดจำกัดพลาสติก, γ_t คือหน่วยน้ำหนักรวม, v คือค่าอัตราส่วนปริมาตรของ, λ คือความชันของเส้น virgin compression ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, e_0 คือค่าอัตราส่วนช่องว่างตอนเริ่มต้น, G_s คือค่าความถ่วงจำเพาะ, k_h และ k_v คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในแนวระนาบและในแนวดิ่ง ตามลำดับ.

ตารางที่ 2 กรณศึกษา

กรณีศึกษา	ปริมาณซีเมนต์ (%)		ความหนา H_s (mm)	α (%)	β' (%)	β (%)
	เสาเข็ม	แผ่นพื้น				
1	16.42	16.42	0	20	70	70
2	16.42	16.42	100	20	70	64.1
3	16.42	25.65	100	20	70	64.3
4	16.42	16.42	250	20	70	49.6



รูปที่ 3 แผ่น Geotextile และ Mini-PVD

3.1 ขั้นตอนการทำเสาเข็มและแผ่นพื้นในแบบจำลอง

เมื่อค่าระดับการยุบตัวของดินเหนียวในแบบจำลองมีค่าประมาณ 90% จึงหยุดการให้น้ำหนักกระทำ เปิดแบบจำลองออก นำแผ่นใยสังเคราะห์ที่ด้านบน และ Mini-PVD ที่กึ่งกลางของแบบจำลองออกจากแบบจำลอง ถึงขั้นตอนนี้ชั้นดินเหนียวเกิดการหลุดตัวเหลือความหนาของชั้นดินเหนียวประมาณ 630 มิลลิเมตร เพื่อพิจารณาผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ค่า α และ

ค่า β ถูกทำให้คงที่เท่ากับ 20% และ 70% ตามลำดับ ในทุกกรณีศึกษา จากนั้นเจาะรูที่บริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และมีความลึกเท่ากับ 440 มิลลิเมตร ด้วยอุปกรณ์การเจาะสำรวจดินด้วยมือเปล่า (Hand auger) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเจาะดินเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์

หลังจากการเจาะรูเสร็จสิ้น สำหรับกรณีศึกษาที่ 2, 3 และ 4 ให้ทำการขุดหน้าผาดินออกลึกประมาณ 100

– 250 มิลลิเมตร สำหรับเตรียมทำแผ่นพื้น เนื่องจากการนำ Mini-PVD ออกจะเกิดรูเล็กๆ ที่บริเวณด้านล่างของรูเจาะ นำดินมาเติมรูเล็กๆ นั้นจนเต็ม จากนั้นดินที่ถูกขุดออกมานำมาผสมกับซีเมนต์ (16.6% และ 25.65% โดยน้ำหนักดินแห้ง) และเพื่อให้ง่ายต่อการผสม ดินที่ถูกขุดออกมาถูกนำมาผสมน้ำให้มีค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 68% ก่อนการผสม สำหรับกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์นำดินที่ผสมซีเมนต์มาบรรจุจนพอตื้นรูเจาะเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นเสาเข็ม สำหรับกรณี 2, 3 และ 4 (มีแผ่นพื้น) หลังจากบรรจุดินซีเมนต์จนเต็ม ให้นำดินอีกส่วนหนึ่ง (จากการขุดผิวหน้าดินออก) มาผสมซีเมนต์ แล้วดาบคืนกลับด้วยความหนาเท่าเดิม เพื่อหลังจากแข็งตัวจะกลายเป็นแผ่นพื้น บ่มเสาเข็มและแผ่นพื้นดินซีเมนต์เป็นเวลา 28 วัน ก่อนเริ่มทำการทดสอบการยุบตัวของคาน้ำ

