

ผลกระทบของการมีแผ่นพื้นต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา
ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก
Effect of Slab Existence on Settlement-Time
Curve of Soft Clayey Deposit Improved
by Floating Soil-Cement Column

ศุภสิทธิ์ พงศ์วิเศษสิทธิ์¹ สมพร มั่นใจ² และสุธี ปิยะพิพัฒน์³

บทคัดย่อ

แบบจำลองการทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.45 เมตร สูง 1.00 เมตร ถูกนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ทั้งแบบมีและแบบไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีผลต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา ทดสอบ 2 กรณี ได้แก่ กรณีไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ และกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 25 เซนติเมตร ดินที่นำมาทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีขั้นตอนการทดสอบด้วยกัน 3 ขั้นตอนดังนี้ 1) การทำชั้นดิน 2) การใส่เสาเข็มดินซีเมนต์ 3) การทดสอบการยุบอัดตัวของดิน โดยให้น้ำหนักกระทำรวมเท่ากับ 120 kPa ในทั้ง 2 กรณี ส่วนค่าพารามิเตอร์ได้แก่ อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ และอัตราส่วนการปรับปรุงความลึกถูกกำหนดให้คงที่ ผลการทดสอบพบว่า ค่าการทรุดตัวกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 25 เซนติเมตร จะน้อยกว่าค่าการทรุดตัวกรณีไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นใช้สูตรการประมาณค่าการทรุดตัวกับเวลาของ Pongsivasathit et al. (2012) หาค่าการทรุดตัวกับเวลาของทั้งสองกรณี พบว่าในกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ วิธีดังกล่าวจะได้ค่าการทรุดที่มากเกินไป จำเป็นต้องทำการปรับปรุงวิธีของ Pongsivasathit et al. (2012) โดยให้สามารถพิจารณาถึงผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เสียก่อน

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก แผ่นพื้นดินซีเมนต์ อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก

¹อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²นักศึกษานิพนธ์โท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

Large scale laboratory model tests (diameter of 0.45 m and height of 1.0 m) were conducted to investigate the consolidation behavior of floating soil-cement column improved soft clayey model grounds with or without a cement stabilized slab on the ground surface. The aim of study is to investigate the influence of slab existence on the settlement-time curve. Two cases of testing were conducted as without slab and with slab of 25 cm in thickness. Bangkok clay was used as soft clayey deposit for investigation. There are 3 steps of testing as 1) Making ground 2) Soil-cement column installation 3) Consolidation test. The consolidation pressure applied 120 kPa for 2 cases. The other parameters as the area improvement ratio and the depth improvement ratio were fixed. Test results show that the consolidation settlement of with slab of 25 cm in thickness case is less than that of without slab case significantly. Then the method of calculating the settlement-time curve by Pongsivasathit et al. (2012) was applied to the 2 cases of laboratory model. As results, for with a slab on ground surface, this method overestimated. The method for calculating the settlement-time curve by Pongsivasathit et al.(2012) is essential to be modified which can consider the effect of cement stabilized slab.

Keywords: floating soil-cement column, cement stabilized slab, area improvement ratio, depth improvement ratio.

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกทั้งแบบมีและไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน เพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถลดผลกระทบที่มีต่อชั้นน้ำใต้ดินและค่าก่อสร้างลงได้ (Shen et al., 2001; Chai et al., 2009) ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาค่าการทรุดตัวปฐมภูมิของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มประเภทนี้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มประเภทนี้มีความซับซ้อนมากกว่าเสาเข็มที่มีความยาวแบบปกติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติดังกล่าวเพิ่ม

Pongsivasathit et al. (2012) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกทั้งแบบมีและไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และนำผลที่ได้มาเสนอวิธีการคำนวณหาค่าการทรุดตัวกับเวลา โดยสามารถพิจารณาถึงผลกระทบของ อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ ($\alpha = A_c/A_e$, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ A_e คือพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกหนึ่งหน่วยของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์), อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก ($\beta = H_L/H$, H_L คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ H คือความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน), น้ำหนักที่กระทำ

