

# การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยวิธี Inflection Point กรณีมี และไม่มีระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง

## Settlement of Soft Clay by Inflection Point Method for With and Without PVD

กนกกร กัณณรงค์ วิชา ฉิมอ้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

### บทคัดย่อ

บทความนี้เปรียบเทียบการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี PVD โดยเปรียบเทียบกับวิธีการของ Terzaghi ในกรณีที่ไม่มี PVD และเปรียบเทียบกับสมการของ Barron ในกรณีที่มี PVD โดยใช้กรณีศึกษา การถมทางวิ่งของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพแห่งที่ 2 ที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง จากผลการศึกษาพบว่า การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point มีค่าสูงกว่าวิธี Square Root Time ทำให้การคำนวณอัตราการทรุดตัวกรณีที่ไม่มี การปรับปรุงด้วยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งด้วยวิธี Inflection Point เร็วกว่าวิธีของ Terzaghi สำหรับกรณีที่ระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง อัตราการทรุดตัวของวิธี Inflection Point ช้ากว่าวิธีของ Barron และพบว่าอัตราการทรุดตัวด้วยวิธีการของ Barron ใกล้เคียงกับอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

**คำสำคัญ** : ดินเหนียวอ่อน การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อน ระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ อัตราการทรุดตัว

### Abstract

This paper presents the comparison of rate of settlement of soft clay by inflection point method both with and without prefabricated vertical drain (PVD) improvement, comparing with Terzaghi theory in the case of without PVD improvement and comparing with Barron method in the case of with PVD improvement. The case study of runway of the second Bangkok International Airport that have PVD improvement are used. From the results, it is found that the coefficients of consolidation by inflection point method were higher than square root time method. This causes the rate of settlement by inflection point method was faster than Terzaghi method in the case of without PVD improvement. But in the case of with PVD method, the rate of settlement by inflection point method was slower than that of Barron method. When compare with the settlement of the case history, it is found that the rate of settlement by Barron was closed to the field settlement.

**Keywords** : Embankment, Settlement of Soft Soil, Prefabricated Vertical Drained, rate of settlement

### 1. บทนำ

ในการก่อสร้างคันทางหรือคันดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากชั้นดินเหนียวอ่อนกำลังรับน้ำหนักต่ำ ทำให้ไม่สามารถก่อสร้างคันทางจนถึงความสูงที่ต้องการได้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งมีอยู่หลายวิธี แต่สำหรับกรณีที่เป็นคันทางหรือคันดินถม วิธีการปรับปรุงที่นิยมใช้ คือ น้ำหนักกดทับล่วงหน้า (Preloading) โดยการใช้การถมที่ละชั้น (Step Loading) ควบคู่กับการใช้ระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง (PVD) โดยอาศัยหลักการที่เมื่อดินเกิดการทรุดตัว ดินจะแน่นขึ้น และมีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้น โดยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งช่วยเร่งการทรุดตัวให้เกิดระหว่างกาก่อสร้างทำให้ไม่มีผลกระทบต่อคันดินถมระหว่างการใช้งาน [1, 2] ในการออกแบบการวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดมีความสำคัญมากเพราะเป็นค่าตั้งต้นในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวตามเวลา ในงานวิจัยนี้สนใจวิธี Inflection Point ที่นำเสนอโดย Cour [3] และ Robinson [4] ใช้ความสัมพันธ์อัตราการทรุดตัว (U%) กับ  $\log t$  ในการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ร้อยละ 70 ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของดินได้ทั้งในกรณีที่ไม่มีและที่มี PVD เนื่องจากการประมาณอัตราการทรุดตัวตามเวลามีความสำคัญมากในการออกแบบ เพื่อวางแผนการเพิ่มน้ำหนักในแต่ละชั้น รวมถึงทำให้ทราบถึงปริมาณการทรุดตัวที่เหลืออยู่ภายหลังการก่อสร้างทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาคันทาง ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวได้อย่างเหมาะสม ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี PVD โดยเปรียบเทียบกับวิธีการของ Terzaghi [5] ในกรณีที่ไม่มี PVD และ เปรียบเทียบกับสมการของ Barron ในกรณีที่มี PVD โดยใช้กรณีศึกษา การถมทางวิ่งของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพฯ แห่งที่ 2 (สนามบินสุวรรณภูมิ)

