บทความวิจัย (Research Article)

การทำนายพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปรับปรุงด้วยแถบระบายน้ำตามแนวดิ่ง

Prediction of Settlement Behavior of Soft Bangkok Clay Improved by Prefabricated Vertical Drains

วีรยา ฉิมอ้อย*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

กนกอร กันณรงค์

บริษัท อาจีกาว่าแอนด์เอสซีไอ เมทัลเทค จำกัด
อาคารทศพลแลนด์ 3 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

Weeraya Chimoye*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Kanokon Kannarong

Ajikawa & SCI Metal tech Co., Ltd.,
Thosaphol Land 3 Building, Bangna, Bangkok 10260

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยแถบระบายน้ำตามแนวดิ่ง (PVD) โดยเลือกวิธีของ Barron วิธีของ inflection point และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้กรณีศึกษาการก่อสร้างทางวิ่งของสนามบินสุวรรณภูมิ จากผลของการวิจัยพบว่าทุกวิธีการได้พฤติกรรมของการทรุดตัวสอดคล้องกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนาม วิธีของ Barron เป็นวิธีที่ใช้งานได้สะดวก เนื่องจากคำนึงถึงปัจจัยไม่มากนัก ในขณะที่วิธีของ inflection point คำนวณได้ยากกว่า แต่ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนามมากกว่า ส่วนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ผลการทรุดตัวเร็วกว่าที่เกิดขึ้นจริง โดยข้อเสีย คือ ต้องการพารามิเตอร์ที่ซับซ้อน แต่มีข้อดี คือ สามารถศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดินตามตำแหน่งต่าง ๆ และศึกษาพฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินได้

คำสำคัญ : แถบระบายน้ำตามแนวดิ่ง; การทรุดตัว; วิธี inflection point; วิธี Barron; วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research aims to study the settlement behavior of the soil improved by prefabricated vertical drain (PVD). The settlement analyzed by using Barron method, Inflection point method and

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** sweeraya@engr.tu.ac.th

doi: 10.14456/tstj.2018.29

finite element method were compared. The construction of runway of Suvarnabhumi Airport is used as case study. The results show that the settlement behaviors that calculated by all methods are according with field settlement. Barron method is the most simple since a few effects are taken to account. The Inflection point method is the most suitable for settlement analysis, but it is more difficult to calculate. By finite element method, the settlement occurs faster than the field settlement. The disadvantage of this method is the need of complex parameters of soil, but the advantage are the behavior of settlement at any point in soft clay and behavior of excess pore water pressure can be studied.

Keywords: prefabricated vertical drain; settlement; inflection point method; Barron method; finite element method

1. บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยการใช้แถบระบายน้ำตามแนวดิ่งสำหรับงานทางหรืองานถมเป็นบริเวณกว้างนั้นเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากแถบระบายน้ำตามแนวดิ่งสามารถเร่งการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักดินถมได้อย่างรวดเร็ว โดยการลดระยะทางของการระบายน้ำจากแนวดิ่งตามความหนาของชั้นดินเป็นระยะทางตามแนวรัศมีในชั้นดิน เพื่อน้ำไหลเข้าสู่แถบระบายน้ำและระบายออกไปได้ ในการออกแบบระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งนั้นต้องกำหนดระยะห่างระหว่างแถบระบายน้ำ ความยาวของแถบระบายน้ำ เพื่อให้สามารถระบายน้ำได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ ค่าสมบัติของดินที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบ คือ สัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดิน ในการติดตั้งแถบระบายน้ำตามแนวดิ่งต้องใช้ mandrel ซึ่งก่อให้เกิดการกระทบกระเทือนต่อดินโดยรอบแถบระบายน้ำตามแนวดิ่ง (smear zone) [1-3] ในการประมาณการทรุดตัวตามเวลาของชั้นดินเหนียวขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินทั้งในส่วนที่ไม่ถูกกระทบกระเทือน (undisturbed zone) และในส่วนที่ถูกกระทบกระเทือน (smear zone) ซึ่งมีอยู่หลายทฤษฎี เริ่มต้นด้วย Barron [4] เป็นทฤษฎีเริ่มต้นวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งต่อมาก็ได้มีนักวิจัยที่ศึกษาเพื่อให้การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวมีความถูกต้องมากขึ้น [5-7] นอกจากวิธีการตามสมการทางคณิตศาสตร์ วิธีการทางตัวเลข (numerical method) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนภายในดินคันทางหรือดินถม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีการปรับปรุงด้วยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง โดยวิธีสมการทางคณิตศาสตร์กับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ และข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากในสนามของโครงการก่อสร้างท่าอากาศยานสากลกรุงเทพแห่งที่ 2 (สนามบินสุวรรณภูมิ)

2. ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัว

2.1 วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Barron [4]

การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (time rate of consolidation) โดยใช้สมการอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการระบายน้ำตามแนวรัศมี ดังสมการ (1)

$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-8}{F_n} T_r\right] \quad (1)$$

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวรัศมี (T_r) สามารถหาได้จากสมการ (2)

$$T_r = \frac{C_r t}{D_e^2} \quad (2)$$

D_e = เส้นผ่านศูนย์กลางอิทธิพล ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (3) หรือ (4) ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง

D_e= 1.13S (กรณีติดตั้งแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส) (3)

D_e= 1.05S (กรณีติดตั้งแบบสามเหลี่ยม) (4)

เมื่อ S = ระยะห่างระหว่างการติดตั้ง PVD

C_r = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (5)

$$C_r = \left(\frac{k_r}{k_v}\right) C_v \quad (5)$$

สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ อัตราส่วนของค่า k_r/k_v ที่เสนอโดย [8] มีค่าโดยประมาณเท่ากับ k_r/k_v= 4-10

F_n = ค่าตัวประกอบของระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ (PVD) หาได้จากสมการ (6)

$$F_n = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \quad (6)$$

เมื่อ $n = D_e/d_w$; d_w = ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า สามารถหาได้ตามสมการ (7) [9]

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (7)$$

เมื่อ a = ความกว้างของแผ่น PVD; b = ความหนาของแผ่น PVD

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ inflection point [6]

วิธีนี้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวประกอบด้วยอัตราการทรุดตัวตามแนวดิ่งและอัตราการทรุดตัวตามแนวรัศมี ตามสมการ (8)

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r) \quad (8)$$

อัตราการทรุดตัวตามแนวดิ่ง (U_v) สามารถหาได้จากสมการ (9)

$$U_v = \frac{\sqrt{4xT_v}}{\pi} \quad (9)$$

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2} \quad (10)$$

C_v = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ซึ่งได้จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ใน [10]

อัตราการทรุดตัวตามแนวรัศมี (U_r) สามารถหาได้จากสมการ (11)

$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-8T_r}{\mu}\right] \quad (11)$$

เมื่อ $\mu = F_n + F_s + F_w$; F_n = ผลกระทบจากระยะห่างระหว่าง PVD โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (12)

$$F_n = \ln n - \frac{3}{4} \quad (12)$$

เมื่อ n = อัตราส่วนระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ = D_e/d_s; d_s = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่ดินถูกรบกวน ดังสมการที่ (13)

$$d_s = 2d_m \quad (13)$$

เมื่อ d_m = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mandrel สามารถหาได้จากสมการ (14)

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} w \times l} \quad (14)$$

F_s = ผลกระทบจากการถูกรบกวนของดิน คำนวณได้จากสมการ (15)

$$F_s = \left(\frac{k_r}{k_r'} - 1\right) \ln s \quad (15)$$

เมื่อ k_r = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมี; k_r'= สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมีของบริเวณรบกวนดิน; $s = d_s/d_w$; F_r = ผลกระทบจากแรงต้านการไหลของแผ่นระบายน้ำ (well resistance) คำนวณได้จากสมการ (16)

$$F_r = \pi \frac{2l^2 k_r}{3q_w} \quad (16)$$

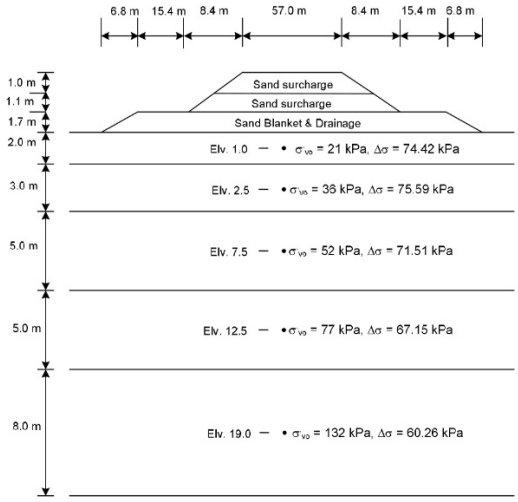
q_w = อัตราการไหลของแผ่นระบายน้ำ คำนวณได้จากสมการ (17)

