

## การประเมินตึกรการอัดตัวคายนํ้าสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยวิธีอาซากะ Evaluation of Consolidation Degree for Soft Bangkok Clay by the Asaoka Method

สินัด โกศลนันท์<sup>1\*</sup> ชัยศาสตร์ สกุกศักดิ์ศรี<sup>2</sup> และ อลงกต ไชยอุปละ<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จ.จันทบุรี

<sup>2</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

\*Corresponding author; E-mail address: sinat.k@rbru.ac.th

### บทคัดย่อ

การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีการใช้แผ่นระบายน้ำแนวตั้งร่วมกับน้ำหนักกดทับเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งมีโครงการก่อสร้างใหญ่ ๆ ที่ใช้วิธีนี้เช่น โครงการก่อสร้างถนนมอเตอร์เวย์สายกรุงเทพ-ชลบุรี โครงการก่อสร้างถนนวงแหวนรอบนอก และโครงการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับทางจอด ทางวิ่ง และทางขับเครื่องบิน ที่สนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ เป็นต้น การประเมินตึกรการอัดตัวคายนํ้า นับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อใช้เป็นหนึ่งในดัชนีสำหรับการตัดสินใจย้ายน้ำหนักกดทับออกจากพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน การวิเคราะห์นี้สามารถทำได้โดยการสังเกตในสนามจากการวัดการทรุดตัวของดินที่ปรับปรุงจากแผ่นวัดการทรุดตัว ข้อมูลการทรุดตัวในสนามถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีของอาซากะเพื่อทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักกดทับและตึกรการอัดตัวคายนํ้า รวมถึงการวิเคราะห์ย้อนกลับของข้อมูลการทรุดตัวสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าตามแนวราบได้ วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุด ตึกรการอัดตัวคายนํ้า และค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าตามแนวราบด้วยวิธีอาซากะ โดยอาศัยข้อมูลการทรุดตัวในสนามของโครงการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับทางจอด ทางวิ่ง และทางขับเครื่องบิน ที่สนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ช่วงเวลาประเมินที่ยาวนานจะได้ค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ได้ตึกรการอัดตัวคายนํ้าที่ลดลงและสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าตามแนวราบน้อยลงด้วย และ ความห่างของข้อมูลไม่มีผลต่อการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุด ตึกรการอัดตัวคายนํ้า และสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าตามแนวราบ นอกจากนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาสามารถสร้างได้โดยง่ายจากค่านวมย้อนหลัง ซึ่งหากระยะเวลาอ่านข้อมูลมากก็จะให้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลในสนามมาก

คำสำคัญ: ตึกรการอัดตัวคายนํ้า, ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, วิธีอาซากะ, แผ่นระบายน้ำแนวตั้ง

### Abstract

Ground improvement of soft clay by prefabricated vertical drains with preloading is one of the most widely-used methods in the world especially in Thailand, there are the mega projects using this technique such as the Bangkok-Chonburi motorway project, the outer Bangkok ring road project and the ground improvement for airside pavements project at Suvarnabhumi international airport. Evaluation of consolidation degree is very important as one of the indicators for making decision prior to the removal of preloading. This analysis can be estimated by field observational methods from settlement data of surface settlement plates. The field settlement data can be analyzed by the Asaoka method to predict the ultimate settlement of soft Bangkok clay under preloading. Back-Analysis of the settlement data will yield horizontal coefficient of consolidation. The objective of this paper is to study on the various factors that affect prediction by the Asaoka evaluation method. The results show that in the Asaoka method, the value of ultimate settlement increases, consolidation degree and horizontal coefficient of consolidation decrease as a longer period of evaluation is used. Interval of time for readings is not affected on prediction of ultimate settlement, consolidation degree and horizontal coefficient of consolidation. Furthermore, settlement curve with time can be plotted easily by back calculation equation that agrees well with field data.

Keywords: Consolidation degree, Soft Bangkok clay, the Asaoka method, Prefabricated vertical drains, Ultimate settlement

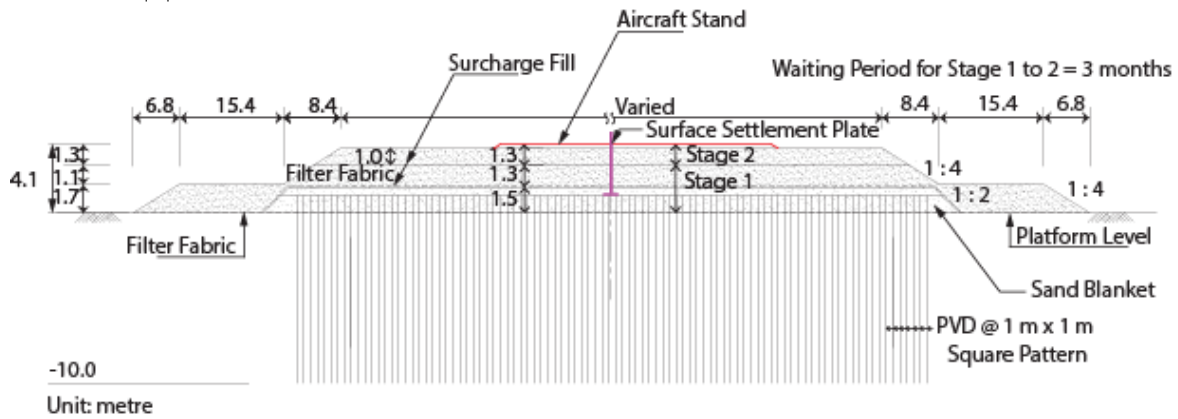
### 1. คำนำ

การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีการใช้แผ่นระบายน้ำแนวตั้งร่วมกับน้ำหนักกดทับเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งมีโครงการก่อสร้างใหญ่ ๆ ที่ใช้วิธีนี้เช่น โครงการก่อสร้างถนนมอเตอร์เวย์สายกรุงเทพ-ชลบุรี [1] โครงการก่อสร้างถนนวงแหวนรอบนอก [2] และ

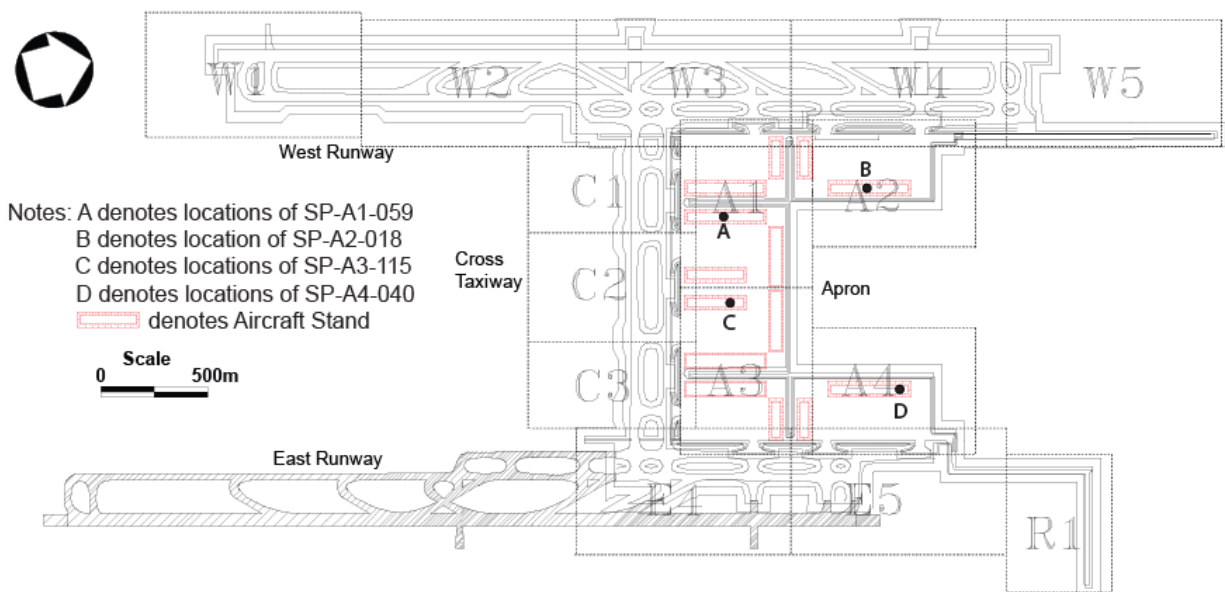
โครงการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับลานจอด ทางวิ่ง และทางขับเครื่องบิน ที่สนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ [3] เป็นต้น

โครงการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับลานจอด ทางวิ่ง และทางขับเครื่องบิน เฟสที่ 1 ที่สนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิได้ก่อสร้างสำเร็จตั้งแต่ปี พุทธศักราช 2546 และสนามบินได้เปิดให้บริการในปีพุทธศักราช 2549 มีมูลค่าโครงการ 8,240 ล้านบาท โดยแผนภาพพื้นที่โครงการแสดงในรูปที่ 1 ขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพดินนี้ประกอบด้วย การติดตั้งแผ่นระบายน้ำ

แนวตั้ง ตามด้วยการถมน้ำหนักกดทับจากหินคลุกลงไปเป็นน้ำหนักกดทับ และเร่งการอัดตัวคายน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อน จากนั้นจึงย้ายน้ำหนักกดทับ ออก ในโครงการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนเช่นนี้ ดิกรการอัดตัวคาย น้ำจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง และถูกใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ว่า ดินที่ปรับปรุง คุณภาพนั้นมีคุณสมบัติสามารถรับน้ำหนักใช้งานได้แล้ว จึงจะสามารถย้าย น้ำหนักกดทับออกไปได้ การวิเคราะห์นั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธีการสังเกตใน



รูปที่ 1 แผนภาพพื้นที่โครงการ ตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่นวัดการทรุดตัว และตำแหน่งลานจอดเครื่องบิน



รูปที่ 2 รูปตัดทั่วไปของคันดินในโครงการและแผ่นวัดการทรุดตัว

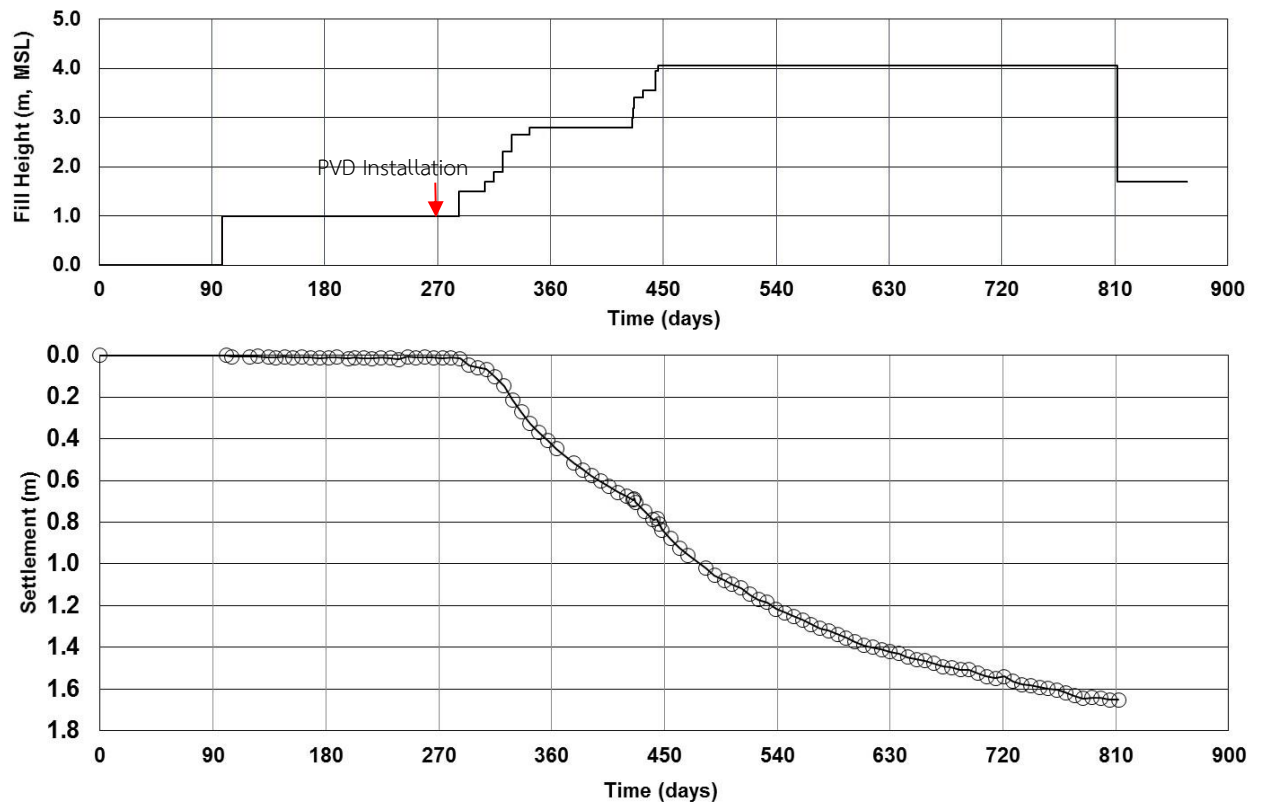
สนามด้วยข้อมูลการทรุดตัวจากแผ่นวัดการทรุดตัวซึ่งมีการบันทึกค่าไว้โดยตลอด ตั้งแต่ช่วงติดตั้งเครื่องมือก่อนทำการปรับปรุงคุณภาพดินจนกระทั่งปรับปรุงคุณภาพดินเสร็จและนำน้ำหนักกดทับออก

โครงการนี้เริ่มจากการปรับระดับสภาพดินเดิมให้อยู่ที่ระดับ 0.0 เมตร จากระดับน้ำทะเล ทว่าพื้นที่ที่ปรับปรุงดิน จากนั้นพื้นที่ถูกปูทับด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ที่ทวีบริเวณ แล้วนำทรายมาถมสูงเป็นชั้น ๆ โดยแผ่นระบายน้ำแนวตั้งจะถูกติดตั้งจากระดับชั้นทรายที่ถมสูง 1.0 เมตร จนถึงความลึกที่