3.2 ขั้นตอนการทดสอบการยุบตัวของคาน้ำ

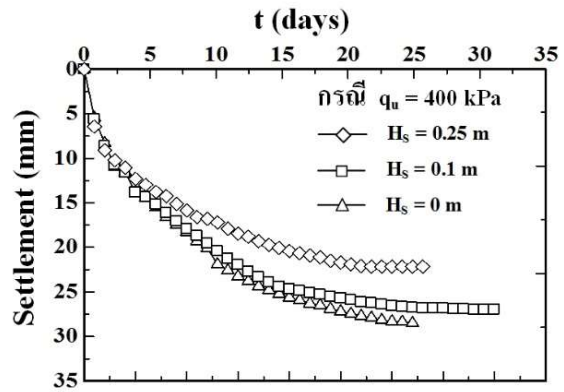
เมื่อได้อายุการบ่มครบ 28 วัน วางแผ่นใยสังเคราะห์จำนวน 3 แผ่น ที่ด้านบนเพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำ จากนั้นใส่อุปกรณ์ส่วนที่เหลือทั้งหมดเพื่อเตรียมตัวทดสอบ ก่อนเริ่มทำการทดสอบ ให้นำน้ำหนักกระทำเท่ากับ 40 kPa ก่อนเพื่อให้ชั้นดินที่เกิดการบวมตัวหดตัวเท่าเดิมกับในขั้นตอนที่ 1 เป็นเวลา 1 – 2 วัน แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบโดยปรับเพิ่มแรงดันกระทำตัวอย่างเป็นเท่ากับ 120 kPa ระหว่างการทดสอบ วัดอัตราการหดตัวที่เกิดขึ้นตลอดการทดสอบ

4. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

เมื่ออัตราการยุบตัวของคาน้ำเกิน 95% ทำการหยุดการทดสอบ ใช้เวลาประมาณ 32 – 40 วัน จากนั้นเปรียบเทียบผลทดสอบเพื่อดูผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นที่ผลทำให้ค่าการหดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการจมทะลุ

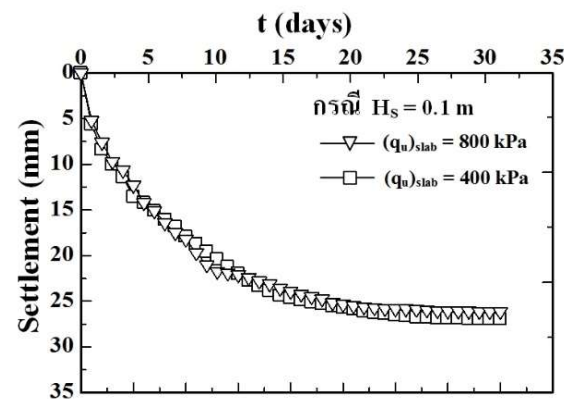
ของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าการหดตัวลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 5 ผลกระทบของค่า H_s ต่อการหดตัวกับเวลา

4.2 ผลกระทบของค่ากำลังรับแรงกดอัดทิศทางเดียวของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

ในรูปที่ 6 แสดงผลกระทบของค่า $(q_u)_{slab}$ ต่อค่าการหดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุง พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า $(q_u)_{slab}$ มีผลต่อค่าการหดตัวอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลกระทบของค่า $(q_u)_{slab}$ ต่อการหดตัวกับเวลา

5. วิธีการหาค่าการหดตัวสุดท้ายของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

Pongsivasathit et al. [6] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าการหดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ โดย

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

พิจารณาชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุง ออกเป็น 2 ชั้น ดังนี้
ชั้นแรกได้แก่ ชั้นบน หรือชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็ม
ดินซีเมนต์ ความหนาของชั้นนี้ (H_1) เท่ากับ $H - H_c$ การ
หาค่าการทรุดตัวสุดท้ายสามารถหาได้จาก

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta p_{1i} H_{1i}}{D_{ci}\alpha + (1-\alpha)D_{si}} \right) \quad (2)$$

ส่วนชั้นที่สอง ได้แก่ชั้นล่าง หรือชั้นดินที่ไม่ได้ถูก
ปรับปรุง มีความหนาเท่ากับ $H - H_1$ โดยมีค่าการทรุดตัว
สุดท้าย ที่สามารถหาได้จาก

$$s_2 = \sum_{i=1}^n \left[H_{2i} \frac{\lambda_i}{1 + e_{0i}} \ln \left(1 + \frac{\Delta p_{2i}}{\sigma'_{vi}} \right) \right] \quad (3)$$