$$q_w = 5l^2 k_r \quad (17)$$

เมื่อ l = ความยาวของแผ่นระบายน้ำ

3. กรณีศึกษา

รูปที่ 1 แสดงหน้าตัดของชั้นดินของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพแห่งที่ 2 ซึ่งแบ่งเป็น 5 ชั้น รายละเอียดสมบัติการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินแสดงในตารางที่ 1 [11] โดยคันดินถมสำหรับทางวิ่งแบ่งเป็น 3 ชั้น ค่าหน่วยแรงตามแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นดินเนื่องจากชั้นดินถม แสดงในรูปที่ 1 แถบระบายน้ำติดตั้งในชั้นดินเหนียว 3 ชั้นแรก มีความยาว 10 เมตร ระยะห่าง 1 เมตร ขนาดหน้าตัดของ PVD 10×0.5 ซม. ค่าพารามิเตอร์สำหรับ PVD ในการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Barron และ inflection point แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ รายละเอียดของสมบัติต่าง ๆ แสดงในวิทยานิพนธ์ของ Kunnarong [10] โดยขั้นตอนการก่อสร้างแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 1 หน้าตัดของคันดินถมและสมบัติของชั้นดิน

ตารางที่ 1 สมบัติการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่สนามบินสุวรรณภูมิ

ชนิดของดิน	ความหนา (m)	หน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีต (kPa)	อัตราส่วนช่องว่าง (e_0)	ดัชนีการยุบอัดตัว (C_c)	ดัชนีการพองตัว (C_r)	อัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR)
CH	2	110	0.90	0.2	0.04	2.4
CH	3	50	3.10	2.3	0.15	1.7
CH	5	100	2.70	1.8	0.15	1.8
CH	5	110	1.90	1.9	0.14	1.7
CL	8	140	0.70	0.1	0.02	1.0

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ PVD ตามทฤษฎีของ Barron

ระยะห่าง (cm)	D_e (cm)	d_w (cm)	d_m (cm)	d_s (cm)	n	s	F_n
100	11.3	0.668	0.93	1.85	16.9	2.774	2.088

3. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis

3.1 แบบจำลองชั้นดินและคันดินถม

วิเคราะห์พฤติกรรมเป็นแบบ plane strain โดยจำลองชั้นดินแบบเต็มรูปแบบ โดยกำหนดให้แนวกึ่งกลางคันดินไม่มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง แต่สามารถทรุดตัวตามแนวดิ่งได้อย่างอิสระ และให้แนวขอบเขตซ้ายและขวาของชั้นดินยาว 115 เมตร ซึ่งวัดจากแนวกึ่งกลางคันดิน โดยให้ขอบเขตชั้นล่างสุดของชั้นดินอยู่ที่ระดับ -23 m ไม่มีการเคลื่อนตัวทั้งแนวราบและแนว-

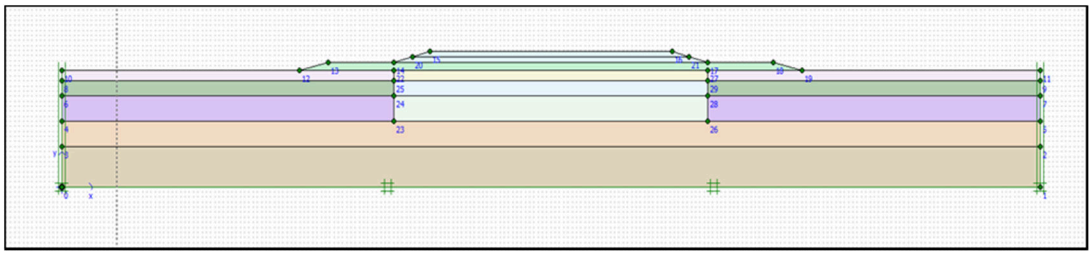
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของ PVD ตามทฤษฎีของ inflection

q_w (cm^3/sec)	k_v ($x10^{-7}$cm/sec)	k_s ($x10^{-7}$cm/sec)	k_h ($x10^{-7}$cm/sec)	F_r	F_s	F_n	μ
4.630	2.32	2.32	9.26	0.419	3.061	2.078	5.557
3.704	1.85	1.85	7.41	0.419	3.061	2.078	5.557
2.546	1.27	1.27	5.09	0.419	3.061	2.078	5.557