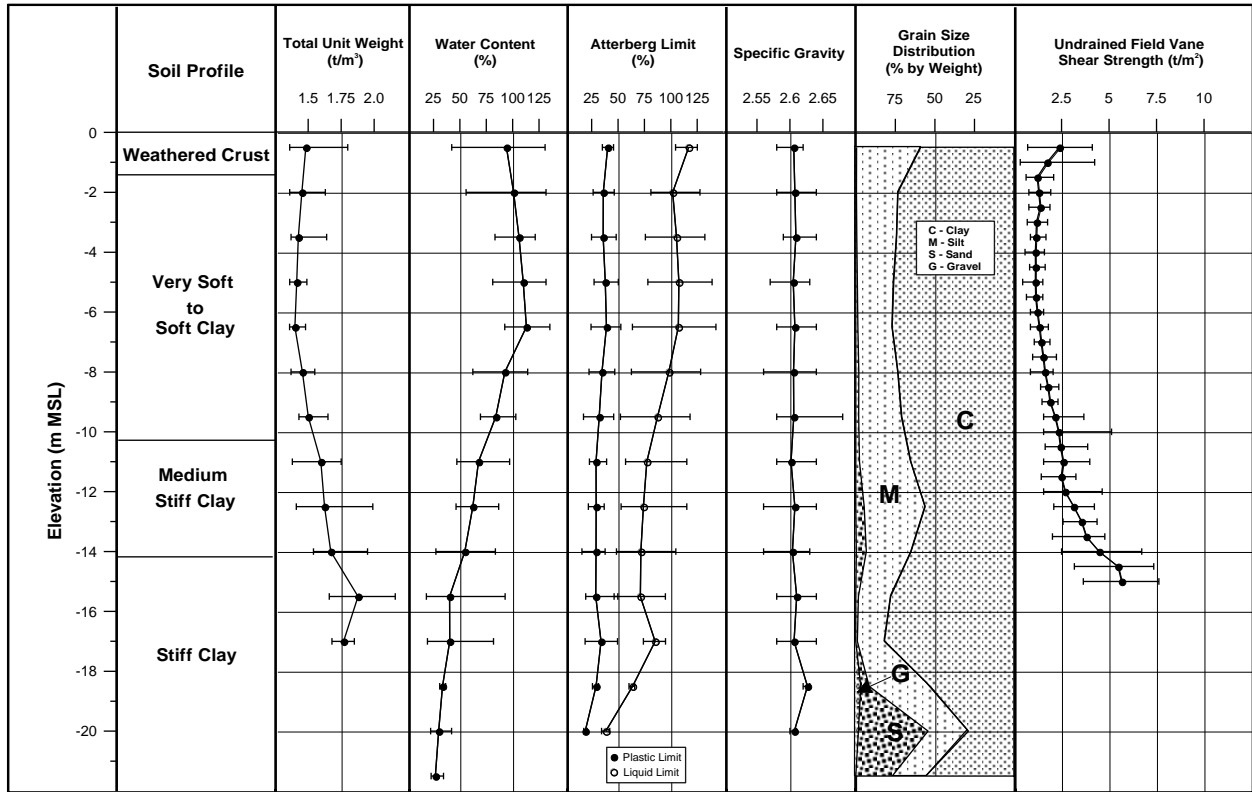
ระดับ -10 เมตรจากระดับน้ำทะเล ในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีระยะห่างกัน 1.0 เมตร และถมต่อไปจนถึงระดับ 1.5 เมตร จากระดับน้ำทะเล จะปูด้วยแผ่นใยสังเคราะห์อีกครั้ง แล้วถมต่อด้วยหินคลุกซึ่งใช้เป็นน้ำหนักกดทับในชั้นที่ 1 จนถึงระดับ 2.8 เมตร จากระดับน้ำทะเล จากนั้นรอเวลาอีก 3 เดือนเพื่อให้ชั้นดินเหนียวอ่อนมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจึงถมหินคลุกต่อในชั้นที่ 2 จนถึงระดับ 3.8 เมตร จากระดับน้ำทะเล จากนั้นรอเวลาอีกประมาณ 6 เดือน ในพื้นที่ทั่วไป แต่บริเวณที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นพื้นที่

บริเวณลานจอดเครื่องบินซึ่งรับน้ำหนักมากกว่าบริเวณทั่วไป ทำให้ต้องเพิ่มน้ำหนักก่ดทับในชั้นที่ 2 จากถึงระดับ 3.8 เมตร เป็น ระดับที่ประมาณ 4.1 เมตร หรือน้ำหนักก่ดทับรวม 8.5 ตันต่อตารางเมตร ดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 1 และเพิ่มระยะเวลารอคอยจากอย่างน้อย 6 เดือน เป็นอย่างน้อย 9 เดือน ซึ่งเป็นโอกาสอันดีที่จะใช้พื้นที่นี้ในการศึกษาเนื่องจากใช้เวลาในการอ่านค่าแผ่นวัดการทรุดตัวนานกว่าพื้นที่อื่น ๆ โดยมีลักษณะเป็นคันดินดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีการติดตั้งแผ่นวัดการทรุดตัวที่ระดับ 1 เมตรจากระดับน้ำทะเล และเมื่อเสร็จสิ้นการปรับปรุงคุณภาพดินในแต่ละพื้นที่ น้ำหนักก่ดทับหินคลุกเหล่านี้จะถูกนำกลับไปใช้ในพื้นที่ยื่น ๆ อีก

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว และความสูงของคันดิน ผนวกกับเวลา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบหาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุด ดิกริการอัดตัวคายน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวราบด้วยวิธีของอาซาโอกะ [4] ซึ่งเป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อน และนิยมใช้กันทั่วโลก ปัจจัยที่มีผลต่อการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดและดิกริการอัดตัวคายน้ำได้แก่ ช่วงเวลาที่ใช้ในการประเมินหลังให้น้ำหนักก่ดทับสุดท้าย และช่วงห่างของข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน ในการศึกษานี้ค่าต่าง ๆ ถูกประเมินที่ช่วงเวลา 6 9 และ 12 เดือนหลังจากให้น้ำหนักก่ดทับ โดยมีช่วงความห่างของข้อมูล ตั้งแต่ 7 ถึง 56 วัน



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว และความสูงของคันดิน ผนวกกับเวลาของแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059



รูปที่ 4 คุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินในโครงการ

## 2. สภาพชั้นดิน

สภาพชั้นดินในโครงการก่อสร้างซึ่งตั้งอยู่บริเวณหนองงูเห่า อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ นั้นเกิดจากการฟอร์มตัวของสามเหลี่ยมแม่น้ำเจ้าพระยา พร้อมด้วยอิทธิพลการขึ้นลงของระดับน้ำทะเล การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลทำให้เกิดการสะสมและชะล้างของตะกอน ซึ่งทำให้อุณหภูมิขนาดเล็กถูกพัดพาขึ้นมาตกตะกอนอยู่ด้านบน โดยตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการลดต่ำลงของที่ราบเจ้าพระยาลงนั้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างเปลือกโลกในสมัย Tertiary ตอนปลาย และ วัฏจักรของการตกตะกอน [5]

การสำรวจดินในพื้นที่สนามบินนั้นมีการสำรวจอย่างต่อเนื่องในหลายช่วงตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2515 โดยผลการสำรวจพบว่า ดินบริเวณหนองงูเห่ามีสภาพดินเป็นชั้นดินสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดพื้นที่โครงการซึ่งประกอบด้วยชั้นหน้าดิน (Weather crust) เกิดเนื่องจากวัฏจักรเปียกและแห้งของดินสลับกันพร้อมกับซีเมนต์ธรรมชาติมีความหนาประมาณ 1-2 เมตร โดยวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ซึ่งเรียกว่า “ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay)” จนถึงความลึกประมาณ 8-11 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง (Medium stiff to stiff clay) จนกระทั่งถึงความลึกประมาณ 20 เมตร การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของดินตามความลึกนั้นเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของดินตะกอนทราย (Silt) หรือ ทรายละเอียด (Fine sand) และการลดลงของปริมาณดินเหนียว ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 1.5 เมตร ได้ชั้นดินเหนียวแข็งเป็นชั้นทรายแน่น (Dense sand) สลับกับชั้นดินเหนียวแข็ง

