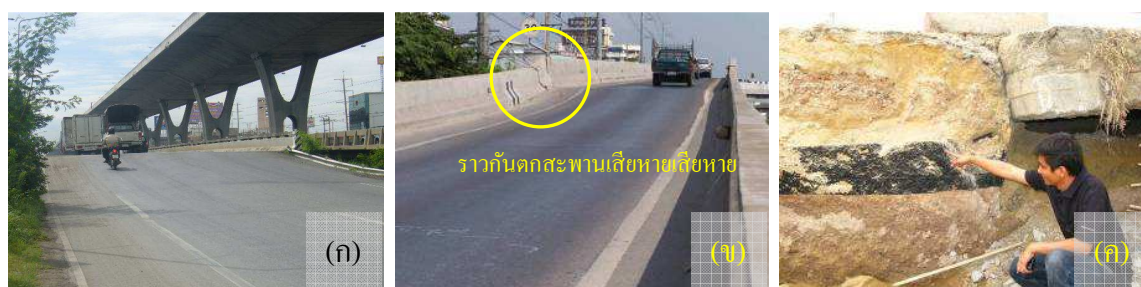


1 ความเป็นมาของโครงการ

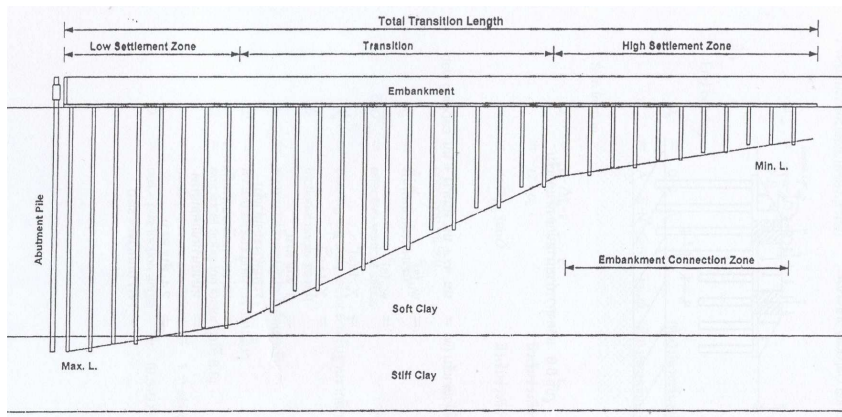
ปัญหาความไม่ต่อเนื่องของผิวทาง (Differential Settlement) บริเวณคอสะพานเป็นปัญหาที่มักพบในการก่อสร้างถนนบนดินอ่อนในประเทศไทย ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรและความปลอดภัยของผู้ใช้ถนนลดลง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง ตัวอย่างปัญหาการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานแสดงในภาพที่ 1 สาเหตุสำคัญของความไม่ราบเรียบบริเวณคอสะพานเนื่องมาจาก การยุบตัวที่แตกต่างกันของดินฐานราก กล่าวคือ การที่คันทาง ซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินอ่อนโดยตรงหรือวางบนเสาเข็มสั้นในชั้นดินอ่อน (Friction Pile) เกิดการทรุดตัวสูง เมื่อเทียบกับสะพานซึ่งเกิดการทรุดตัวน้อยมาก เพราะมีเสาเข็มเป็นตัวถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งในระดับลึก (End Bearing Pile)

ถึงแม้ว่าหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทางหลวง ได้กำหนดแบบมาตรฐานในการก่อสร้างโครงสร้างปรับการทรุดตัวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 และถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างทางจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ปัญหาการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพานในระยะยาวยังคงเกิดขึ้น เนื่องจากเกณฑ์การเลือกชนิดโครงสร้างปรับการทรุดตัวให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ซึ่งมีลักษณะดินที่แตกต่างกัน และงบประมาณจำกัดในการก่อสร้างและบำรุงทาง เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าว ส่งผลให้โครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานที่ก่อสร้างจริงในปัจจุบันยังด้อยประสิทธิภาพ

การวิจัยนี้จึงเสนอให้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว โดยจะเน้นการวิเคราะห์ออกแบบฐานรากเสาเข็มปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานดังแสดงในภาพที่ 2 นอกจากนี้ยังรวบรวมการออกแบบวิธีการวิเคราะห์การทรุดตัวซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ เพื่อลดปัญหาการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพาน เพิ่มความปลอดภัย และลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงในอนาคต



ภาพที่ 1 ตัวอย่างปัญหาการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพาน (ก) รถยนต์ต้องชะลอความเร็วเพื่อความปลอดภัย ทางหลวงหมายเลข 34 (ข) โครงสร้างสะพานชำรุด ทางหลวงหมายเลข 35 [ธนบุรี – ปากท่อ] (ค) มีการปรับระดับทางโดยการถมดินและ Asphalt บนผิวทางเดิม ถนนบางขุนเทียนชายทะเล



ภาพที่ 2 รูปแบบ Bearing Unit บริเวณคอสะพานที่ก่อสร้างบนชั้นดินอ่อน (วิชาญ, 2530)

2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

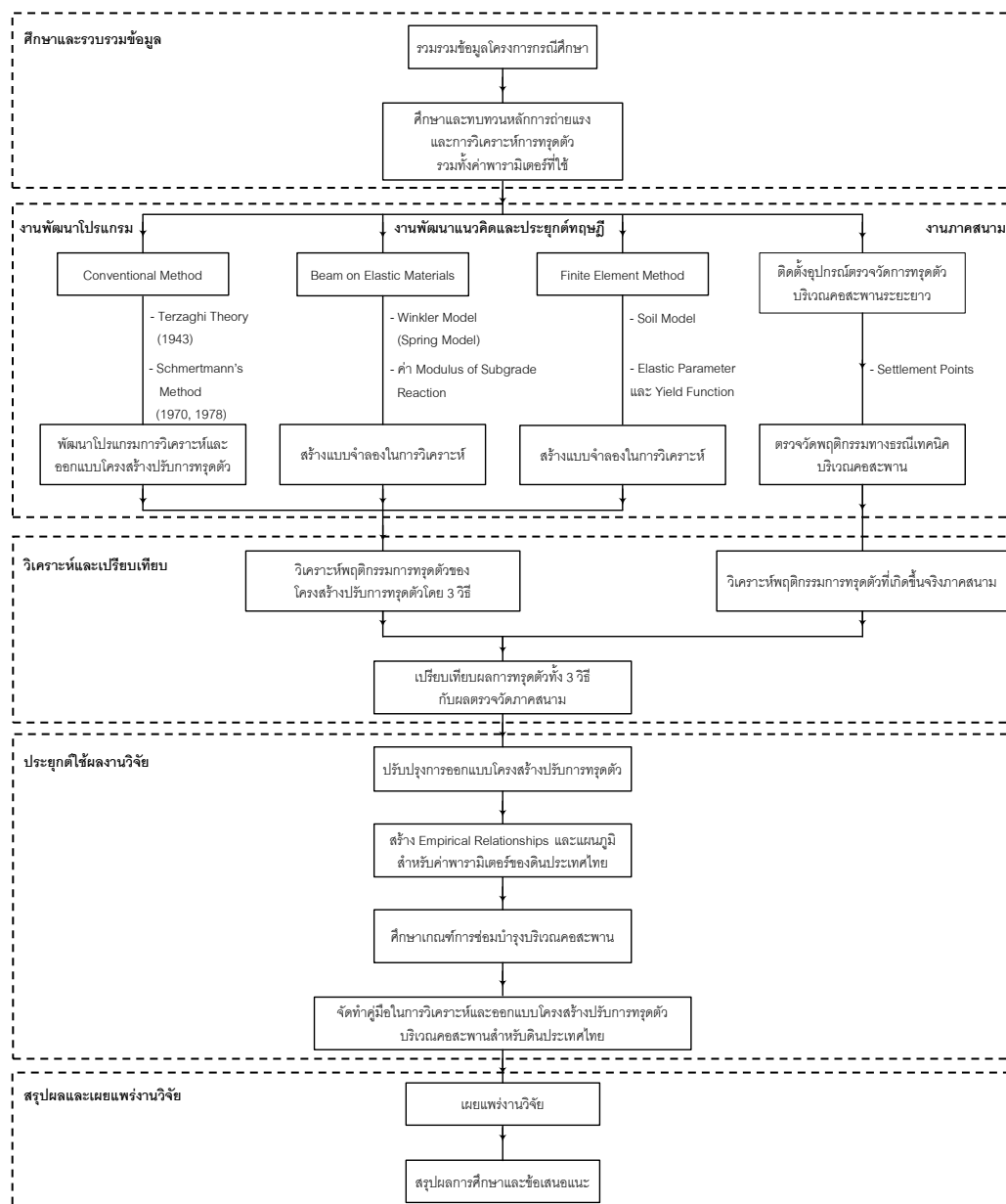
- 1) ตรวจสอบพฤติกรรมการทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานอย่างต่อเนื่องในระยะยาว
- 2) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน สำหรับวิธีซึ่งกำหนดให้ดิน ฐานราก และโครงสร้างไม่ปฏิสัมพันธ์กัน และใช้หลักการ Terzaghi Consolidation Theory
- 3) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างปรับการทรุดตัวสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างบริเวณคอสะพาน
- 4) รวบรวมและศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การทรุดตัวสำหรับดินอ่อนในประเทศไทย โดยหลักการ Terzaghi Consolidation Theory และ Soil-Structure Interaction รวมทั้งเสนอความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (Empirical Equation) และ แผนภูมิ (Chart) สำหรับดินอ่อนในประเทศไทย
- 5) จัดทำวิธีการออกแบบและวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวสำหรับดินประเทศไทย

3 ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ดำเนินงานตามแผนดำเนินงานดังภาพที่ 3 โดยพื้นที่ที่ทำการศึกษาคือที่โครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 เพื่อพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว โดยใช้หลักการถ่ายแรงแบบ Conventional Method และไม่คำนึงถึงอิทธิพลของ Reinforced Concrete Slab ต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของ

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)

โครงสร้างปรับการทรุดตัว (Non Soil-Structure Interaction) และรวบรวมพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวสำหรับดินประเภทต่างๆ ได้แก่ Compression Index, Recompression Index, Coefficient of Consolidation, Modulus of Elasticity เป็นต้น โปรแกรมวิเคราะห์จะถูกพัฒนาเพื่อให้สะดวกในการป้อนค่าและแสดงผล โดยใช้โปรแกรม Visual C# และปรับปรุงเป็นโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 โดยวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวและการออกแบบหาความยาวเสาเข็มที่เหมาะสมตามหลักการออกแบบความลาดชันในแนวดิ่งของวิศวกรรมทาง และจัดทำรายงานสรุปผลการศึกษาคู่มือในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานสำหรับดินประเทศไทย

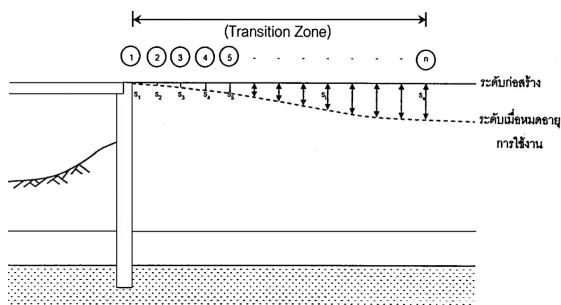


ภาพที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย

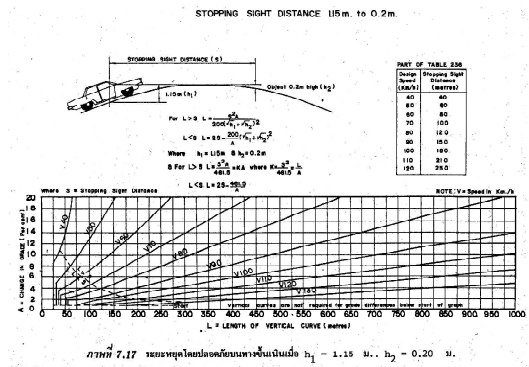
4 ผลการวิจัย

4.1 ศักยภาพของโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0

โปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวของชั้นดินคอสะพาน โดยพัฒนาขึ้นจากการนำทฤษฎีการทรุดตัวของชั้นดินในแนวดิ่งทางวิศวกรรมปฐพี (Consolidation Theory โดย Terzaghi, 1943) และการออกแบบเชิงเรขาคณิต (โค้งดิ่ง) ทางวิศวกรรมการทางดังแสดงในภาพที่ 4 มาใช้ร่วมกัน และการเลือกใช้ลักษณะหน้าตัดของคันดินถมมากถึง 2 รูปแบบ เพื่อครอบคลุมถึงรูปแบบคันทางทั้งแบบลาดเอียง และแบบตั้งตรง (เช่น กรณีก่อสร้างโดยใช้ MSE-wall หรือกำแพงกันดินบริเวณคอสะพาน) ดังแสดงในภาพที่ 5

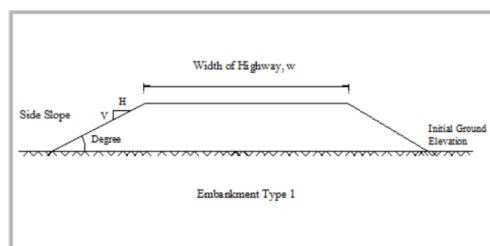


(ก)