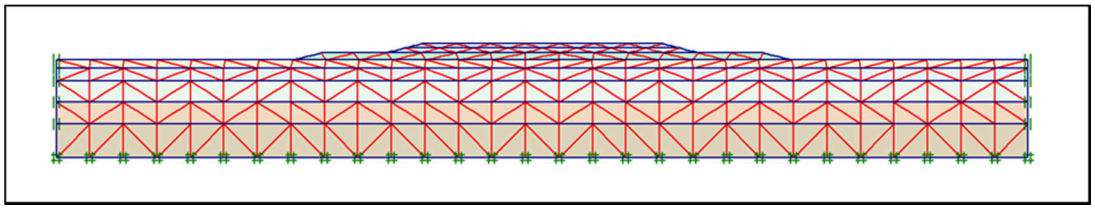
ตารางที่ 4 ลำดับในการก่อสร้างคันดิน

ระยะเวลา (วัน)	งาน
0-168	sand blanket หนา 1.7 เมตร
169-189	ปล่อยให้ชั้นดินทรุดตัว
190-217	1st surcharge load หนา 1.1 เมตร
218-318	ปล่อยให้ชั้นดินทรุดตัว
319-325	2nd Surcharge Load หนา 1.0 เมตร
326-513	ปล่อยให้ชั้นดินทรุดตัว

ดิ่ง โดยแบบจำลองคันดินถมทั้ง 3 ชั้น เป็นแบบ elastic material และแบบจำลองชั้นดินของฐานรากทั้ง 5 ชั้น กำหนดให้เป็นแบบจำลอง soft soil โดยชั้นดินที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยแถบระบายน้ำอยู่ภายในชั้นดินถมเท่านั้น และความยาวของแถบระบายน้ำยาว 10 เมตร เฉพาะในดิน 3 ชั้นด้านบนเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2 การระบายน้ำที่ผิวดินกำหนดเป็นระดับน้ำใต้ดิน และพื้นผิวระบายน้ำ โดยมีแรงดันรวมของน้ำเท่ากับศูนย์ตลอด โดยให้ระดับล่างสุดของชั้นดิน (ที่ระดับความลึก -23 m) เป็นพื้นผิวทึบน้ำ การแบ่งชิ้นส่วนย่อย ๆ (mesh) ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้มีการกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์แบบ 15 node ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แบบจำลองชั้นดินและคันดินถม



รูปที่ 3 การแบ่งชิ้นส่วนในแบบจำลอง

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินฐานราก

Parameter	Unit	ชั้นดิน				
		CH1	CH2	CH3	CH4	CL5
Model	-	undrain soft soil				
c'	kN/m^2	8	2	2	2	2
ϕ'	Degree	23	23	23	23	23
λ^*	-	0.046	0.12	0.1	0.08	0.026
κ^*	-	0.018	0.032	0.035	0.042	0.010
k_h	(cm/sec)	9.26×10^{-7}	7.41×10^{-7}	5.09×10^{-7}	6.37×10^{-7}	6.37×10^{-7}
k_v	(cm/sec)	2.32×10^{-7}	1.85×10^{-7}	1.27×10^{-7}	1.62×10^{-8}	1.62×10^{-8}
k_v (PVD)	(cm/sec)	3.44×10^{-5}	3.44×10^{-5}	3.44×10^{-5}		
γ_{sat}	kN/m^3	16	14	14	16	20
γ_{unsat}	kN/m^3	14	12	12	14	18

3.2 พารามิเตอร์สำหรับคันดินถม

แบบจำลองของคันดินถมแบบ linear elastic ชนิด drained มีค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ 2 ตัวแปร คือ ค่าอิลาสติกยังโมดูลัส (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) ใช้ค่าที่ได้จากข้อมูลผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของคันทางดินของสนามบินสุวรรณภูมิ โดยชั้นดินถมคันทางทั้ง 3 ชั้น ใช้ค่า E = 7,000 kPa และ ν = 0.2

3.3 พารามิเตอร์สำหรับดินฐานรากที่ไม่ปรับปรุงและที่ปรับปรุงด้วยแถบระบายน้ำตามแนวดิ่ง