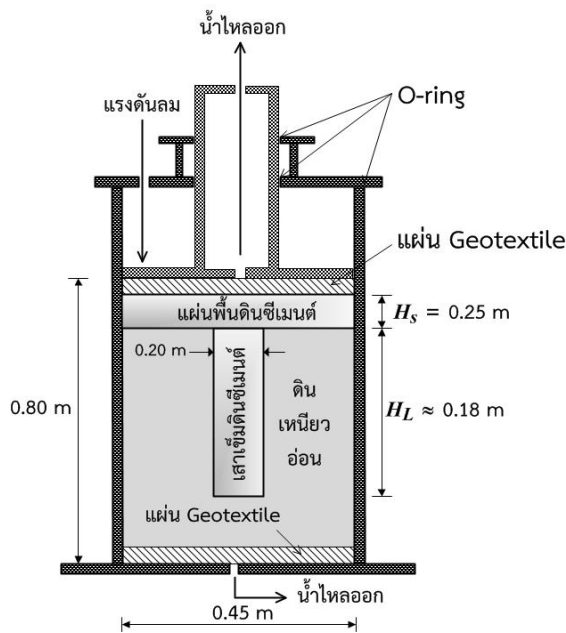
(p) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) ของดินบริเวณปลายเสาเข็ม โดยผลการคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลานำมาสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองทดสอบและผลการทดสอบในภาคสนามของกรณีศึกษาในอดีตจำนวน 4 กรณี อย่างไรก็ตามวิธีนี้นี้นำมาประมาณค่าการทรุดตัวของกรณีศึกษาในอดีตกลับพบว่า ในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่หนา 2.5 m หรือมีอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้น (H_s) กับความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไป เท่ากับร้อยละ 0.40 ซึ่งสูงมากกว่าทุกกรณี จะให้ผลการคำนวณเกินกว่าค่าที่วัดได้ในภาคสนามอยู่มาก ส่วนกรณีอื่นๆ ที่มีค่าความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ไม่เกิน 0.5 m จะได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในภาคสนาม ซึ่ง Pongsivasathit et al. (2012) ยังขาดผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ เพื่อยืนยันถึงปรากฏการณ์ดังกล่าว

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ จะทำการทดสอบหาค่าการทรุดตัวกับเวลา ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกน โดยจะกำหนดให้มีอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้นกับความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไปเท่ากับร้อยละ 0.40 นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้สูตรของ Pongsivasathit et al. (2012) และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการมีของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ และเป็นแนวทางในการปรับปรุงสูตรการคำนวณที่มีอยู่

2. แบบจำลองการทดสอบ

2.1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบ

แบบจำลองการทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกน ทำจากท่อวัสดุ PVC ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.45 m สูง 1 m การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแสดงในรูปที่ 1 ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบคือดินเหนียว ซึ่งถูกเก็บแบบถูกรบกวนจากบริเวณสถานที่ก่อสร้างไบเทค บางนา โดยก่อนเก็บตัวอย่างดินทำการขุดเปิดหน้าดิน ลึก 4 – 5 m คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเป็นดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ได้ถูกกำหนดไว้ให้มีค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u) เท่ากับ 400 kPa ส่วนค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's Modulus, E) เท่ากับ 40,000 kPa (อ้างอิงจากผลการทดสอบ Unconfined compression test) ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ในการผสม สำหรับค่า k_v ได้มาจากผลการทดสอบ Consolidation test ที่มีหน่วยแรงประสิทธิผลกดทับอยู่เท่ากับ 40 kPa และสมมติให้ค่า k_h มีค่าเท่ากับ k_v สำหรับค่าอัตราส่วนปัวส์ซองสมมติเท่ากับ 0.2 สำหรับแผ่น Geotextile มีความหนาประมาณ 2.5 mm. ใช้เป็นวัสดุในการระบายน้ำออกจากตัวอย่างที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ (อ้างอิงจาก Chai and Pongsivasathit, 2010) ดังนี้



รูปที่ 1 แบบจำลองทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตร

2.1.1 ขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว

สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการให้แรงดันกระทำกับดิน ให้ดินยุบอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์เพื่อเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการทดสอบ เริ่มจากวางแผ่น Geotextile จำนวน 3 แผ่นที่ด้านล่างของแบบจำลองทดสอบ เพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำ โดยน้ำจะไหลออกที่บริเวณ

ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 1 ทาจาระบีที่บริเวณด้านในของแบบจำลองทดสอบให้ทั่ว เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวและแบบจำลองทดสอบที่อาจจะเกิดขึ้น จากนั้นบรรจุดินเหนียวที่ผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลว (ประมาณ 68%) เมื่อดินเหนียวมีความหนา 0.80 m วางแผ่น Geotextile ทับด้านบนเพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำออกจากตัวอย่างทดสอบ จากนั้นบรรจุ Mini-PVD ที่ตรงกลางของแบบจำลองทดสอบ โดยการใช้แท่งเหล็กดันดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับ Mini-PVD ทำจากแผ่น Geotextile ม้วนซ้อนกันจำนวน 3 รอบ โดยให้มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 30 mm x 9 mm จะทำหน้าที่ช่วยเร่งอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำให้สมบูรณ์เร็วขึ้น ประกอบลูกสูบและอุปกรณ์ฝาปิดด้านบนสุด จากนั้นทำการให้แรงดันลม 40 kPa กระทำในแบบจำลองทดสอบเพื่อให้ดินเหนียวยุบอัดตัวคายน้ำ แรงดันลมนี้นี้จะถือว่าเป็น Pre-consolidation pressure (p_0) มีสภาพการไหลของน้ำออกจากตัวอย่างแบบสองทาง (Two-way drainage condition) ระหว่างทดสอบทำการบันทึกค่าการทรุดตัวของชั้นดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่นำมาทดสอบ