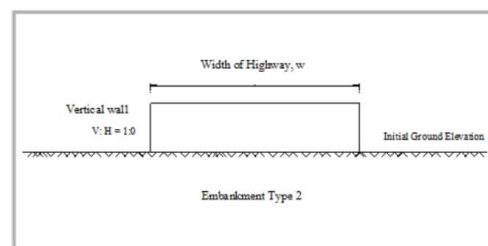


(ข)

ภาพที่ 4 ทฤษฎีที่ใช้ร่วมกันในการพัฒนาโปรแกรม (ก) การทรุดตัวของชั้นดินในแนวดิ่งทางวิศวกรรมปฐพี, วิชาญ, 2546 (ข) การออกแบบเชิงเรขาคณิต (โค้งดิ่ง) ทางวิศวกรรมการทาง, จิรพัฒน์, 2529



(ก) แบบลาดเอียง



(ข) แบบตั้งตรง

ภาพที่ 5 ลักษณะกายภาพของคันทาง

โปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 จะวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินที่ได้ใส่คุณสมบัติการยุบตัวการยุบตัวครบก้น [เช่น ค่า Void Ratio, Compression Index (C_c)] ถ้าดินชั้นใดมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณไม่ครบถ้วน โปรแกรมจะไม่คำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นดินนั้นๆ นอกจากนี้ความยาวสูงสุดของเสาเข็มที่คำนวณได้จะ Trial ถึงชั้นดินที่มีค่า C_c เท่านั้น ส่วนอัตราการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน ขึ้นกับ Boundary Condition และค่า c_v ของชั้นดิน โดยผู้ใช้ต้องกำหนดชั้น Boundary ของการระบายน้ำ (Free Drainage Boundary หรือ Impervious Boundary) และในกรณีที่ดินฐานรากมีหลายชั้น และค่า c_v ต่างกัน การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว จะใช้การเฉลี่ยค่า c_v ของดินทุกๆ ชั้น โดย Weighting Method

ส่วนตำแหน่งฐานรากสมมุติของเสาเข็มนั้นใช้หลักการของ Terzaghi and Peck (1948) และเมื่อใดที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่มีค่า c_v โปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 จะสมมุติให้เสาเข็มมีลักษณะ Friction Pile และตำแหน่งฐานรากสมมุติจะถูกกำหนดให้อยู่ที่ระดับ $L/3$ จากปลายเสาเข็ม โดย L = ความยาวเสาเข็ม แต่ถ้าปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่ไม่ได้ถูกป้อนค่า c_v โปรแกรมจะสมมุติให้เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ End-Bearing Pile และ ตำแหน่งฐานรากสมมุติจะอยู่ที่ระยะ $L'/3$ จากปลายเสาเข็ม โดย L' = ระยะจมของเสาเข็มในชั้นดินสุดท้าย

การใช้งานโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 (ภาพที่ 6) ซึ่งภายในประกอบด้วย 5 ส่วน คือ

1) Soil Profile, 2) Longitudinal Profile, 3) Embankment Geometry, 4) Criteria และ 5) Analysis ดังภาพที่ 7 โดยจะมีหลักการวิเคราะห์ทำงานดังนี้

- 1) Soil Profile หน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินบริเวณโครงการที่จะวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน และสามารถเปิดดูความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบกับความลึกของชั้นดินได้
- 2) Longitudinal Profile หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลพื้นฐานและค่าระดับความลาดชันของคันทางที่ระดับก่อสร้างเสร็จ(รูปร่างเชิงเรขาคณิตของคันทาง)
- 3) Embankment Geometry หน้าต่างสำหรับเลือกลักษณะหน้าตัด (Cross Section) ของคันทางและขนาดของคันทาง (เช่น ความกว้าง ความลาดชัน น้ำหนักดินถม และน้ำหนักจรเนื่องจากรถที่สัญจรไปมา)
- 4) Criteria หน้าต่างเกณฑ์การวิเคราะห์ออกแบบสำหรับเลือกลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินจากรูปแบบการยุบอัดคายน้ำ เวลาที่ต้องการออกแบบ และเกณฑ์การเปลี่ยนความยาวของ Bearing Unit ขณะที่โปรแกรมทำงาน