ค่าพารามิเตอร์ของฐานราก สำหรับแบบจำลอง soft soil มีค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น คือ ค่า λ^* และค่า κ^* โดยทั้ง 2 ค่า มีความสัมพันธ์กับค่า C_c และ C_r จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำในแนวราบ (k_h) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำในแนวดิ่ง (k_v) ค่าหน่วยน้ำหนักของชั้นดินอิ่มตัว (γ_{sat}) ค่าหน่วยน้ำหนักของชั้นดินไม่อิ่มตัว (γ_{unsat}) ค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ (c') และค่ามุมเสียดทาน (ϕ') ได้จากผลการทดสอบ สำหรับชั้นดินที่มีการปรับปรุงด้วยแถบระบายน้ำตามแนวดิ่งจำลองด้วยการปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมตามแนวดิ่งให้เพิ่มขึ้นเสมือนการไหลของน้ำในแถบระบายน้ำตามแนวดิ่ง เพื่อใช้สำหรับชั้นดินที่ 1 ชั้นดินที่ 2 และชั้นดินที่ 3 โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมตามแนวดิ่งได้จากการแปลงค่าผลการทดสอบความสามารถในการระบายน้ำของแถบระบายน้ำและปรับลดด้วยตัวคูณค่าเนื่องจากอิทธิพลการพับงอเป็น 1.25 การอุดตันเป็น 3.5 [8] โดยค่าความสามารถในการระบายน้ำมีค่า 96 m^3/year และปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมตามแนวดิ่งเพิ่มขึ้น 100 เท่า สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมตามแนวราบใช้ค่าคงเดิม ค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินฐานราก แสดงในตารางที่ 5 [10]

4. ผลการวิเคราะห์การทรุดตัว

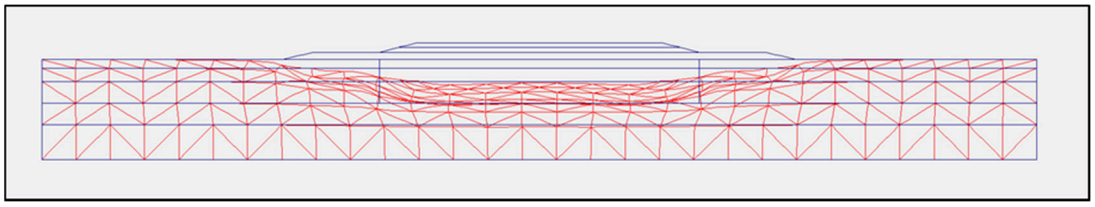
4.1 การเคลื่อนตัวของชั้นดิน

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์รูปที่ 4

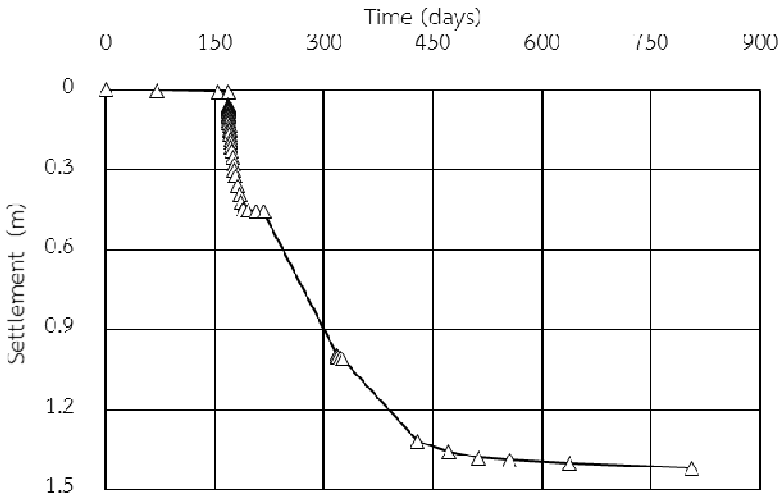
แสดงการเคลื่อนตัวของชั้นดิน (deformation mesh) เนื่องจากดินถมทั้ง 3 ชั้น พบว่าชั้นดินมีการทรุดตัวค่อนข้างมากใต้ดินถม เนื่องจากน้ำหนักของดินถม

4.2 การทรุดตัวตามแนวดิ่ง

ผลวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นดินในกรณีที่มี PVD ของการก่อสร้างคันทางดินในสนามบินสุวรรณภูมิ พบว่าปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1.42 เมตร โดยต้องใช้เวลาประมาณ 800 วัน ในการเกิดการทรุดตัวทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยในช่วงแรกที่มีการถมดินในช่วง 168 วัน ไม่เกิดการทรุดตัว แต่เมื่อมีการติดตั้ง PVD และมีการถมดินชั้นที่ 2 ชั้นดินเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลาการถมดินในขั้นที่ 3 การทรุดตัวไม่เพิ่มมากนักเนื่องจากเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ และเริ่มเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อปล่อยให้เกิดการทรุดตัวในช่วงสุดท้าย