ประเภทดิน	w_L (%)	w_p (%)	γ_t (kN/m ³)	v	λ	e_0	G_s	k_h (x 10 ⁻⁵ m/day)	k_v (x 10 ⁻⁵ m/day)
ดินเหนียว กรุงเทพฯ	46.64	35.15	16.321	0.3	0.2496	1.38	2.67	0.432	0.432

** w_L คือค่าขีดจำกัดความเหลว, w_p คือค่าขีดจำกัดพลาสติก, γ_t คือหน่วยน้ำหนักรวม, v คือค่าอัตราส่วนปริมาตรของ, λ คือความชันของเส้น virgin compression ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, e คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง, G_s คือค่าความถ่วงจำเพาะ และ k_h และ k_v คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในแนวระนาบและในแนวตั้ง ตามลำดับ

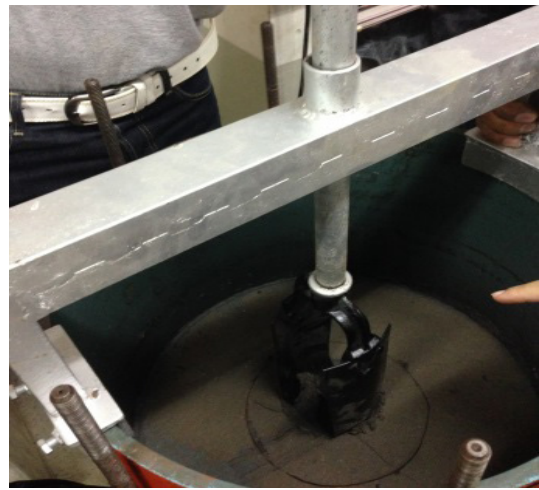


รูปที่ 2 การใส่ Mini-PVD

2.1.2 ขั้นตอนการบรรจุเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นดินซีเมนต์

เมื่อตัวอย่างดินเหนียวมีค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำประมาณ 95% (สังเกตจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว) ยุติการให้แรงดัน ถอดอุปกรณ์ฝาปิดด้านบนสุดและลูกสูบ พร้อมทั้งแผ่น Geotextile และ Mini-PVD ออกจากนั้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ทำการเจาะดินด้วยสว่านเจาะ (Hand augur) และแท่นยึดสว่าน ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากค่า $\alpha = 20\%$ ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะจึงเท่ากับ 20 cm ส่วนความลึกได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ด้านล่างที่เกิดจากการฝัง Mini-PVD ให้ทำการอุดโดยใช้เศษดินเหนียวจนเต็มรู สำหรับกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน เพื่อให้จะให้ค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้นและความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไปเท่ากับร้อยละ 0.40 จึงต้องทำการขุดเอาหน้าดินออกให้มีความลึก (H) ประมาณเท่ากับ 0.25 m จากนั้นนำดินที่ถูกขุดออกทั้งหมดมาผสมกับซีเมนต์ประมาณ 16.47% ของน้ำหนักดินแห้ง แบบผสมเปียกด้วย

อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และเพื่อให้ง่ายต่อการผสมจะนำดินมาทำการผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นประมาณ 68% ก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์เพสต์ นำดินซีเมนต์ที่ผสมเสร็จแล้วเทกลับเข้าไปหลุม เมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่วนกรณีที่มีแผ่นพื้นจะใส่ดินซีเมนต์ส่วนที่เหลือ แทนที่กลบลงไปแบบจำลองทดสอบเท่ากับดินที่ถูกขุดหน้าดินออกมา บ่มดินซีเมนต์ประมาณ 28 วัน จากนั้นจึงเริ่มการทดสอบในขั้นถัดไป



รูปที่ 3 การเจาะดินเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์

2.1.3 ขั้นตอนการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

สำหรับขั้นตอนสุดท้าย เมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน ทำการใส่แผ่น Geotextile จำนวน 3 แผ่น พร้อมทั้งใส่ลูกสูบและประกอบอุปกรณ์ฝาปิดกลับที่ด้านบนของแบบจำลองทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ก่อนเริ่มทำการทดสอบจะให้แรงดัน 40 kPa กระทำแกตัวอย่างดินเป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้แน่ใจว่าหน้าสัมผัสของลูกสูบสัมผัสกับผิวบนของตัวอย่างทดสอบอย่างสมบูรณ์และทำให้ตัวอย่างทดสอบเข้าสู่สภาวะการยุบอัดตัวแบบปกติ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบโดยปรับแรงดันเพิ่มจนมีค่าเท่ากับ 120 kPa ซึ่งหมายความว่า จะมีแรงดันกระทำ