(Stiff clay) และดินทรายปนดินเหนียว (clayey Sand) จนถึงระดับความลึก 155 เมตร สำหรับชั้นดินที่จะปรับปรุงคุณภาพในโครงการนี้ได้แก่ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่อยู่ในชั้นตั้งแต่ความลึกที่ 1-2 เมตรจนถึงประมาณ 8-11 เมตรซึ่งมีปริมาณความชื้น (Water content) มากกว่า 100% และ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Undrained shear strength) ต่ำ (น้อยกว่า 2.5 ตันต่อตารางเมตร) คุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินจนถึงความลึก 20 เมตร ได้สรุปไว้ในรูปที่ 4

## 3. การประเมินการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดและดักการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีอาซาโอเกะ

วิธีอาซาโอเกะ [4] ใช้ในการหาค่าการทรุดตัวสูงสุด และประเมินดักการอัดตัวคายน้ำในโครงการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีแผ่นระบายน้ำแนวดิ่งร่วมกับน้ำหนักกดทับ วิธีอาซาโอเกะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบได้ด้วยการวิเคราะห์ย้อนกลับ

### 3.1 การทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดและดักการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีอาซาโอเกะ

อาซาโอเกะ [4] ได้เสนอวิธีแก้ปัญหาเกี่ยวกับการอัดตัวคายน้ำที่ใช้การระบายน้ำด้วยแผ่นระบายน้ำแนวดิ่ง โดยปรับเปลี่ยนวิธีของบาร์รอน [6] ซึ่งใช้สำหรับการอัดตัวคายน้ำที่ใช้การระบายน้ำตามแนวราบเพียงอย่างเดียว ชั้นตอนของอาซาโอเกะทำได้โดยการสร้างเส้นตรงโดยสมมติให้พฤติกรรมดินเป็นไปตามสมมติฐานทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของเทอร์ซาคี

การใช้วิธีอาชานิโอะในงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยแผ่นระบายน้ำในแนวตั้ง พร้อมน้ำหนักกดทับได้ถูกทำการศึกษาโดยนักวิจัยหลายท่าน [7-11]

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีอาชานิโอะ เริ่มต้นด้วยการสร้างกราฟ การทรุดตัวกับเวลา ชุดค่าการทรุดตัว  $S_1, S_2, \dots, S_i$  จะถูกเลือกขึ้นมา และ  $S_i$  คือ ค่าการทรุดตัวที่เวลาใด ๆ  $i$  และช่วงเวลาห่าง  $\Delta t = (t_i - t_{i-1})$  ซึ่งคงที่ ลำดับต่อมาคือ การวาดจุดคู่อันดับ  $(S_{i-1}, S_i)$  ลงบนกราฟโดยค่า  $S_{i-1}$  เป็นค่าตามแนวแกน  $x$  และ  $S_i$  เป็นค่าตามแนวแกน  $y$  จุดเหล่านี้ควรเรียงตัวกันเป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$S_i = S_o + \beta S_{i-1} \quad (1)$$

ที่ซึ่ง  $S_o$  และ  $\beta$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือก ช่วงเวลาห่าง  $\Delta t$

ค่าคงที่  $\beta$  คือ ค่าความชันของกราฟเส้นตรง

ค่าการทรุดตัวสูงสุดสามารถทำนายได้จากจุดตัดระหว่างเส้นตรงนี้ กับ เส้นที่ทำมุม  $45^\circ$  ในกรณีที่มีการถมน้ำหนักกดทับ เส้นตรงนี้จะเบี่ยงเข้าตัด เส้นที่ทำมุม  $45^\circ$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากจุดตัดของสองสมการเส้นตรง ดังนี้

$$S_{ult} = \frac{S_o}{1-\beta} \quad (2)$$

จากค่าการทรุดตัวที่วัดได้ และค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ทำนายได้ คีกรี การอัดตัวคายน้ำสามารถประมาณได้จาก

$$U_i\% = S_i/S_{ult} \times 100\% \quad (3)$$

ที่ซึ่ง  $S_{ult}$  คือ ค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ทำนายได้ด้วยวิธีอาชานิโอะ และ  $U_i\%$  คือ ค่าคีกรีการอัดตัวคายน้ำที่เวลาใด ๆ  $t = t_i$

### 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบด้วยวิธีอาชานิโอะ

การหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวรัศมี ( $C_r$ ) หาได้จาก สมการของบาร์รอน [6] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่มีความเครียดเท่ากัน (Equal-strain settlement) กับเวลา และต่อมาได้ถูก พัฒนาให้รวมผลกระทบจากการรบกวนของดิน (Smear) และจากแรงดัน การไหลของแผ่นระบายน้ำ (Well resistance) [12] ดังนี้

$$S_i = S_{ult} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-8c_r t_i}{\mu d_e^2}\right) \right] \quad (4)$$

ที่ซึ่ง

$$\mu = F_n + F_s + F_r \quad (5)$$

โดยที่  $F_n$  คือ ผลกระทบจากระยะห่างระหว่าง PVD สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (6)

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

เมื่อ  $n$  คือ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างกับระยะเส้นรอบรูปของแผ่นระบาย น้ำแนวตั้ง  $= d_e/d_w$ ;  $d_e = 1.13 x$  ระยะห่างแผ่นระบายน้ำแนวตั้ง สำหรับการ ติดตั้งแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส;  $d_e = 1.05 x$  ระยะห่างแผ่นระบายน้ำ แนวตั้ง สำหรับการติดตั้งแบบสามเหลี่ยม;  $d_w = [2(a + b)]/\pi$  เมื่อ  $a$  คือ ความกว้าง และ  $b$  คือ ความหนาของแผ่นระบายน้ำแนวตั้ง  $F_r$  คือ ผลกระทบจากการรบกวนของดิน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$F_r = \left( \frac{k_r}{k_r'} - 1 \right) \ln(s) \quad (7)$$

เมื่อ  $k_r$  = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมี;  $k_r'$  = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำ ตามแนวรัศมีในดินที่ถูกรบกวน;  $s = d_e/d_w$ ;  $d_s$  = ความยาวเส้นผ่าน ศูนย์กลางของดินบริเวณที่ถูกรบกวน โดยที่  $d_s = 2d_m$  และ  $d_m$  = ความ ยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mandrel สามารถหาได้จากสมการที่ (8)

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} w \times l} \quad (8)$$

เมื่อ  $w$  = ความกว้างของ Mandrel และ  $l$  = ความยาวของ Mandrel

$F_r$  คือ ผลกระทบจากแรงดันการไหลของแผ่นระบายน้ำ สามารถคำนวณ ได้จากสมการที่ (9)

$$F_r = \pi \frac{2l^2 k_r}{3q_w} \quad (9)$$

เมื่อ  $q_w$  = อัตราการไหลของแผ่นระบายน้ำ คำนวณได้จากสมการที่ (10) [13]

$$q_w = 5l^2 k_r \quad (10)$$

เมื่อ  $l$  = ความยาวของแผ่นระบายน้ำ

พิจารณาการทรุดตัวเมื่อเวลาผ่าน  $t = t_i$  (สมการที่ (4)) และ  $t = t_{i-1}$  (สมการที่ (11))

$$S_{i-1} = S_{ult} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-8c_r t_{i-1}}{\mu d_e^2}\right) \right] \quad (11)$$

จัดรูปสมการ (4) และ (11) ใหม่ และนำสมการมาหารกันเพื่อหาค่า  $\beta$  ซึ่งเป็นความชันของกราฟความสัมพันธ์  $S_{i-1}$  กับ  $S_i$  ในสมการ (4) จะได้

$$\frac{S_{ult}-S_i}{S_{ult}-S_{i-1}} = \exp\left[\frac{-8c_r}{\mu d_e^2} (t_i - t_{i-1})\right] \quad (12)$$