รูปที่ 4 การทรุดตัวของแบบจำลองชั้นดินฐานราก

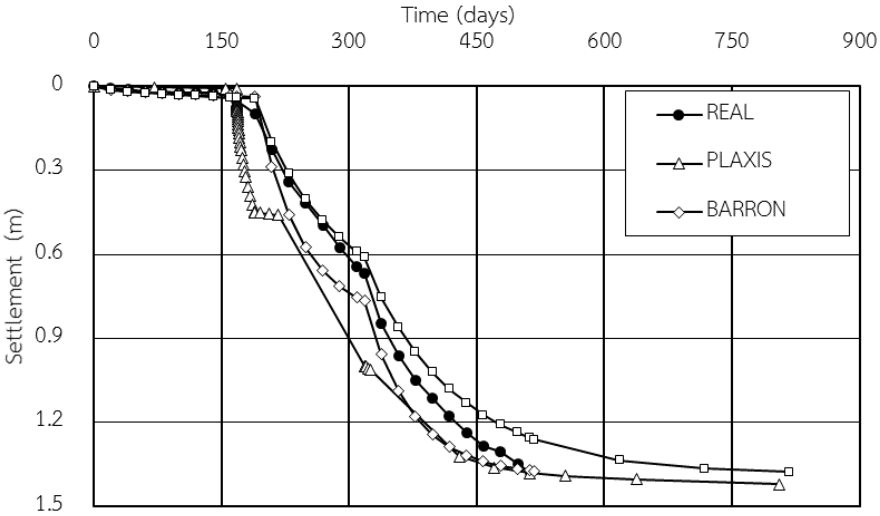


รูปที่ 5 การทรุดตัวทั้งหมดของชั้นดินกรณีที่มี PVD จากโปรแกรม Plaxis

4.3 การเปรียบเทียบการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับทฤษฎีของ Barron และ inflection point

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวตามทฤษฎีของ Barron และ inflection point สามารถดูรายละเอียดได้จาก Kannarong และ Chimoye [12] รูปที่ 6 แสดงการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินด้วยทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาเปรียบเทียบกับการทรุดตัวที่ได้จากค่าจริงในสนาม และค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีของ Barron

และทฤษฎีของ inflection point พบว่าพฤติกรรมของการเกิดการทรุดตัวจากทั้ง 3 วิธี สอดคล้องกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริง โดยทฤษฎีของ inflection นั้นเกิดการทรุดตัวในขั้นที่ 2 ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในสนาม แต่การทรุดตัวหลังจากการถมขั้นที่ 3 เกิดช้ากว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง ที่เวลา 513 วัน วิธี Barron ค่าการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้น 1.370 เมตร ในขณะที่วิธี inflection point เกิดการทรุดตัวทั้งหมด 1.255 เมตร และวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์เกิดการทรุดตัว 1.370 เมตร และค่าการทรุดตัวในสนามมีค่าเท่ากับ 1.369 เมตร โดยวิธีการของ inflection point จะเกิดการทรุดตัวทั้งหมด 1.387 เมตร ที่ระยะเวลา 830 วัน

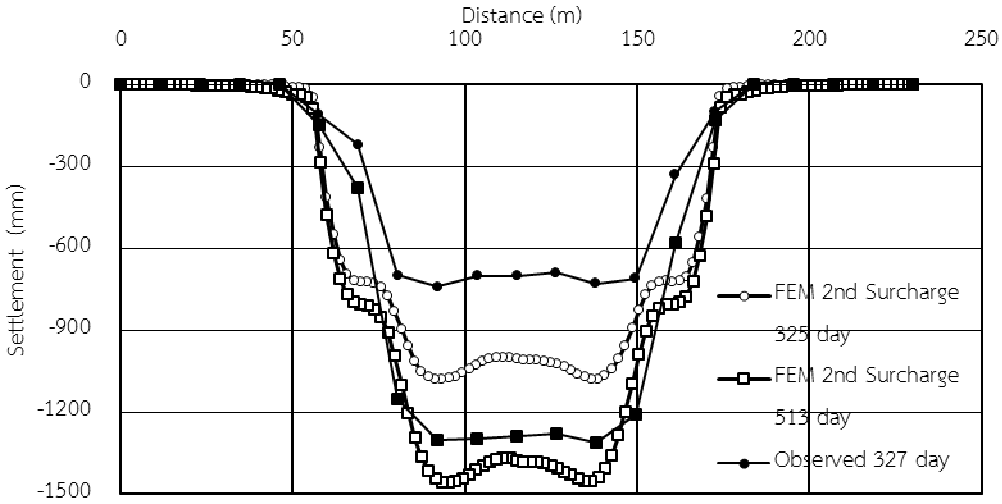


รูปที่ 6 การทรุดตัวทั้งหมดด้วยวิธีของ Barron, inflection point และไฟไนต์เอลิเมนต์