### 2. ทฤษฎีวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว

#### 2.1 ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดิน

ทฤษฎีของ Terzaghi [5] เป็นการหาปริมาณการทรุดตัวแบบ 1 มิติของดินเหนียวอิ่มตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำขึ้นแรก สำหรับดินอัดแน่นปกติ ตามสมการที่ (1)

$$s_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sigma'_{vo}} \right) \tag{1}$$

เมื่อ  $\sigma'_{vo}$  - หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งในปัจจุบัน  
 H = ความหนาของชั้นดินที่ทรุดตัว  
 $C_c$  - ดัชนีการยุบอัดตัว  
 $e_0$  = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น  
 $\Delta\sigma$  - หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากคันดินถม

โดยเมื่อมีการถมคันดินที่ละชั้น ทำให้เกิดการทรุดตัวก่อนที่จะมีการถมชั้นถัดไป การทรุดตัวที่เกิดจากการถมน้ำหนักชั้นที่ 1 สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2)

$$s_{c,1} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_1}{\sigma'_{vo}} \right) \tag{2}$$

เมื่อให้เกิดการทรุดตัวจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกชั้นที่ 1 เท่ากับ  $U_1\%$  ค่าการทรุดตัวที่เกิดจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกชั้นที่ 1 หาได้ด้วยสมการ (3)

$$s_1 = U_1 s_{c,1} \tag{3}$$

และเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุก n ชั้น การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสามารถหาได้จากสมการ

$$s_{cn} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_1 + \dots + \Delta\sigma_n}{\sigma'_{vo}} \right) \tag{4}$$

ค่าการทรุดตัวทั้งหมดจากการเกิดการทรุดตัวที่ละชั้นจนถึงชั้นที่ n หาได้ด้วยสมการที่ (5)

$$s_n = s_{cn} - (s_1 + \dots + s_{n-1}) \tag{5}$$

#### 2.2 อัตราการทรุดตัวกรณีที่ไม่มี PVD

กรณีของอัตราการทรุดตัวที่ไม่มีระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งใช้ทฤษฎีของ Terzaghi [5] ด้วยสมการ (6)

$$U = U_{avg} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \tag{6}$$

เมื่อ  $M = (2m+1)(\pi/2)$

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวดิ่ง ( $T_v$ ) สามารถหาได้จากสมการ (7)

$$T_v = \frac{C_v t}{H_v^2} \tag{7}$$

เมื่อ  $H_v$  = ระยะทางการไหลของน้ำ  
 $H_v = H/2$  เมื่อน้ำไหลได้สองทิศทาง

จากสมการ (6) เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการทรุดตัวขึ้นอยู่กับค่า  $C_v$  ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบการหาค่า  $C_v$  ด้วยวิธี Terzaghi ( $t_{90}$ ) [5] และวิธี Inflection point ( $t_{70}$ ) [4]

### 2.3 อัตราการทรุดตัวกรณีที่มี PVD

1) วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Barron [6] วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Time Rate of Consolidation) โดยใช้สมการอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการระบายน้ำตามแนวรัศมี ดังสมการ (8)

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

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวรัศมี ( $T_r$ ) สามารถหาได้จากสมการ (9)

$$T_r = \frac{C_v t}{D_c^2} \quad (9)$$

$D_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางอิทธิพล ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (10) หรือ (11) ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง

$$D_c = 1.13S \text{ (กรณีติดตั้งแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส)} \quad (10)$$

$$D_c = 1.05S \text{ (กรณีติดตั้งแบบสามเหลี่ยม)} \quad (11)$$

เมื่อ  $S$  = ระยะห่างระหว่างการติดตั้ง PVD

$C_r$  = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวรัศมี สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (12)

$$C_r = \left(\frac{k_r}{k_v}\right) C_v \quad (12)$$

สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ อัตราส่วนของค่า  $k_r/k_v$  ที่เสนอโดย Bergado และคณะ [7] มีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $k_r/k_v = 4-10$

$F_n$  = ค่าตัวประกอบของระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ (PVD) หาได้จากสมการ (13)