แทนค่า  $\beta$  สำหรับความชัน และ ให้  $t_i - t_{i-1} = \Delta t$  จะได้

$$\ln \beta = \frac{-8c_r}{\mu d_e^2} \Delta t \quad (13)$$

และ

$$c_r = \frac{-\ln \beta d_e^2 \mu}{8\Delta t} \quad (14)$$

แทนค่า สมการที่ (14) ลงในสมการที่ (4) จะได้

$$S_i = S_{utt} \left[ 1 - \exp\left(\frac{\ln \beta t_i}{\Delta t}\right) \right] \quad (15)$$

#### 4. การประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดและดิกิริการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีอาซาโอเกะ

ข้อมูลการทรุดตัวจากแผ่นวัดการทรุดตัวที่ถูกเลือกจำนวน 4 ชุดในบริเวณลานจอดเครื่องบินดังรูปที่ 1 จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อ การทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุด ดิกิริการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์ตามแนวราบด้วยวิธีอาซาโอเกะ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำข้อมูลการทรุดตัวกับเวลาในรูปที่ 3 มาเขียนความสัมพันธ์ในสมการที่ (1) จะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 5 สำหรับแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059 ด้วยช่วงห่างของข้อมูลที่แตกต่างกันในระยะเวลา 12 เดือน

2. นำกราฟเส้นตรงที่ได้มาลากต่อโดยประมาณ หรือ ใช้วิธีการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นจะได้สมการรูปแบบเดียวกับสมการที่ (1) และจุดที่เส้นตรงตัดกับเส้นที่ทำมุม 45° คือ ค่าการทรุดตัวสูงสุด ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดในกราฟ หรือ แทนค่า  $S_0$  และ  $\beta$  ในสมการที่ (2) อีกทางหนึ่งด้วย

3. เปลี่ยนช่วงระยะห่างของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้อ่านข้อมูล ตามที่กำหนด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1 ถึง 4 สำหรับแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059 SP-A2-018 SP-A3-115 และ SP-A4-040 ตามลำดับ

4. ดิกิริการอัดตัวคายน้ำคำนวณโดยใช้สมการที่ (3) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1 ถึง 4

5. สัมประสิทธิ์ตามแนวราบหาได้จากการนำความชัน  $\beta$  ในสมการ (1) มาแทนค่าในสมการที่ (14) โดยใช้

$d_e = 1.13$  เมตร สำหรับการติดตั้งแผ่นระบายน้ำแนวตั้งในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระยะห่างด้านละ 1 เมตร

$d_w = [2(a + b)]/\pi = [2(98\text{mm} + 4\text{mm})]/\pi = 65$  มิลลิเมตร  
= 0.065 เมตร สำหรับ แผ่นระบายน้ำแนวตั้งที่มีความกว้าง 98 มิลลิเมตร และ ความหนา 4 มิลลิเมตร

$$n = d_e/d_w = 17.4 \text{ แทนค่าในสมการที่ (6) จะได้ } F_n = 2.12$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} w \times l} = \sqrt{\frac{4}{\pi} 0.045 \times 0.125} = 0.085 \text{ เมตร}$$

สำหรับ Mandrel ที่มีขนาดความกว้าง 45 มิลลิเมตร และยาว 125 มิลลิเมตร

$$d_s = 2d_m = 2(0.085) = 0.17 \text{ เมตร}$$

$$s = d_e/d_w = 0.17/0.065 = 2.6$$

ใช้  $k_r/k_r' = 5$  จากงานวิจัยของหลินและคณะ [14] แทนค่าในสมการที่ (7) จะได้  $F_s = 3.83$

$$F_r = \pi \frac{2l^2 k_r}{3q_w} = \pi \frac{2l^2 k_r}{3 \times 5l^2 k_r} = 0.42 \text{ แทนค่าในสมการที่ (5) จะได้}$$

$$\mu = 6.36$$

$\Delta t$  = ช่วงห่างของข้อมูลที่นำมาวาดกราฟ

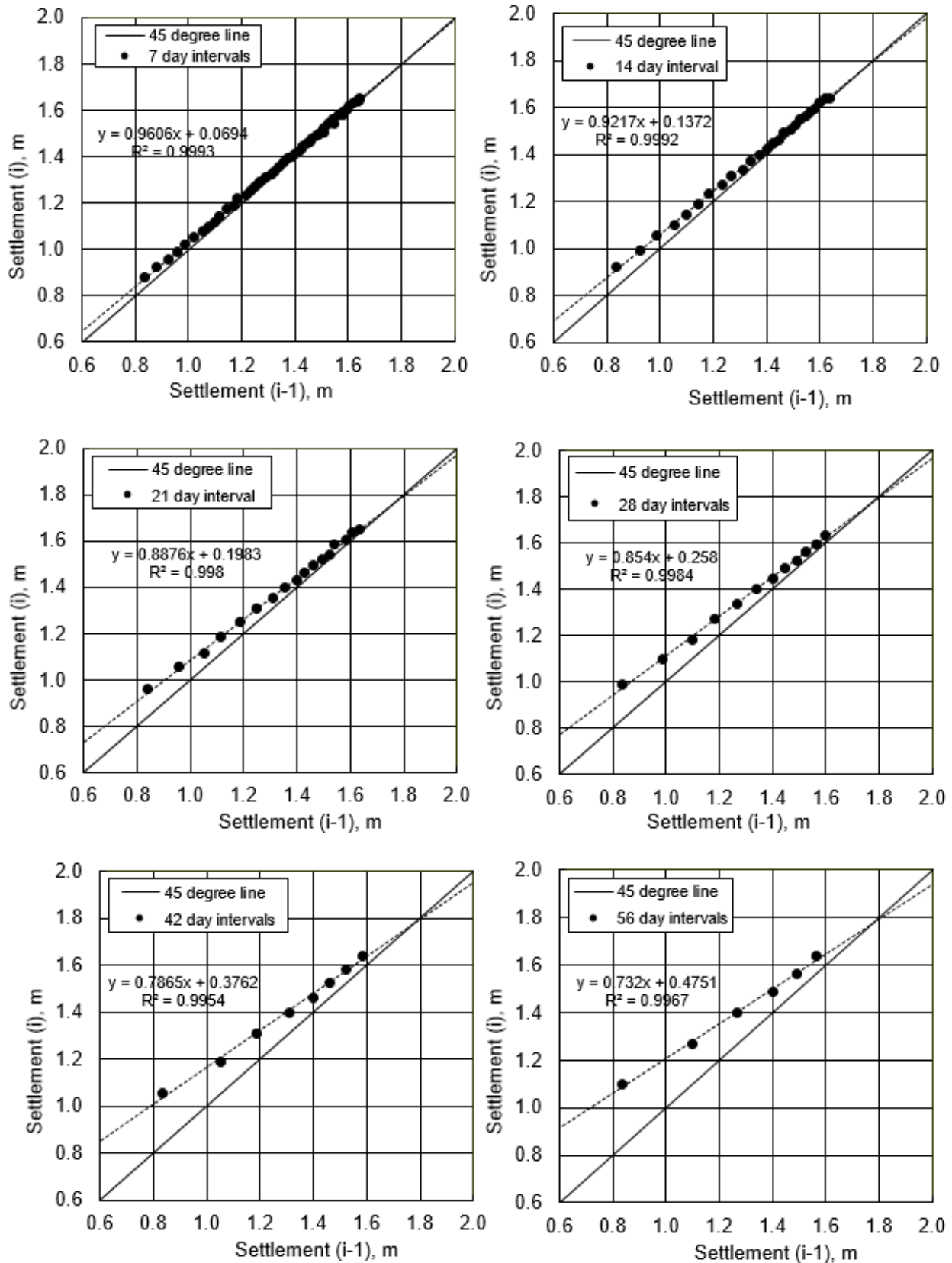
ค่าสัมประสิทธิ์ตามแนวราบจากการคำนวณได้จากสมการที่ (14) และถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ถึง 4