กับตัวอย่างทดสอบ (Δp) เท่ากับ 80 kPa ในระหว่างการทดสอบบันทึกค่าการทรุดตัวของตัวอย่างกับเวลา

และเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษากรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์กับกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยค่าอัตราส่วนการปรับปรุงความลึกเดียวกัน ค่าพารามิเตอร์ใหม่สำหรับกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ได้ถูกนำเสนอ ดังนี้



รูปที่ 4 แบบจำลองหนึ่งหน่วยระหว่างทดสอบ

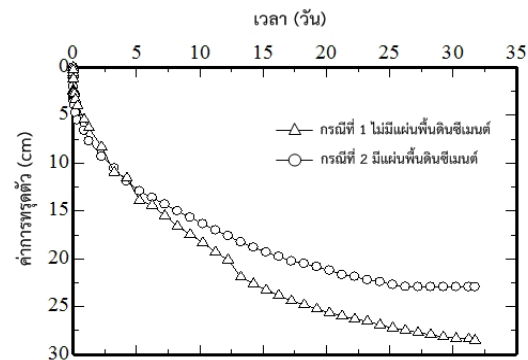
$$\beta' = \frac{H_L + H_s}{H + H_s} \quad (1)$$

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบ 2 กรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อกรณี 1 เป็นกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์ และส่วนกรณีที่ 2 เป็นกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีความหนา (H_s) เท่ากับ 0.25 m สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ จะกำหนดให้คงที่ ดังนี้ $\alpha = 20\%$, β หรือ $(\beta') = 70\%$, $p_o = 40$ kPa และ $\Delta p = 80$ kPa

2.2 ผลการทดสอบ

เมื่ออัตราการยุบตัวของตัวอย่างน้ำเกิน 95% การทดสอบจะยุติ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 32 วัน การเปรียบเทียบผลทดสอบเพื่อดูผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ของชั้นดินเหนียวอ่อน

ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวกับเวลา

พบว่าค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์อยู่บนเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีผลต่อคุณสมบัติการยุบตัวของตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุง

3. การคำนวณการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

3.1 การคำนวณหาเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา

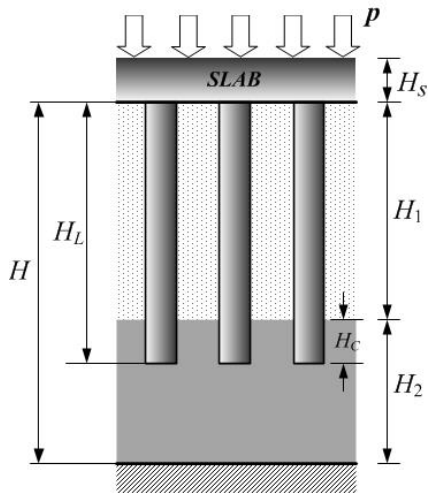
ในการคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลาวิธีของ Pongsivasathit et al. (2012) จะแบ่งดินออกเป็นสองชั้น ได้แก่ ชั้นดินด้านบนมีความหนาเท่ากับ H_1 ($H_1 = H_L - H_c$) ซึ่งให้ถือว่าเป็นชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ และชั้นดินด้านล่างมีความหนาเท่ากับ H_2 ($H_2 = H - H_1$) ซึ่งถือว่าเป็นชั้นดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อ H_c สามารถหาได้จาก

$$\text{สำหรับกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์} \\ H_c = H_L \cdot f(\alpha) \cdot g(\beta) \cdot h(\gamma) \quad (2)$$

$$\text{สำหรับกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์} \\ H_c = H_L \cdot f_1(\alpha) \cdot g(\beta) \cdot h(\gamma) \quad (3)$$

ตารางที่ 2 กรณีศึกษา

กรณี	ชนิดดิน	α (%)	β หรือ β' (%)	p_0 (kPa)	p (kPa)	H_L (m)	H_s (m)	H (m)
1	ดินเหนียว กรุงเทพฯ	20	70	40	80	0.438	0	0.626
2	ดินเหนียว กรุงเทพฯ	20	70	40	80	0.182	0.250	0.617



รูปที่ 6 เสาค้ำแบบไม้อย่างลึกที่ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน

เมื่อ

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0.75 - 0.025(\alpha) & (\alpha \leq 20\%) \\ 0.45 - 0.010(\alpha) & (20\% < \alpha \leq 45\%) \\ 0 & (\alpha > 45\%) \end{cases} \quad (4)$$

$$g(\beta) = \begin{cases} 1.62 - 0.016\beta & (20\% \leq \beta \leq 70\%) \\ 0.5 & (70\% \leq \beta \leq 90\%) \end{cases} \quad (5)$$

$$h(\gamma) = 0.27 \ln(\gamma) - 0.41 \quad (\gamma > 10) \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{P \cdot P_a^{1.5}}{s_u^{2.5}} \quad (7)$$