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (13)$$

เมื่อ  $n = D_c / d_w$

$d_w$  = ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า สามารถหาได้ตามสมการ (14)

$$d_w = \frac{2(a + b)}{\pi} \quad (14)$$

เมื่อ  $a$  = ความกว้างของแผ่น PVD

$b$  = ความหนาของแผ่น PVD

2) วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Inflection Point [1] โดยวิธีนี้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Time Rate of Consolidation) ประกอบด้วยอัตราการทรุดตัวตามแนวตั้งและอัตราการทรุดตัวตามแนวรัศมีตามสมการ (15)

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r) \quad (15)$$

อัตราการทรุดตัวตามแนวตั้ง ( $U_v$ ) สามารถหาได้จากสมการ (16)

$$U_v = \frac{\sqrt{4xT_v}}{\pi} \quad (16)$$

อัตราการทรุดตัวตามแนวรัศมี ( $U_r$ ) สามารถหาได้จากสมการ (17)

$$U_r = 1 - \exp\left[-\frac{8T_r}{\mu}\right] \quad (17)$$

เมื่อ  $\mu = F_n + F_s + F_w$

$F_n$  = ผลกระทบจากระยะห่างระหว่าง PVD โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (18)

$$F_n = \ln n - \frac{3}{4} \quad (18)$$

เมื่อ  $n$  = อัตราส่วนระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ -  $D_c/d_w$   
 $d_w$  = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่ดินถูกรบกวน ดังสมการที่ (19)

$$d_w = 2d_m \quad (19)$$

เมื่อ  $d_m$  = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mandrel สามารถหาได้จากสมการ (20)

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} w \times l} \quad (20)$$

$F_s$  = ผลกระทบจากการถูกรบกวนของดิน คำนวณได้จากสมการ (21)

$$F_s = \left(\frac{k_r}{k_v} - 1\right) \ln s \quad (21)$$

เมื่อ  $k_r$  = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมี

$k_v$  = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมีของบริเวณรบกวนดิน

$$s = d_w/d_r$$

$F_w$  = ผลกระทบจากแรงดันการไหลของแผ่นระบายน้ำ (Well Resistance) คำนวณได้จากสมการ (22)

$$F_r = \pi \frac{2l^2 k}{3q_w} \quad (22)$$

$q_w$  = อัตราการไหลของแผ่นระบายน้ำ คำนวณได้จากสมการ (23)

$$q_w = 5l^2 k \quad (23)$$

เมื่อ  $l$  = ความยาวของแผ่นระบายน้ำ

หลักการวิเคราะห์และข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีทั้งในกรณีมีและไม่มี PVD สามารถสรุปได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักการวิเคราะห์ของแต่ละวิธี

กรณีไม่มี PVD	หลักการวิเคราะห์	ข้อดี/ข้อเสีย
วิธี Terzaghi	ใช้ $t_{90}$	อ่านค่าได้ไม่ชัดเจน
วิธี Inflection Point	ใช้ $t_{70}$	อ่านค่าได้ง่ายและชัดเจน
กรณีมี PVD	หลักการวิเคราะห์	ข้อดี/ข้อเสีย
วิธี Barron	มีเฉพาะการระบายน้ำตามแนวตั้ง	ไม่พิจารณาผลกระทบการติดตั้ง PVD
วิธี Inflection Point	มีการระบายน้ำตามแนวตั้งและแนวรัศมี	พิจารณาผลกระทบการติดตั้ง PVD เช่น แรงต้านการไหล Smear Zone เป็นต้น

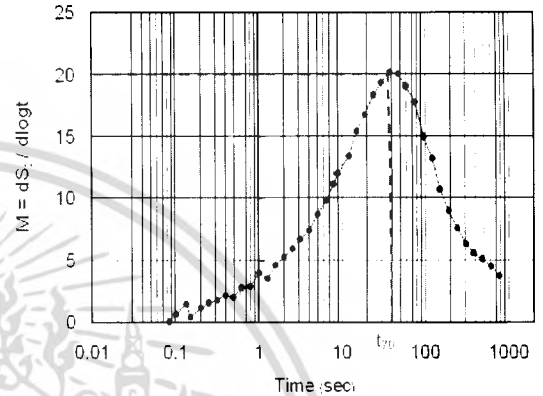
### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้ง ( $C_v$ )