6. นอกจากวิธีอาซาโอเกะยังสามารถวิเคราะห์ย้อนกลับ แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการทรุดตัวขึ้นใหม่ได้จากสมการที่ (15) ซึ่งในสมการนี้จะเห็นได้ว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความชัน  $\beta$  ในสมการ (1) และ ช่วงห่างเวลา  $\Delta t$  ที่เลือกข้อมูลเท่านั้น โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์  $\mu$  หรือ  $c_r$  ในการคำนวณเลย ผลจากการคำนวณย้อนกลับในช่วงน้ำหนักกดทับขั้นสุดท้าย แสดงในรูปที่ 6 และ 7 สำหรับแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059

#### 4.1 ช่วงเวลา และช่วงห่างของข้อมูลที่ใช้ประเมิน

จากตารางที่ 1 ถึง 4 สำหรับทุกแผ่นวัดการทรุดตัว และการเปรียบเทียบการทรุดตัวกับเวลาของแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059 ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาที่นานกว่า ( 12 เดือนหลังจากให้น้ำหนักกดทับ) จะให้ค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้น และเป็นผลให้มีค่าดิกิริการอัดตัวคายน้ำที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความชันของเส้นแนวโน้มลดลง โดยค่าการทรุดตัวสูงสุดของแต่ละพื้นที่จะไม่เท่ากันซึ่งเป็นไปตามสภาพธรรมชาติของชั้นดินที่ โดยมีค่าตั้งแต่ 1.57 เมตร ถึง 2.00 เมตร

สำหรับช่วงห่างของข้อมูลไม่มีผลต่อค่าการทรุดตัวสูงสุดดังเห็นได้จากค่าในตาราง และ รูปที่ 7 ที่แสดงให้เห็นว่า ช่วงห่างของข้อมูลในแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059 ตั้งแต่ 7 ถึง 56 วัน ให้กราฟค่าการทรุดตัวกับเวลาเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน



รูปที่ 5 กราฟที่วาดด้วยวิธีอาซอเกะที่ช่วงห่างของข้อมูลแตกต่างกันในระยะเวลา 12 เดือนของแผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้ช่วงระยะเวลาและระยะห่างต่าง ๆ กันจากแผ่นการทรุดตัว SP-A1-059

Time after Final Surcharge	Parameters	Time Interval (days)					
		7	14	21	28	42	56
6 months	$\beta$	0.9506	0.9042	0.8622	0.8264	0.7409	0.6906
	$S_0$	0.0806	0.1566	0.2263	0.2880	0.4245	0.5179
	$R^2$	0.9990	0.9984	0.9966	0.9976	0.9916	0.9979
	$S_{ult} (m)$	1.631	1.635	1.643	1.659	1.638	1.674
	$S_{i(m)}$	1.410	1.410	1.410	1.410	1.410	1.410
	$U_i\%$	86.4	86.3	85.8	85.0	86.1	84.2
	$C_h (m^2/yr)$	2.68	2.66	2.62	2.52	2.64	2.45
9 months	$\beta$	0.9561	0.9143	0.8707	0.8344	0.7568	0.7004
	$S_0$	0.0746	0.1457	0.2173	0.2797	0.4083	0.5084
	$R^2$	0.9993	0.9990	0.9982	0.9988	0.9956	0.9987
	$S_{ult} (m)$	1.700	1.700	1.680	1.689	1.679	1.697
	$S_{i(m)}$	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548
	$U_i\%$	91.1	91.1	92.1	91.7	92.2	91.2
	$C_h (m^2/yr)$	2.38	2.37	2.44	2.39	2.46	2.36
12 months	$\beta$	0.9606	0.9217	0.8876	0.8540	0.7865	0.7320
	$S_0$	0.0694	0.1372	0.1983	0.2580	0.3762	0.4751
	$R^2$	0.9993	0.9992	0.9980	0.9984	0.9954	0.9967
	$S_{ult} (m)$	1.761	1.752	1.764	1.767	1.762	1.773
	$S_{i(m)}$	1.652	1.652	1.652	1.652	1.652	1.652
	$U_i\%$	93.8	94.3	93.6	93.5	93.8	93.2
	$C_h (m^2/yr)$	2.13	2.16	2.10	2.09	2.12	2.06

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้ช่วงระยะเวลาและระยะห่างต่าง ๆ กันจากแผ่นการทรุดตัว SP-A2-018

Time after Final Surcharge	Parameters	Time Interval (days)					
		7	14	21	28	42	56
6 months	$\beta$	0.9489	0.9112	0.8676	0.8293	0.7623	0.7266
	$S_0$	0.0886	0.1605	0.2383	0.3081	0.4336	0.5186
	$R^2$	0.9990	0.9985	0.9986	0.9938	0.9994	0.9991
	$S_{ult} (m)$	1.733	1.808	1.800	1.805	1.824	1.897
	$S_{i(m)}$	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502
	$U_i\%$	86.7	83.1	83.5	83.2	82.3	79.2
	$C_h (m^2/yr)$	2.78	2.46	2.50	2.48	2.39	2.11
9 months	$\beta$	0.9551	0.9132	0.8714	0.8334	0.7639	0.7123
	$S_0$	0.0816	0.1582	0.2339	0.3034	0.4316	0.5332
	$R^2$	0.9992	0.9993	0.9992	0.9970	0.9994	0.9991
	$S_{ult} (m)$	1.817	1.822	1.819	1.821	1.828	1.853
	$S_{i(m)}$	1.656	1.656	1.656	1.656	1.656	1.656
	$U_i\%$	91.1	90.9	91.1	90.9	90.6	89.4
	$C_h (m^2/yr)$	2.43	2.40	2.43	2.41	2.38	2.24
12 months	$\beta$	0.9601	0.9213	0.8849	0.8456	0.7797	0.7271
	$S_0$	0.0755	0.1484	0.2177	0.2891	0.4136	0.5169



	$R^2$	0.9994	0.9994	0.9991	0.9979	0.9990	0.9990
	$S_{ult}$ (m)	1.892	1.886	1.891	1.872	1.878	1.894
	$S_{i(m)}$	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774	1.774
	$U_i\%$	93.8	94.1	93.8	94.7	94.5	93.7
	$C_h$ ( $m^2/yr$ )	2.15	2.17	2.16	2.22	2.19	2.11