- 5) Analysis [Step 1] หน้าต่างวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินจากการผานทฤษฎีการทรุดตัวในแนวตั้งทางวิศวกรรมปฐพี และการวางโค้งทางแนวราบทางวิศวกรรมการทาง เพื่อให้การสัญจรไปมามีความราบเรียบและรู้สึกสบาย
- 6) Analysis [Step 2] หน้าต่างวิเคราะห์ความยาว Bearing Unit ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานจากโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0



ภาพที่ 6 หน้าต่างโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)

Layer 9 (Max 15 layer)

Ground Water Elevation (m)

Add Ground Water Elevation

Soil Profile

Soil Description

Elevation

From (m)

To (m)

Engineering Index

Total Unit Weight, γ (kN/m^3)

Initial Void Ratio, e_0

OCR

Compressibility Properties

Compression Index, C_c

Recompression Index, C_r

Coefficient of Consolidation, c_v (m^2/year)

Add Layer

Delete Layer

GeoGraph

Layer	Soil	From (m)	To (m)	Total Unit	Initial Void	OCR	Compression	Recompression	Coefficient
1	Clay	0	-1.5	18	2.21	1	1.106	0	0
2	Very soft c...	-1.5	-8	16	2.2	1	1.259	0	2.01
3	Very soft c...	-8	-11.5	15.6	2.2	1	1.106	0	1.38
4	Soft clay	-11.5	-13	17.5	1.43	1.1	0.797	0.151	1.1
5	Medium st...	-13	-16.5	18.4	1.2	1.2	0.6	0.1	1
6	Very stiff d...	-16.5	-17.5	20.7	1.1	1.2	0.2	0.05	0.8
7	Medium d...	-17.5	-19	21	1.1				

(ก)

Formal 1

Formal 2

Beginning Station, PVC₁ (m)

Initial Ground Elevation (m)

31

Add Data

No. of Section	Sub Section	Length (m)	Grading (%)	Station (x-coordinate) (m)	Elevation (y-coordinate) (m)	Station (x-coordinate) (m)	Elevation (y-coordinate) (m)
L ₁	5	45	0				
L ₂	22	45	2	PVC ₁	3207.5	PVC ₂	3357.5
L ₃	30	60	2	PVI ₁	3252.5	PVI ₂	3462.5
L ₄	21	105	2	PVT ₁	3297.5	PVT ₂	3567.5
L ₅	21	105	-2				

Add Data

(ข)

Walls of Highway, w

Initial Ground Elevation

Embankment Type 1

Embankment Type 2

Type 1

Type 2

Station (m)

Width of Highway, w (m)

Side Slope (Degrees)

Side Slope (V:H)

Unit Weight of Compacted Fill Material (kN/m^3)

Uniform Live Load, LL (kN/m^2)

20

10

Add Data

(ค)

Criteria

Time (year)

100

Add Year

Settlement Magnitude

one-way

two-way

Simulate Pile Length (m)

Min Length

2

Max Length

100

Total increment pile length

0.5

Select

(ง)

Step 1

Step 2

Station (x-coordinate) (m)

Elevation (y-coordinate) (m)

PVC₁

3207.5

31.55351

PVI₁

3252.5

32

PVT₁

3297.5

33.5

Station (x-coordinate) (m)

Elevation (y-coordinate) (m)

PVC₂

3357.5

35.1

PVI₂

3357.5

37.2

PVT₂

3567.5

35.1

Add Data

Initial Profile Graph & End Prof Graph

Length of Pile

Station (m)

Station (m)

(จ)

Step 1

Step 2

Maximum Station

100

Simulate Station

100

Simulate Length

17.5

Simulate Data

0

Target

0

Best Target

0

Best Length

17.5

Complete 100 %

Analyze

Initial Profile Graph & End Prof Graph

Length of Pile

Station (m)

Station (m)