1) วิธีรากที่สองของเวลา (Square Root Time) [5] หากค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้งด้วยผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ในการหาค่า  $t_{90}$  ได้จากความสัมพันธ์ของการทรุดตัวที่อ่านได้จากมาตรวัด (Dial Gauge) กับเวลาในรูปแบบของรากที่สองของเวลา (Square Root Time) ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวตั้ง ( $T_v$ ) ที่  $t_{90}$  จะมีค่าเท่ากับ 0.848 ทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้ง ( $C_v$ ) ได้จากสมการ

$$C_v = 0.848 H_u^2 / t_{90} \quad (24)$$

2) ทฤษฎีของ Inflection Point [4] โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำสามารถหาได้จากค่า  $t_{70}$  โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่า  $M$  และค่าลอการิทึมของเวลา เมื่อค่า  $M = dS_v / d \log t$  ดังแสดงในรูปที่ 1

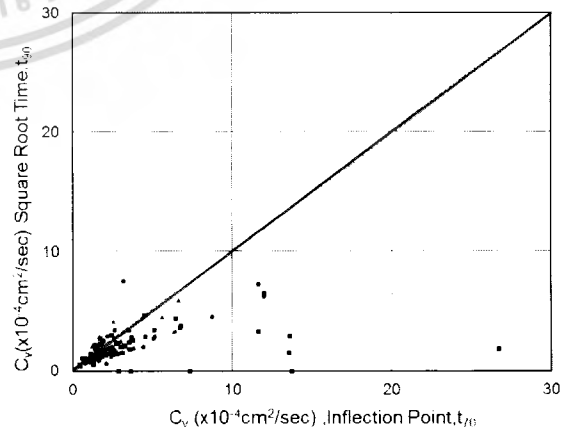


รูปที่ 1 การหาค่า  $t_{70}$  ตามวิธี Inflection Point

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวตั้ง ( $T_v$ ) ที่  $t_{70}$  จะมีค่าเท่ากับ 0.405 ทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้ง ( $C_v$ ) ได้จากสมการ

$$C_v = 0.405 H_u^2 / t_{70} \quad (25)$$

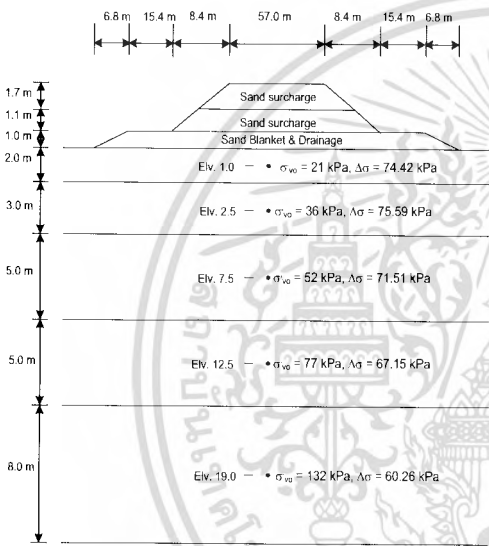
นำค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่หาได้จากทั้งสองวิธีมาแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้งของวิธี Inflection Point จะมีค่าสูงกว่าค่าของวิธี Square Root Time



รูปที่ 2 ค่า  $C_v$  ของวิธี Square Root Time และวิธี Inflection Point

**3.2 อัตราการทรุดตัวกรณีไม่มี PVD**

รูปที่ 3 แสดงหน้าตัดของชั้นดินของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพฯแห่งที่ 2 ซึ่งแบ่งเป็น 5 ชั้น โดยชั้นดินถมสำหรับทางวิ่งแบ่งเป็น 3 ชั้น ซึ่งในกรณีที่ไม่มี PVD นั้นใช้สมมุติฐานว่าการถมทั้ง 3 ชั้นทำเสร็จในชั้นตอนเดียวซึ่งทำให้เกิดการทรุดตัวในดินแต่ละชั้นตามสมการที่ (1) มีค่าเท่ากับ 0.028, 0.589, 0.281, 0.422 และ 0.067 เมตรตามลำดับ โดยปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด 1.387 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 2