เมื่อ p_0 คือความดันบรรยากาศ และ s_u คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวบริเวณใต้เสาค้ำซึ่งสามารถประมาณได้จาก

$$s_u = \frac{1}{2^{\Lambda+1}} M p'_0 (OCR)^\Lambda \quad (8)$$

$$p'_0 = \left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2} \right)^\Lambda (p' + c' \cdot \cot \phi') \quad (9)$$

$$\eta = \frac{q}{p' + c' \cdot \cot \phi} \quad (10)$$

เมื่อ p' คือค่า Effective mean stress, M คือค่าความชันของเส้นวิบัติใน $q - p'$ พล็อต, q คือค่า Deviator stress, c' คือค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดินเหนียว, OCR คือค่าอัตราส่วนการยุบอัดตัวเกินปกติ และ $\Lambda = (1 - k/\lambda)$.

ดังนั้นค่าการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แบบไม้อย่างลึก สามารถหาได้จาก

สำหรับชั้นดินด้านบน (H_1) :

$$s_1(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_{1i} H_{1i} U(t)}{D_{ci} \alpha + (1 - \alpha) D_{si}} \quad (11)$$

สำหรับชั้นดินด้านล่าง (H_2) :

$$s_2(t) = \sum_{i=1}^n H_{2i} \frac{\lambda_i}{1 + e_{0i}} \ln \left(1 + \frac{\Delta p_{2i}}{\sigma'_{vi}} U(t) \right) \quad (12)$$

เมื่อ H_{1i} และ H_{2i} คือความหนาของชั้นดินเหนียวที่ถูกแบ่งย่อยจากชั้นดินเหนียวที่มีความหนา H_1 และ H_2 ตามลำดับ ทั้งนี้การแบ่งชั้นดินนี้เพื่อผลการคำนวณที่ละเอียดขึ้น, σ'_{vi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนมีน้ำหนักระทำในชั้นดิน H_{2i} , e_{0i} คือค่าอัตราส่วนช่องว่างก่อนมีน้ำหนักระทำ, λ_i คือความชันของเส้น virgin compression ในกราฟ

ความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, Δp_{1i} และ Δp_{2i} คือหน่วยแรงรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งในชั้นดิน H_{1i} และชั้นดิน H_{2i} ตามลำดับ, D_{ci} และ D_{si} คือค่าโมดูลัสของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่อยู่รอบเสาเข็มนั้นในชั้นดิน H_{1i} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้:

$$D_{ci} = \frac{E_i(1-\nu_i)}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \quad (13)$$

$$D_{si} = \frac{(1+e_i)\sigma'_{avi}}{\lambda_i} \quad (14)$$

เมื่อ E_i คือค่าโมดูลัสของยังค์สำหรับเสาเข็ม, ν_i คือค่าอัตราส่วนปัวซองของเสาเข็ม, e_i คืออัตราส่วนช่องว่างของเสาเข็ม และ σ'_{avi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ยของชั้นดินรวมกับหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่กระทำ สำหรับค่า $U(t)$ ในสมการที่ (11) และ (12) เป็นค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยที่เวลา t ใดๆ ซึ่งมีวิธีการคำนวณหาดังที่จะเสนอในหัวข้อถัดไป

ในสมการที่ (12) และ (14) ให้ใช้ค่าความชันของเส้น unloading - reloading ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$ นั่นคือใช้ค่า K_r แทนค่า λ_i ในกรณีที่ชั้นดินอยู่ในช่วงสภาวะการยุบอัดตัวเกินปกติ (Overconsolidated state) ดังนั้นค่าการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับเวลา ($s(t)$) สามารถหาได้จาก:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) \quad (15)$$

สำหรับค่าการทรุดตัวสุดท้าย (s_f) ให้หาจากการแทนค่า $U(t) = 100\%$ ลงไปในสมการที่ (11) และ (12)

3.2 ระดับการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

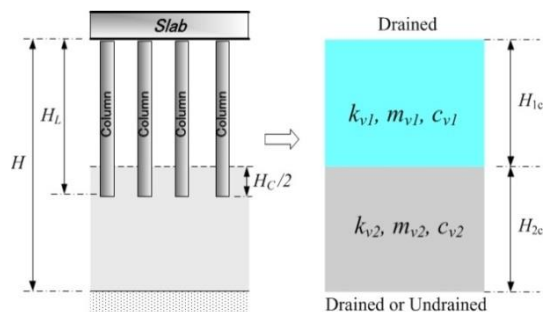
ในการหาค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำที่เวลา t ใดๆ ($U(t)$) ของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก สามารถพิจารณาชั้นดินออกเป็น 2 ชั้นใหญ่ๆ ได้แก่ ชั้นดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม (ชั้นดินที่ถูกปรับปรุง) และชั้นดินที่อยู่ใต้เสาเข็ม (ชั้นดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง) ดังแสดงในรูปที่ 7 และหน่วยแรงรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำต่อชั้นดินแปรเปลี่ยนไปตามความลึกและเวลา ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธีการหาอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบยาว (Fully penetration column) มาใช้กับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกได้