เมื่อ H_{1i} และ H_{2i} คือความหนาของชั้นดินเหนียวที่ถูก
แบ่งย่อยจากชั้นดินเหนียวที่มีความหนา H_1 และ H_2
ตามลำดับ ทั้งนี้การแบ่งชั้นดินนี้เพื่อผลการคำนวณที่
ละเอียดขึ้น, σ'_{vi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งก่อน
มีน้ำหนักระทำในชั้นดิน H_{2i} , e_{0i} คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง
ก่อนมีน้ำหนักระทำ, λ_i คือความชันของเส้น virgin
compression ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, Δp_{1i}
และ Δp_{2i} คือหน่วยแรงรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งในชั้นดิน
 H_{1i} และชั้นดิน H_{2i} ตามลำดับ, D_{ci} และ D_{si} คือค่าโมดูลัส
ของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่อยู่รอบเสาเข็มนั้นในชั้นดิน
 H_{1i} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_{ci} = \frac{E_i(1-\nu_i)}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \quad (4)$$

$$D_{si} = \frac{(1+e_i)\sigma'_{avi}}{\lambda_i} \quad (5)$$

เมื่อ E_i คือค่าโมดูลัสของยังค์สำหรับเสาเข็ม, ν_i คือค่า
อัตราส่วนปัวส์ซองของเสาเข็ม, e_i คืออัตราส่วนช่องว่าง

ของเสาเข็ม และ σ'_{avi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
เฉลี่ยของชั้นดินรวมกับหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องจาก
น้ำหนักที่กระทำ

ในสมการที่ (3) และ (5) ให้ใช้ค่าความชันของเส้น
unloading – reloading ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$
นั่นคือใช้ค่า κ_i แทนค่า λ_i ในกรณีที่ชั้นดินอยู่ในช่วงสภาวะ
การยุบอัดตัวเกินปกติ (Overconsolidated state) ดังนั้น
ค่าการทรุดตัวสุดท้ายรวมที่เกิดขึ้นกับเวลา (s) สามารถหา
ได้จาก

$$s = s_1 + s_2 \quad (6)$$

สำหรับสมการหาค่า H_c นั้น Pongsivasathit et al.
[6] ได้เสนอไว้ดังนี้

สำหรับกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์

$$H_c = H_L \cdot f(\alpha) \cdot g(\beta) \cdot h(\gamma) \quad (7)$$

สำหรับกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์

$$H_c = H_L \cdot f_1(\alpha) \cdot g(\beta) \cdot h(\gamma) \quad (8)$$

เมื่อ

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0.75 - 0.025(\alpha) & (\alpha \leq 20\%) \\ 0.45 - 0.010(\alpha) & (20\% < \alpha \leq 45\%) \\ 0 & (\alpha > 45\%) \end{cases} \quad (9)$$

$$g(\beta) = \begin{cases} 1.62 - 0.016\beta & (20\% \leq \beta \leq 70\%) \\ 0.5 & (70\% \leq \beta \leq 90\%) \end{cases} \quad (10)$$

$$h(\gamma) = 0.27 \ln(\gamma) - 0.41 \quad (\gamma > 10) \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{p \cdot p_a^{1.5}}{s_u^{2.5}} \quad (12)$$

เมื่อ p_o คือความดันบรรยากาศ และ s_u คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวบริเวณปลายเสาเข็มซึ่งสามารถประมาณได้จาก

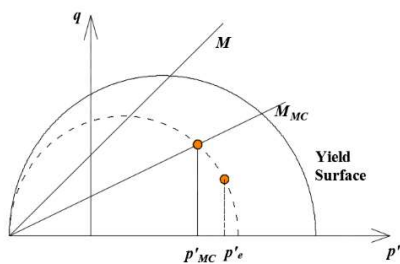
$$s_u = \frac{M_{MC}}{2} p'_{MC} (OCR_e)^\Lambda \quad (13)$$

$$p'_{MC} = p'_e \left(\frac{M^2 + \eta_e^2}{M^2 + M_{MC}^2} \right)^\Lambda \quad (14)$$

$$OCR_e = \left(\frac{\sigma'_v OCR(1 + 2K_o^{nc}) + c' \cot \phi'}{3 p'_e} \right) \quad (15)$$