**รูปที่ 3** หน้าตัดของชั้นดินถม และคุณสมบัติของชั้นดิน

สำหรับการหาอัตราการทรุดตัวในกรณีไม่มี PVD ตามสมการที่ (6) และ (7) นั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวโค้ง ซึ่งแปรผันตามหน่วยแรงกระทำ โดยค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามวิธีรากที่สองของเวลาสำหรับดินชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ

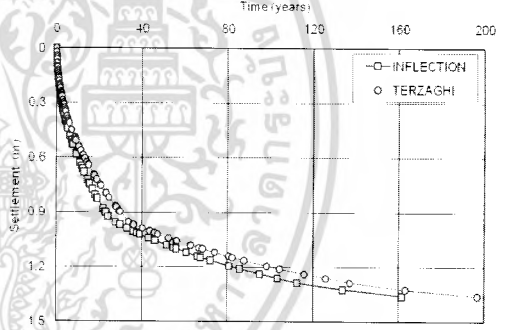
**ตารางที่ 2** ปริมาณการทรุดตัวของทางวิ่งจากชั้นดินถม

Elev	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	H (m)	$\sigma'_{vo}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{vf}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{vm}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$e_0$	$C_c$	$C_r$	$S_{vc}$ (m)
1	16	2	21	74.42	98.42	110	0.9	0.2	0.04	0.028
3.5	14	3	36	73.59	109.59	50	3.1	2.3	0.15	0.589
7.5	14	5	52	71.50	123.50	100	2.7	1.8	0.15	0.281
12.5	16	5	77	67.15	144.15	110	1.9	1.9	0.14	0.422
19	20	8	132	60.26	192.26	140	0.7	0.1	0.02	0.067

$1.8 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec และสำหรับดินชั้นที่ 3-5 มีค่าเท่ากับ  $1.7 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec

ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากวิธี Inflection Point ในดินชั้นที่ 1 และ 2 เท่ากับ  $2.5 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวโค้งเฉลี่ยของดินในชั้นที่ 3, 4 และ 5 เท่ากับ  $2.1 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec

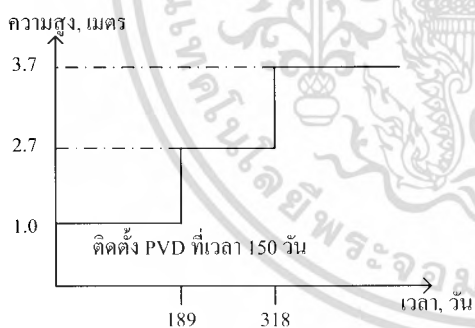
โดยผลวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินทั้งหมดกรณีที่ไม่มี PVD ของทั้งสองวิธีแสดงในรูปที่ 4 โดยวิธีของ Terzaghi จะให้ค่าอัตราการทรุดตัวร้อยละ 95 ของชั้นดินที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 5 ปี 30 ปี 126 ปี 197 ปี 82 ปี ตามลำดับ และวิธีของ Inflection Point จะให้ค่าอัตราการทรุดตัวที่ร้อยละ 95 เท่ากับ 3.5 ปี 22.7 ปี 103 ปี 162 ปี 68 ปี ของชั้นดินที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ



**รูปที่ 4** เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวทั้งหมดของชั้นดินตามวิธี Terzaghi และวิธี Inflection Point