3.2.1 วิธีการหาค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำ

Chai and Pongsivasathit (2010) ได้เสนอวิธีการประมาณค่า $U(t)$ โดยใช้สูตรการคำนวณของ Zhu and Yin (1999) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่า $U(t)$ ของชั้นดินที่เป็นระบบสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อค่าพารามิเตอร์ k_{v1} และ c_{v1} ของชั้นดินที่ถูกปรับปรุง และค่าความหนา H_{1c} และ H_{2c} ที่จำเป็นในการคำนวณได้ถูกนำเสนอ ดังนี้

$$m_{v1} = \frac{1}{\alpha D_c + (1-\alpha) D_s} \quad (16)$$

$$k_{v1} = \left(1 + \frac{2.5 H_{1c}^2}{\mu d_e^2} \frac{k_h}{k_v} \right) \quad (17)$$



รูปที่ 7 ระบบชั้นดินสองชั้นของ Zhu and Yin (1999)

เมื่อ D_c และ D_s คือค่าโมดูลัสของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวที่อยู่รอบๆ ดินซีเมนต์ตามลำดับ, H_{1c} คือความหนาของชั้นดินด้านบน และค่า μ สามารถหาได้จากสมการที่เสนอโดย Hansbo (1981) ดังนี้

$$\mu = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} + \frac{8H_{1c}^2 k_h}{3d_c^2 k_c} \quad (18)$$

เมื่อ $n = d_e/d_c$, $s = d_s/d_c$ (d_c , d_s และ d_e คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม, smear zone และเซลล์หนึ่งหน่วย (Unit cell) ที่แทนเสาเข็มดินซีเมนต์จำนวนหนึ่งต้นกับพื้นที่หน้าตัดที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มนั้น ตามลำดับ, k_c และ k_s คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในเสาเข็มและในดินบริเวณ smear zone ตามลำดับ โดยที่ $k_c = k_v$ และค่า k_{v1} จะมากกว่า k_v เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าน้ำบริเวณรอบๆ เสาจะไหลเข้าสู่ภายในตัวเสาเข็มดินซีเมนต์

สำหรับความหนา H_{1c} และ H_{2c} หาได้จาก

$$H_{1c} = H_L - \frac{H_c}{2} \quad (19)$$

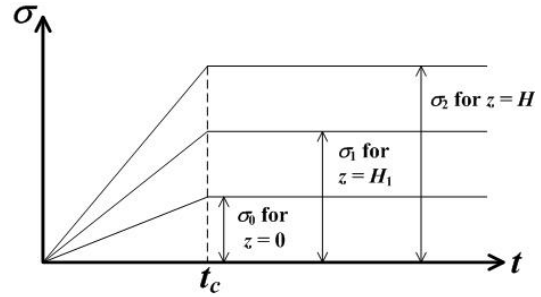
$$H_{2c} = H_{2o} - \frac{s_f}{2} \quad (20)$$

เมื่อ H_{2o} คือค่าความหนาเริ่มต้นของชั้นดินที่ถือว่าไม่ได้ถูกปรับปรุงก่อนมีน้ำหนักกระทำหรือ $H_{2o} = H - H_{1c}$ และ s_f คือค่าการทรุดตัวสุดท้ายของระบบ

3.2.2 สูตรของ Zhu and Yin (1999)

Zhu และ Yin (1999) ได้เสนอสมการในการประมาณค่าอัตราการทรุดตัวของชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้นภายใต้น้ำหนักที่แปรผันกับความลึกของชั้นดินเหนียวและเวลาการก่อสร้างดินถม (Embankment) โดยน้ำหนักที่มากกระทำจะคงที่เมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้าง หรือ

เรียกลักษณะน้ำหนักกระทำแบบนี้ว่า Depth-dependent ramp load มีลักษณะดังในรูปที่ 8 โดยจะยังคงใช้สมมติฐานเดียวกันกับทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi เว้นแต่ลักษณะของแรงที่มากกระทำต่อชั้นดินเหนียว