$$\eta_e = \frac{q}{p'_e} \quad (16)$$

เมื่อ p'_e คือค่า Equivalent initial mean stress; q คือค่า deviator stress; η_e คือค่า Stress ratio; M คือค่าความชันของเส้นวิถีใน $q - p'$ พล็อต (ดังแสดงในรูปที่ 7); K_o^{nc} คือค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบไม่เคลื่อนที่ในสภาวะที่ดินมีการยุบอัดตัวปกติ; M_{MC} คือค่าความชันของเส้นสมการเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ใน $q - p'$ พล็อต; p'_{MC} คือค่า Equivalent mean stress บนเส้น M_{MC} line; $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$; λ, κ คือค่าความชันของเส้น Virgin compression และเส้น swelling ใน $e - \ln p'$ พล็อต (e คืออัตราส่วนช่องว่าง และ p' คือค่า Effective mean stress) ตามลำดับ; OCR_e คือค่าอัตราส่วนการยุบอัดตัวเกินปกติ; c' คือค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผล; ϕ' คือค่าองศาความเสียดทานภายในดิน; σ'_v คือค่าแรงดันดินที่ได้รับในปัจจุบัน



รูปที่ 7 แบบจำลอง Soft soil ใน $p'-q$ พล็อต

6. การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยสูตรของ Pongsivasathit et al. [6]

ประยุกต์ใช้สูตรการคำนวณหาค่าการทรุดตัวรวมของ Pongsivasathit et al. [6] กับกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณีสำหรับพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อน (Relative error, RE) สามารถนิยามได้ดังต่อไปนี้

$$RE = \frac{s - s_{mea}}{s} \quad (17)$$

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ

กรณีศึกษา	H_s (mm)	ค่าการทรุดตัวสุดท้าย (mm)		RE (%)
		$(s_f)_{mea}$	$(s_f)_{cal}$	
1	0	28.50	29.60	3.72
2	100	26.97	28.83	6.90
3	100	25.21	28.40	11.23
4	250	22.92	26.22	12.59

เมื่อค่า s สามารถหาได้จากสมการที่ [6] และค่า s_{mea} คือค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการทดสอบ (s_{mea}) เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ในกรณีที่ความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น ผลการคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit et al. [6] มีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดสอบสูงขึ้น การมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ผลการคำนวณด้วยสูตรดังกล่าวมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการวิเคราะห์ด้วย FEM เพื่อหาสมการในการคำนวณค่า H_c ของ Pongsivasathit et al. [6] ค่า H_s ถูกให้คงที่เท่ากับ 1.0 m จึงทำให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างกันในกรณีที่ค่า H_s มีค่าไม่เท่ากับ 1.0 m

7. สรุป

1) การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพื้นดินซีเมนต์มีผลทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

2) ค่ากำลังรับแรงกดอัดทิศทางเดียว ของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลกระทบต่อค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์น้อยมาก

3) จากผลการของ Pongsivasathit et al. [6] ค่าการทรุดตัวที่ได้ จะมีค่ามากกว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดลองในกรณีแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีความหนาแน่นขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การพัฒนาการใช้ดินเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบลอยเพื่อป้องกันน้ำท่วม ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. T. Bergado, J. C. Chai, M. C. Alfaro and A. S. Balasubramaniam, *Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment*. Rotterdam, Balkema, 1994.
- [2] B. B. Broms and P. O. Boman, "Lime column a new foundation method," J. Geotec. Eng. D, ASCE, vol. 105, no. GT4, pp. 539-556, 1979.
- [3] J. C. Chai, N. Miura, T. Kirekawa and T. Hino, "Settlement prediction for soft ground improved by columns," Proc. Inst. Civil Eng - Ground Improvement, vol. 163, no. 2, pp. 109-119, 2010.

- [4] J. C. and S. Pongsivasathit, "A method for calculating consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil," Frontiers Arch. Civil Eng., vol. 4, no. 2, pp. 241-251, 2010.
- [5] Japanese Institute of Construction Engineering (JICE), "Flexible foundation," in Foundation Structure Part. Design Code for Flexible Box Culvert-II, Tokyo: San-kai-dou Press (in Japanese), 1999, pp. 233-248.
- [6] S. Pongsivasathit, J. C. Chai and W. Q. Ding, "Consolidation Settlement of floating-column-improved soft clayey deposit," Proc. Inst. Civil Eng - Ground Improvement, vol. 166, no. 1, pp. 44-58, 2013.
- [7] S. L. Shen, J. C. Chai and N. Miura, "Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement," in the 1st Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, 2001, pp. 485-490.