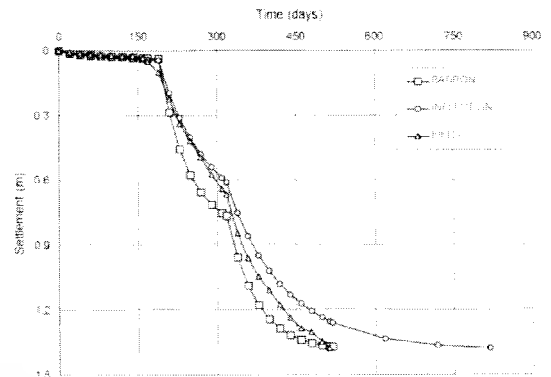
### 3.3 อัตราการทรุดตัวกรณีมี PVD

ในกรณีที่มี PVD นั้นการถล่มคันดินตามแสดงในรูปที่ 3 จะใช้ขั้นตอนการถมตามที่เกิดขึ้นจริงในสนาม โดยในแต่ละชั้นมีช่วงเวลาที่พักเพื่อให้เกิดการทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการถมและระยะเวลาที่ทำให้เกิดการทรุดตัว การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการถมหน้าทับบรรทุกทุกชั้นที่ 1 โดยเริ่มติดตั้ง PVD เมื่อเวลาผ่านไป 150 วัน มีค่า 0.038 เมตร และในชั้นที่ 2 ได้เริ่มถมเมื่อเวลาผ่านไป 189 วัน และทิ้งไว้ประมาณ 130 วัน จึงเริ่มถมชั้นสุดท้าย และทิ้งไว้โดยวัดการทรุดตัวครั้งสุดท้ายที่ 513 วัน เมื่อมีการติดตั้ง PVD แล้ว การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีของ Barron มีค่าการทรุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.728 และ 0.603 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันค่าผลการทรุดตัวที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Inflection Point ค่าการทรุดขึ้นที่เกิดขึ้นจากการถมหน้าทับบรรทุกทุกชั้นที่ 2 เท่ากับ 0.567 เมตร และค่าการทรุดขึ้นที่เกิดขึ้นจากการถมหน้าทับบรรทุกทุกชั้นที่ 3 ของดินเท่ากับ 0.643 โดยผลการวิเคราะห์การทรุดตัวทั้งสองวิธีการนั้นให้ผลการทรุดตัวรวมมีค่าเท่ากับ 1.387 เมตร และเท่ากับผลการทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยให้การถมเป็นครั้งเดียวในกรณีที่ไม่มี PVD



รูปที่ 5 ขั้นตอนการถมในแต่ละชั้น

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทรุดตัวกับเวลาในกรณีที่มี PVD จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีเทียบกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม พบว่าวิธีการของ Barron ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ในขณะที่อัตราการทรุดตัวด้วยวิธีของ Inflection Point ช้ากว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนามเนื่องจากวิธีการของ Inflection Point คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งแผ่นระบายน้ำ ผลกระทบของบริเวณที่ดินถูกรบกวน (Smear Zone) และผลกระทบจากแรงดันการไหลของแผ่นระบายน้ำ



รูปที่ 6 อัตราการทรุดตัวของดินตามวิธีของ Barron วิธีของ Inflection Point เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม

## 4. สรุปผลการศึกษา

- 1.) ผลการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวในกรณีชั้นดินที่ไม่มี PVD โดยใช้การวิเคราะห์ 2 วิธีคือ วิธีของ Terzaghi และวิธีของ Inflection Point พบว่าอัตราการทรุดตัวด้วยวิธีของ Inflection Point เร็วกว่าวิธีการของ Terzaghi
- 2.) ผลการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวในกรณีชั้นดินที่มี PVD พบว่าอัตราการทรุดตัวด้วยวิธีการของ Barron ให้ค่าใกล้เคียงกับอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนาม และอัตราการทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point จะเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนาม

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.K. Sinha, G. Havanagi, and S. Mathur, "Inflection point method for predicting settlement of PVD improved soft clay under embankments, Geotextiles and Geomembranes, Vol.25, pp.336- 345, April, 2007.
- [2] C.J. Leo, "Equal consolidation by vertical drains,," J. Geotech. Geoenviron Eng., Vol.131, No.10, pp.1317-1317, October, 2005.
- [3] F.R. Cour, "Inflection Point Method for Computing  $C_v$ ," Journal of the Soil Mechanics. Foundation Div, ASCE, Vol.97, No.5, pp. 827-831, August, 1971.
- [4] R.G. Robinson, "Consolidation analysis by inflection point method,," J. Geotech. Geoenviron Eng, Vol.47, No.1, pp.199-200, February, 1997.
- [5] K. Terzaghi, "Theoretical soil mechanics,," John Wiley and Sons, Inc., New York, 1943
- [6] R.A. Barron, "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells,," Transactions of ASCE, Vol.113, pp.718-754, January, 1948.
- [7] D.T. Bergado, J.C. Chai, M.C. Alfaro and A.S. Balasubramaniam, "Improvement Techniques of Soft Ground in Subsideind and Lowland Environment,," AIT, 1992 ดานการศา