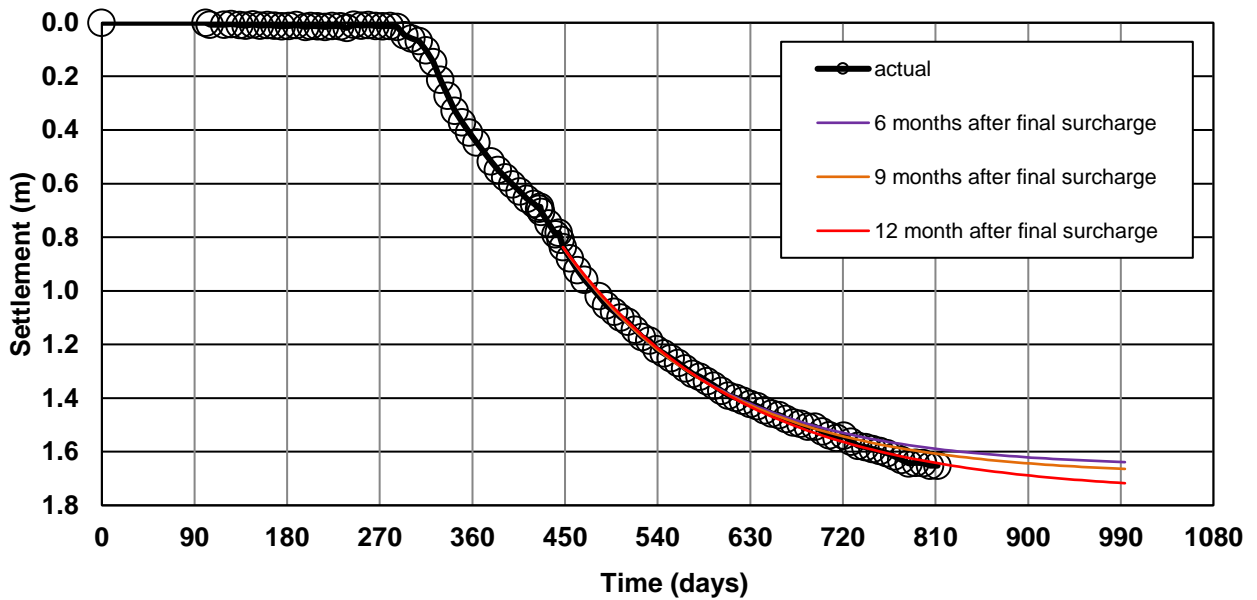
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้ช่วงระยะเวลาและระยะห่างต่าง ๆ กันจากแผนการทดสอบตัว SP-A3-115

Time after Final Surge	Parameters	Time Interval (days)					
		7	14	21	28	42	56
6 months	$\beta$	0.9484	0.9028	0.8589	0.8266	0.7394	0.6854
	$S_0$	0.0811	0.1542	0.2251	0.2813	0.4168	0.5116
	$R^2$	0.9987	0.9986	0.9996	0.9996	0.9991	1.0000
	$S_{ult}$ (m)	1.572	1.586	1.596	1.622	1.599	1.626
	$S_{i(m)}$	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375
	$U_i\%$	87.5	86.7	86.2	84.8	86.0	84.6
	$C_h$ ( $m^2/yr$ )	2.80	2.71	2.68	2.52	2.66	2.50
9 months	$\beta$	0.9562	0.9177	0.8751	0.8386	0.7610	0.6881
	$S_0$	0.0730	0.1389	0.2088	0.2692	0.3964	0.5091
	$R^2$	0.9990	0.9985	0.9992	0.9991	0.9988	1.0000
	$S_{ult}$ (m)	1.667	1.688	1.672	1.668	1.658	1.632
	$S_{i(m)}$	1.519	1.519	1.519	1.519	1.519	1.519
	$U_i\%$	91.1	90.0	90.9	91.1	91.6	93.1
	$C_h$ ( $m^2/yr$ )	2.37	2.27	2.35	2.33	2.41	2.47
12 months	$\beta$	0.9609	0.9245	0.8880	0.8569	0.7845	0.7324
	$S_0$	0.0678	0.1315	0.1948	0.2493	0.3724	0.4656
	$R^2$	0.9993	0.9990	0.9990	0.9989	0.9977	0.9966
	$S_{ult}$ (m)	1.734	1.742	1.739	1.742	1.728	1.740
	$S_{i(m)}$	1.624	1.624	1.624	1.624	1.624	1.624
	$U_i\%$	93.6	93.2	93.4	93.2	94.0	93.3
	$C_h$ ( $m^2/yr$ )	2.11	2.08	2.10	2.04	2.14	2.06

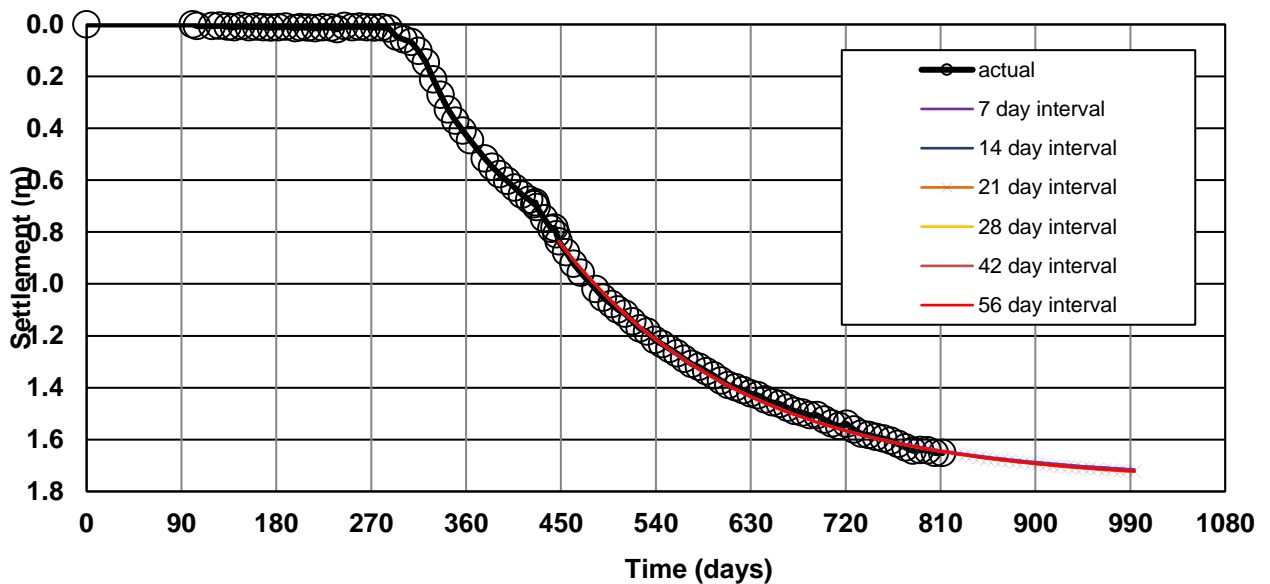
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้ช่วงระยะเวลาและระยะห่างต่าง ๆ กันจากแผนการทดสอบตัว SP-A4-040

Time after Final Surge	Parameters	Time Interval (days)					
		7	14	21	28	42	56
6 months	$\beta$	0.9457	0.8920	0.8430	0.7903	0.7149	0.6384
	$S_0$	0.0980	0.1937	0.2816	0.3734	0.5137	0.6515
	$R^2$	0.9990	0.9990	0.9942	0.9908	0.9830	0.9739
	$S_{ult}$ (m)	1.805	1.793	1.794	1.781	1.802	1.802
	$S_{i(m)}$	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
	$U_i\%$	88.6	89.2	89.2	89.9	88.8	88.8
	$C_h$ ( $m^2/yr$ )	2.95	3.02	3.01	3.11	2.96	2.97
9 months	$\beta$	0.9533	0.9121	0.8661	0.8225	0.7530	0.6760
	$S_0$	0.0886	0.1690	0.2538	0.3353	0.4694	0.6097
	$R^2$	0.9993	0.9983	0.9969	0.9951	0.9908	0.9837
	$S_{ult}$ (m)	1.898	1.923	1.895	1.889	1.900	1.882