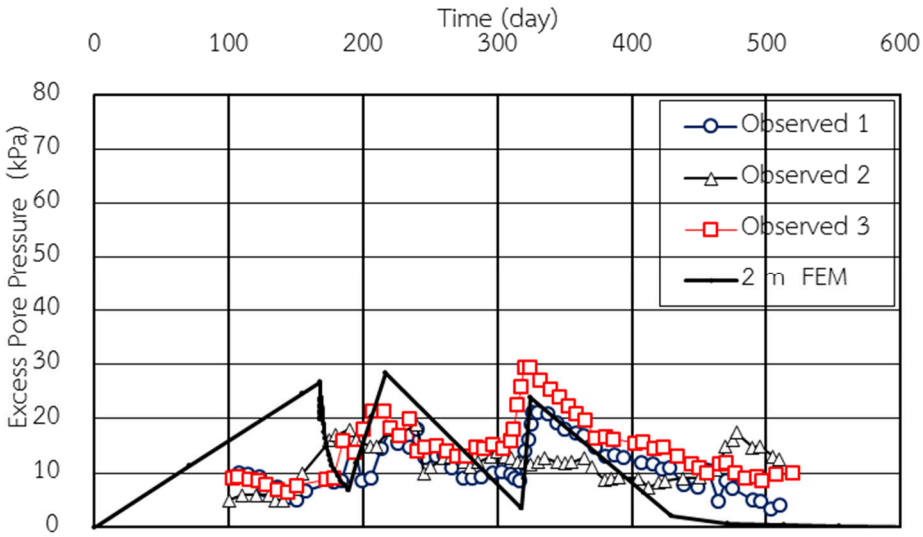
รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการทรุดตัวในแนวหน้าตัดของคันดินถมหลังจากถมขั้นที่ 3 กับการทรุดตัวจากค่าจริงจากในสนามวันที่ 327 และ 513 โดยในช่วงสัปดาห์แรกของการปล่อยน้ำหนักไว้ ณ วันที่ 327 หลังจากถมขั้นที่ 3 เสร็จ 2 วัน การทรุดตัวจากการวิเคราะห์มากกว่าค่าการทรุดตัวจริงประมาณ 1 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบ ณ วันสุดท้ายของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินในวันที่ 513 ค่าการทรุดตัวจากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริ

4.4 พฤติกรรมแรงดันน้ำส่วนเกิน

รูปที่ 8 เมื่อพิจารณาผลของแรงดันน้ำส่วนเกินของชั้นดินที่ความลึก 2 เมตร เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกครั้งที่ 1 จะเกิดค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน 23.79 kPa โดยแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นตามเวลาตลอดระยะเวลาการถมดินในแบบจำลอง 168 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ได้จากการตรวจวัดจริงซึ่งมีค่าประมาณ 8.6 kPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากในสภาพในสนามนั้น การตรวจวัดแรงดันน้ำต้องการระยะเวลาที่จะตรวจวัดได้จริง โดยแรงดันน้ำส่วนเกินค่อนข้างจะคงที่แม้ว่าจะมีการถมดินในช่วงระยะเวลาดังกล่าว หลังจากนั้นเมื่อมีการปล่อยให้เกิดการทรุดตัว 21 วัน จะเห็นได้ว่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในแบบจำลอง แรงดันน้ำส่วนเกินในสนามไม่ลดลงเลย เมื่อมีการติดตั้ง PVD และเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขั้นที่ 2 โดยใช้เวลา 27 วัน แรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์



รูปที่ 7 การทรุดตัวตามหน้าตัดของคันดินถมหลังจากถมคันดินขั้นที่ 3 และเมื่อปล่อยให้เกิดการทรุดตัว