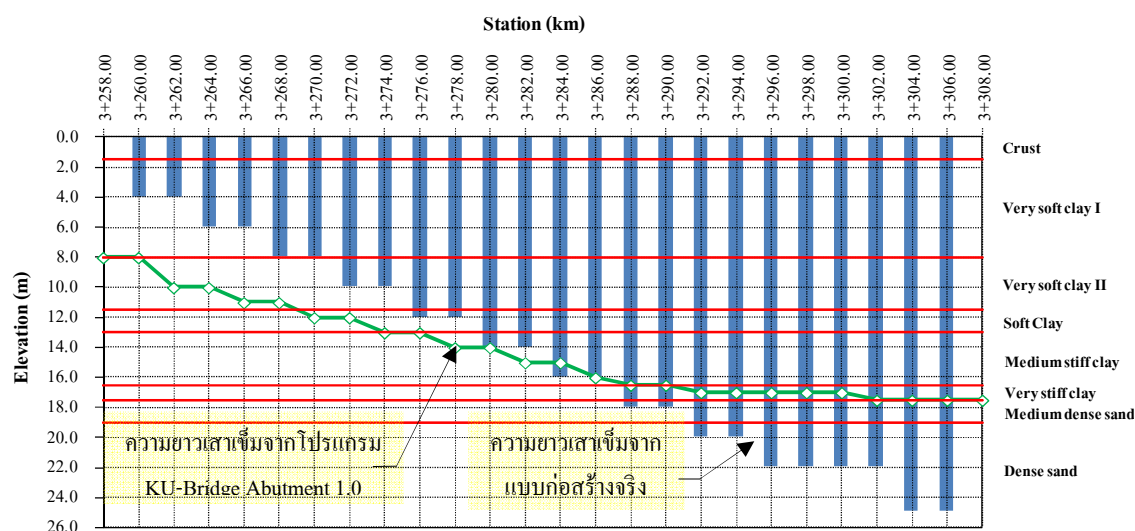
(ฉ)

ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 (ก) Soil Profile (ข) Longitudinal Profile (ค) Embankment Geometry (ง) Criteria (จ) Analysis [Step 1] (ฉ) Analysis [Step 2]

4.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลกรณีศึกษาโครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย ซึ่งใช้ Approach Slab on Pile ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยความยาวเสาเข็มของโครงสร้างปรับการทรุดตัวจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 แสดงโดยสัญลักษณ์เส้น และความยาวเสาเข็มจากแบบก่อสร้าง (As-Built Drawing) แสดงโดยรูปแท่งสีเหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบพบว่าความยาวเสาเข็มในช่วง กม.3+258.00 ถึง กม.3+307.50 (ระยะทาง 49.50 เมตร) ให้ค่าแตกต่างจากความยาวในแบบก่อสร้าง โดยช่วงที่มีการทรุดตัวมาก ให้ผลการวิเคราะห์คำนวณยาวมากกว่าแบบก่อสร้าง ส่วนช่วงการทรุดตัวปานกลางให้ผลที่ใกล้เคียงกับแบบก่อสร้าง และช่วงการทรุดตัวน้อยมีความยาวที่น้อยกว่าแบบก่อสร้าง (เนื่องจากสมมุติฐานให้ชั้นดินที่ไม่มีค่า Compressibility Properties ไม่เกิดการทรุดตัว)



ภาพที่ 8 ผลเปรียบเทียบความยาว Bearing Unit จากโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 และแบบก่อสร้าง

5 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

1) การแก้ปัญหการทรุดตัวต่างระดับของโครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Pile สามารถบรรเทาได้ (ก) การปรับปรุงการออกแบบความยาว ระยะห่างและจำนวนเสาเข็มบริเวณที่พบปัญหา (ข) ปรับปรุงการออกแบบ Reinforced Concrete Slab ให้สามารถถ่ายแรงระหว่างเสาเข็มได้และไม่เกิดการพิบัติ

- 2) ควรมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินฐานราก และการส่งถ่ายแรงและโมเมนต์ใน Reinforced Concrete Slab ให้มีความถูกต้องมากขึ้น
- 3) โปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 ที่พัฒนาขึ้นโดยการผสานทฤษฎีการวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นดินจากทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi และการวางโค้งคังทางวิศวกรรมการทาง ซึ่งการทรุดตัวของชั้นดินแข็ง (Elastic Settlement) ถือว่ามีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาวิเคราะห์ในการเขียนโปรแกรมนี้ ส่วนกรณีที่ดินฐานรากมีหลายชั้น และค่า c_v ต่างกัน การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว จะใช้การเฉลี่ยค่า c_v ของดินทุกๆ ชั้น โดย Weighting Method

6 การนำไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปจัดทำเป็นคู่มือการออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณดินอ่อน และปรับปรุงแบบมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวที่ใช้ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้ในการช่วยวิเคราะห์ออกแบบเบื้องต้นสำหรับโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบฐานรากเสาเข็มสำหรับลักษณะดินชนิดต่างๆ สำหรับวิศวกรรมงานทาง และยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้นั่น และประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างและลดราคาซ่อมบำรุงบริเวณคอสะพานในระยะยาว