รูปที่ 8 น้ำหนักกระทำแบบ Depth-dependent ramp load

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาระดับการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวที่มีลักษณะเป็นสองชั้น มีดังต่อไปนี้

$$\xi = \frac{\sqrt{(k_{v2}m_{v2})} - \sqrt{(k_{v1}m_{v1})}}{\sqrt{(k_{v2}m_{v2})} + \sqrt{(k_{v1}m_{v1})}} \quad (21)$$

$$\eta = \frac{H_{1c}\sqrt{c_{v2}} - H_{2c}\sqrt{c_{v1}}}{H_{1c}\sqrt{c_{v2}} + H_{2c}\sqrt{c_{v1}}} \quad (22)$$

$$T_v = \frac{c_{v1} c_{v2} t}{(H_{1c}\sqrt{c_{v2}} + H_{2c}\sqrt{c_{v1}})^2} \quad (23)$$

$$T_c = \frac{c_{v1} c_{v2} t_c}{(H_{1c}\sqrt{c_{v2}} + H_{2c}\sqrt{c_{v1}})^2} \quad (24)$$

$$\chi = \frac{1}{2}(1 + \eta) \quad (25)$$

$$\psi = \frac{1}{2}(1 - \eta) \quad (26)$$

เมื่อ t คือระยะเวลารวม และ t_c คือระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินถม ดังนั้น ในกรณีที่น้ำสามารถไหลได้สองทาง (Two-way drainage boundary condition) ระดับการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้นหาได้จาก

$$U(T_v) = \min\left(1, \frac{T_v}{T_c}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2[m_{v1}H_{1c}/\chi \sin(\lambda_n\chi)]T_n(T_v)}{\lambda_n[m_{v1}H_{1c}(\sigma_0 + \sigma_1) + m_{v2}H_{2c}(\sigma_1 + \sigma_2)]} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2[m_{v2}H_{2c}/\psi \sin(\lambda_n\psi)]T_n(T_v)}{\lambda_n[m_{v1}H_{1c}(\sigma_0 + \sigma_1) + m_{v2}H_{2c}(\sigma_1 + \sigma_2)]} \quad (27)$$

เมื่อ min หมายถึงใช้ค่าที่น้อยที่สุดระหว่างค่า 1 และ T_v/T_c

กรณี $T_v \leq T_c$;

$$T_n(T_v) = \frac{b_n}{\lambda_n^3 T_c} [1 - \exp(-\lambda_n^2 T_v)] \quad (28)$$

กรณี $T_v > T_c$;

$$T_n(T_v) = \frac{b_n}{\lambda_n^3 T_c} [1 - \exp(-\lambda_n^2 T_c)] [\exp(-\lambda_n^2 (T_v - T_c))] \quad (29)$$

และค่า b_n สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$b_n = \left(\frac{1}{[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n\chi) + [m_{v2}H_{2c}/2\sin^2(\lambda_n\psi)]} \right) \times \left\{ \left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{\chi \sin(\lambda_n\chi)} \right] \sigma_0 + \left[\frac{m_{v2}H_{2c}}{\psi \sin(\lambda_n\psi)} \right] \sigma_2 + \left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{\chi^2 \lambda_n} \right] (\sigma_1 - \sigma_0) + \left[\frac{m_{v2}H_{2c}}{\psi^2 \lambda_n} \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \right\} \quad (30)$$

เมื่อค่า λ_n คือรากลำดับที่ n ของสมการต่อไปนี้

$$\sin\theta + \xi \sin(\eta\theta) = 0 \quad (31)$$

สำหรับกรณีที่น้ำสามารถไหลได้ด้านเดียว (One-way drainage boundary condition) ค่าระดับการยุบอัดตัวคายนํ้าของชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$U(T_v) = \min\left(1, \frac{T_v}{T_c}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2m_{v1}H_{1c}T_n(T_v)}{\lambda_n\alpha \sin(\lambda_n\alpha)} \times \frac{1}{[m_{v1}H_{1c}(\sigma_0 + \sigma_1) + m_{v2}H_{2c}(\sigma_1 + \sigma_2)]} \right\} \quad (32)$$

และค่า b_n สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

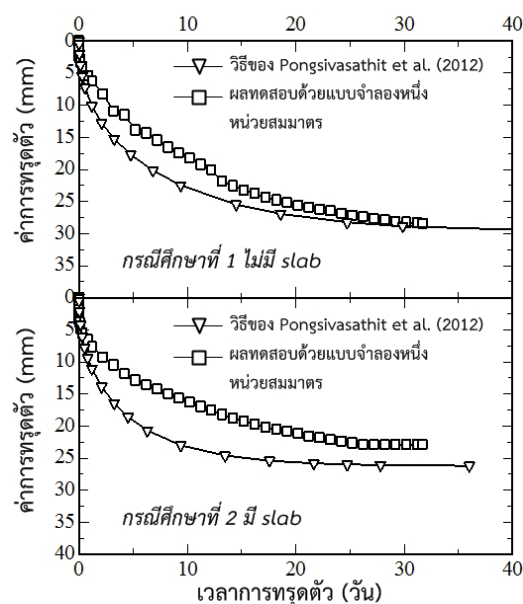
$$b_n = \frac{\left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{\chi \sin(\lambda_n\chi)} \right] \sigma_0 + \left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{\chi^2 \lambda_n} \right] (\sigma_1 - \sigma_0)}{[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n\chi) + [m_{v2}H_{2c}/2\cos^2(\lambda_n\psi)]} + \frac{\left[\frac{m_{v2}H_{2c}[\cos(\lambda_n\psi) - 1]}{\psi^2 \lambda_n \cos(\lambda_n\psi)} \right] (\sigma_1 - \sigma_2)}{[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n\chi) + [m_{v2}H_{2c}/2\cos^2(\lambda_n\psi)]} \quad (33)$$