	$S_{i(m)}$	1.736	1.736	1.736	1.736	1.736	1.736
	$U_i\%$	91.5	90.3	91.6	91.9	91.3	92.3
	$C_h (m^2/yr)$	2.53	2.43	2.54	2.58	2.50	2.59
12 months	$\beta$	0.9606	0.9223	0.8864	0.8494	0.7853	0.7266
	$S_o$	0.0791	0.1556	0.2277	0.3010	0.4294	0.5487
	$R^2$	0.9996	0.9990	0.9981	0.9970	0.9943	0.9916
	$S_{ult} (m)$	2.007	2.002	2.004	1.998	2.000	2.007
	$S_{i(m)}$	1.911	1.911	1.911	1.911	1.911	1.911
	$U_i\%$	95.2	95.5	95.4	95.6	95.6	95.2
	$C_h (m^2/yr)$	2.13	2.14	2.13	2.16	2.13	2.11



รูปที่ 6 การทรุดตัวโดยการคำนวณย้อนกลับที่แผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059 ในช่วงข้อมูลห่าง 28 วัน สำหรับช่วงเวลา 6 9 และ 12 เดือนหลังจากมีน้ำหนักกดทับขั้นสุดท้าย



รูปที่ 7 การทรุดตัวโดยการคำนวณย้อนกลับที่แผ่นวัดการทรุดตัว SP-A1-059 สำหรับช่วงเวลา 12 เดือนหลังจากมีน้ำหนักรกดทับขั้นสุดท้าย

อย่างไรก็ตามช่วงห่างของข้อมูลทีละสั้น ๆ เช่น 7 วัน มีจำนวนข้อมูลที่ทำให้ยากในการสร้างเส้นแนวโน้มที่ถูกต้อง ส่วนช่วงห่างของข้อมูลทีละยาว ๆ เช่น 42 วัน หรือ 56 วัน ต้องอาศัยช่วงเวลาที่ย่านค่านานเพียงพอเพื่อให้จำนวนข้อมูลในการสร้างเส้นแนวโน้มเพียงพอ

จากกราฟในรูปที่ 6 และ 7 ที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับแสดงให้เห็นว่า สมการที่ใช้คำนวณ กับข้อมูลที่ได้จากในสนามมีความสอดคล้องกัน โดยหากยังมีระยะเวลาการอ่านค่าที่นาน จะให้ข้อมูลที่สอดคล้องกับในสนามมากขึ้นเท่านั้น ในรูปที่ 6 สมการที่ได้จากระยะเวลาอ่าน 12 เดือนหลังจากมีน้ำหนักกดทับในเส้นสีแดง จะให้ความสอดคล้องมากที่สุด ตามด้วยระยะเวลาการอ่าน 9 เดือน และ 6 เดือนในเส้นสีส้ม และสีม่วง ตามลำดับ

#### 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบด้วยการวิเคราะห์ย้อนกลับ

ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ถึง 4 พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 2.06 ถึง 3.11 ตารางเมตรต่อปี โดยเมื่อระยะเวลาอ่านข้อมูลนานขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความชื้นของเส้นแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาอ่านมากขึ้น เช่นเดียวกันกับค่าการทรุดตัวสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบจะไม่ขึ้นอยู่กัช่วงห่างของข้อมูล มีข้อสังเกตว่า หากใช้ค่า  $\mu$  ซึ่งเป็นผลรวมของผลกระทบที่เกิดจาก ระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ การรบกวนของดิน และ แรงต้านการไหลของแผ่นระบายน้ำที่แตกต่างกัน หรือ พิจารณาเฉพาะผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยบางตัวซึ่งจะทำให้ ค่า  $\mu$  แตกต่างกันจะส่งผลให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วน

### 5. บทสรุป

การศึกษานี้มุ่งศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการประเมินวิธีการอัดตัวคายน้ำสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยวิธีฮาโอเค ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ด้วยวิธีฮาโอเค ช่วงเวลาของการอ่านข้อมูลที่นานขึ้น จะทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดมากขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าวิธีการอัดตัวคายน้ำลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบลดลง
2. ช่วงระยะห่างของข้อมูลไม่ส่งผลต่อการทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวราบ
3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาสามารถสร้างได้โดยง่ายจากคำนวณย้อนหลัง ซึ่งหากระยะเวลาอ่านข้อมูลมากก็จะได้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลในสนามมาก

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนลำดับที่ 1 ขอขอบคุณ Mr. Lin, P.C. กลุ่มบริษัทที่ปรึกษา เอ็ม เอ เอ และ Dr. Seah, T. H. บริษัท Alfageotech สำหรับการให้คำปรึกษาขณะก่อสร้างโครงการ และขอขอบคุณ คุณศราวุธ สืบไชยวังบริษัท บริษัท

เอเชียน เอ็นจิเนียริง คอนซัลแต้นส์ สำหรับการอนุเคราะห์แบบก่อสร้างโครงการ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Ruenkairergsa, T., Lin, P. C. and Sunantapongsak, S. (2001). Performance of PVD road embankment on soft Bangkok clay. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE)*, Istanbul, Turkey, 27 - 31 August 2001, pp. 2179-2182.
- [2] Suzuki, K. (2000). Supervision records of soft ground improvement for OBRR (Eastern Portion), *Proceeding of the 3rd Seminar on Ground Improvement in Highways, Department of Highways and Japan International Cooperation Agency*, Bangkok, Thailand, Vol. II, pp 7.
- [3] สีนาด โกศลานันท์ และ เพน จิ หลิน (2552). กรณีศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินสนามบินสุวรรณภูมิ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 305-310.
- [4] Asaoka, A. (1978). Observation procedure of settlement prediction. *Soil and Foundations*, 18(4), pp. 87-101.
- [5] Muktabhant, C., Teerawong, P. and Tengamuay, V. (1966). *Engineering properties of Bangkok subsoils*. Report, Chulalongkorn University, Bangkok Thailand.
- [6] Barron, R. A. (1948). Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113, pp. 718-742.
- [7] Seah, T.H., Tangthansup, B. and Wongsatian, P. (2004). Horizontal coefficient of consolidation of soft Bangkok clay. *Geotechnical Testing Journal*, 27(5), pp. 1-10.
- [8] Bergado, D.T. Alfaro, M.C. and Balasubramaniam, A. S. (1993). Improvement of soft Bangkok clay using vertical drains, Geotextiles and Geomembranes. 12, pp. 615-663.
- [9] Arulrajah, A. and Bo, M.W. (2008). Factors affecting consolidation related prediction of Singapore marine clay by observational methods. *Geotech Geol Eng*, 26, pp. 417-430.
- [10] Mesri, G. and Huvaj-Sarihan, N. (2009). The Asaoka method revisited. *Proceedings of the seventeenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE)*, Alexandria, Egypt, 5-9 October 2009, pp. 131-134.
- [11] Orleach, P. (1983). *Techniques to evaluate the field performance of vertical drains*. M.Sc. Thesis, MIT, USA.

- [12] Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. *Proceedings of the tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, Stockholm, Sweden, 15-19 June, 1981 pp. 677-682.
- [13] กนกอร กันณรงค์ (2558) การวิเคราะห์การทรุดตัวชั้นดินเหนียวกรณีไม่มีและมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบระบายน้ำตามแนวตั้ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [14] Lin, D.G., Liu, W.T., Lin, P.C. (2006). Numerical analyses of PVD improved ground at reference section of second Bangkok International Airport. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of the Second Bangkok International (Suvarnabhumi) Airport in Thailand*. Southeast Asian Geotechnical Society (SEAGS), Bangkok, Thailand, pp. 67-88.