รูปที่ 8 แรงดันน้ำส่วนเกินที่ระยะลึก 2 เมตรจากผิวดินใต้กึ่งกลางชั้นดินถม

ในแบบจำลอง จะเกิดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินประมาณ 28.49 kPa ในขณะที่ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงประมาณ 17 kPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงนี้แรงดันน้ำส่วนเกินที่ตรวจวัดได้จากในสนามนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เพราะมีการสะสมของแรงดันน้ำส่วนเกินทำให้ตรวจวัดได้เร็วขึ้น เมื่อปล่อยให้เกิดการทรุดตัวในช่วงที่ 2 เป็นเวลา 100 วัน จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่จากการตรวจวัดจริงแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าลดลงไม่มาก เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขั้นที่ 3 โดยใช้เวลา 7 วัน พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ตรวจวัดได้ในสนามมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกับในแบบจำลอง แต่พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินสะสมในสนามมีค่าสูงกว่าในแบบจำลอง ทั้งนี้เนื่องจากในการปล่อยให้เกิดการทรุดตัวในแต่ละช่วงในแบบจำลองสามารถระบายแรงดันน้ำส่วนเกินออกไปได้ แต่ในสภาพสนามจริงถึงแม้มีการติดตั้งระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งแล้วก็ตาม แต่การระบายน้ำเพียงระยะเวลาสั้น ๆ จะไม่เห็นผลมากนัก จึงทำให้ยังมีแรงดันน้ำส่วนเกินสะสมอยู่มาก อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ได้จากการวิเคราะห์สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม

5. สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์การทรุดตัวจากทั้งสามวิธีให้ที่สอดคล้องกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม โดยการทรุดตัวด้วยวิธีของ inflection point เกิดได้ช้าที่สุด เนื่องจากคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ของการติดตั้งแผ่นระบายน้ำ แม้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ inflection point จะคำนึงถึงการระบายน้ำทั้งในแนวรัศมีและแนวดิ่งก็ตาม ในขณะที่วิธีของ Barron คำนึงถึงปัจจัยจากการกระทบกระเทือนจากการติดตั้งเท่านั้น ทำให้เกิดการทรุดตัวเร็วขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีของ Barron ที่นำมาใช้งานได้สะดวกกว่า ในขณะที่วิธีของ inflection point ที่คำนึงถึงปัจจัยที่หลากหลาย จึงต้องการพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนกว่า เช่นเดียวกับวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่จำลองโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำตามแนวดิ่งของดิน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ อย่างไรก็ตาม ข้อดีของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์คือ สามารถศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดินตามตำแหน่งต่าง ๆ และศึกษาพฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินได้

6. รายการอ้างอิง

[1] Rowe, R.K. and Taechakumthorn, C., 2008, Combined effect of PVDs and reinforcement on embankments over rate-sensitive soils, Geotext. Geomemb. 26: 239-249.

[2] Shin, D.H., Lee, C., Lee, J.S. and Lee, W., 2009, Detection of smear zone using microcone and electrical resistance probe, Can. Geotech. J. 46: 719-726.

[3] Saowapakpiboon, J., Bergado, D. T., Voottipruex, P., Lam, L.G. and Nakakuma, K., 2011, PVD improvement cobined with surcharge and vacuum preloading including simulations, Geotext. Geomemb. 29: 74-82.

[4] Barron, R.A, 1948, Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Transact. ASCE 113: 718-754.

[5] Leo, C.J., 2004, Equal consolidation by vertical drains, Geotech. Geoenviron. Eng. 130: 316-326.

[6] Walker, R. and Indaratana, B., 2006, Vertical

drain consolidation with parabolic distribution of permeability in smear zone, Geotech. Geoenviron. Eng. 130: 316-326.

[7] Sinha, A.K., Havanagi, G. and Mathur, S, 2007, Inflection point method for predicting settlement of PVD improved soft clay under embankments, Geotext. Geomemb. 25: 336-345.

[8] Bergado, D.T., Alfaro, M.C. and Balasubramaniam, A.S., 1993, Improvement of soft Bangkok clay using vertical drains, Geotext. Geomemb. 12: 615-663.

[9] Hansbo, S., 1979, Consolidation of clay by band-shaped prefabficated drains, Ground Eng. 12(5): 16-25.

[10] Kunnarong, K., 2015, Settlement analysis of soft clay with and without improved by prefabricated vertical drain, M.Eng. Thesis, Thammasat University, Pathum Thani, 126 p.

[11] Pochai, J., 2003, Consolidation behaviors of soft Bangkok clay improved by PVD, M.Eng. Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 268 p.

[12] Kannarong, K. and Chimoye W., 2015, Settlement of soft clay by inflection point method for with and without PVD, Ladkrabang Eng. J. 32(3): 67-72.