เมื่อค่า λ_n คือรากลำดับที่ n ของสมการต่อไปนี้

$$\cos\theta - \xi \cos(\eta\theta) = 0 \quad (34)$$

3.3 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากผลทดสอบ

สำหรับค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่นำมาทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 นั้นได้จากการทดสอบ Consolidation Test ด้วยเครื่อง Oedometer และ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณระดับการยุบอัดตัวคายนํ้าของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อดินเหนียวเป็นดินที่มีการยุบอัดตัวแบบปกติ โดยที่ค่า Δp_{1i} และ Δp_{2i} มีค่าเท่ากันคือ 80 kPa การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลากับผลทดสอบของแบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกนได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่นำมาทดสอบ

ชนิดดิน	γ_{sat} (kN/m ³)	s_u (kPa)	v	λ	e_0	m_v ($\times 10^{-4}$ m ² /kN)	k_h	k_v
							($\times 10^{-5}$ m/day)	
ดินเหนียวกรุงเทพ	16.32	10.92	0.3	0.2496	1.38	4.05	0.432	0.432

** เมื่อ γ_{sat} คือหน่วยน้ำหนักก้อนน้ำของดิน และ m_v คือค่า Coefficient of volume change ที่น้ำหนักกระทำรวมเท่ากับ $p_0 + \Delta p$

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าระดับการยุบตัวด้วยน้ำ

กรณีศึกษา	e_0	c_{v1}	c_{v2}	k_{v1}	k_{v2}	m_{v1}	m_{v2}	H_c (m)	s_f (m)	H_{1c} (m)	H_{2c} (m)
		($\cdot 10^{-3}$ m ² /day)		($\cdot 10^{-5}$ m/day)		($\cdot 10^{-4}$ m ² /kN)					
1	1.38	10.404	1.087	1.108	0.432	1.086	4.050	0.0552	0.0299	0.4106	0.2005
2	1.38	9.141	1.087	0.974	0.432	1.087	4.050	0.0388	0.0262	0.1625	0.1914

4. บทสรุป

จากผลการทดสอบแบบจำลองหนึ่งหน่วยแกนสมมาตร ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก เพื่อพิจารณาผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนเสาเข็ม พบว่าในกรณี

จากรูปที่ 9 พบว่าเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากวิธีของ Pongsivasathit et al. (2012) เข้าใกล้ผลการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ สำหรับในกรณีที่แผ่นพื้นดินซีเมนต์ ค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบอยู่ 14.22% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวิธีดังกล่าวไม่สามารถพิจารณาผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้นกับความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไปเท่ากับ 0.4

α , β (β'), p และ s_u เดียวกัน การมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดินทำให้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายน้อยกว่าการไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของกรณีการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้น

กับความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไปเท่ากับร้อยละ 0.40 กับผลการคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit et al. (2012) พบว่าให้ค่าการทรุดตัวที่เกินกว่าผลทดสอบ เป็นการยืนยันผลการศึกษาในภาคสนามของ Pongsivasathit et al. (2012) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงวิธีของ Pongsivasathit et al. (2012) ให้สามารถพิจารณาถึงผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ โดยเฉพาะในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้นต่อความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นที่อัตราส่วนต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่องการพัฒนาการใช้คันดินเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบลอยเพื่อป้องกันน้ำท่วม ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T. and Hino, T. (2009). Settlement prediction for soft ground improved by columns. **Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers**. UK. Vol. 162 : 109-119.
- [2] Chai, J. C., and Pongsivasathit S. (2010). A method for calculating consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil. **Frontiers of Architecture and Civil engineering in China**. 4(2) : 241-251.
- [3] Pongsivasathit, S., Chai, J. C. and Ding W. (2012). Consolidation settlement of floating-column-improved soft clayey deposit. **Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers**. UK. Vol. 166 : 44-58.
- [4] Pongsivasathit, S., Jitsuwan, P., Chai, J.C., and Hino. T (2014) Methodology for calculating the consolidation settlement of floating soil cement column improved soft clayey deposit. **Proc.^{9th} International Symposium on Lowland Technology**. Japan. : 285-293.
- [5] Zhu, G. and Yin, J. H. (1999). Consolidation of double soil layers under depth-dependent ramp load. **Geotechnique**. 49(3) : 415-421.
- [6] Shen, S. L., Chai, J. C. and Miura, N. (2001). Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement. **Proc.^{1st} Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics**. Elsevier Science Ltd. : 485-490.