สรุปย่อการวิจัย

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)

An evaluation of guidelines for bridge approach foundation

(Extended research program)

หัวหน้าโครงการวิจัย : ผศ.ดร. บารเมศ วรรธนะภูติ [1]

ผู้ร่วมงานวิจัย :

1. ผศ.ดร. สมโพธิ อยู่ไว [3]
2. นายสรศักดิ์ เชียวศิริกุล [2]
3. นายคมพันธ์ จินดาวัฒน์ [1]
4. นายวสันต์ ปั้นสังข์ [1]
5. นายยุตติกร สินสุขศรีวิไล [1]
6. นายธันวุฒิ วิวัฒน์ถาวรวงศ์ [4]
7. นายศักดา สุขแสวง [4]

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย :

1. รศ.ดร. วิชาญ ภู่พัฒน์ [1]
2. รศ.ดร. ก่อโชค จันทวรางกูร [1]
3. ดร. อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช [5]
4. ดร. จุฑา สุนิตย์สกุล [5]
5. นายชัยพร บัวสรวง [6]

หน่วยงาน:

1 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

3 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

4 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

6 สำนักงานออกแบบ สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร

งบประมาณ : ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2553

ระยะเวลาทำการวิจัย : ตั้งแต่ เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2553 ถึง เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2555

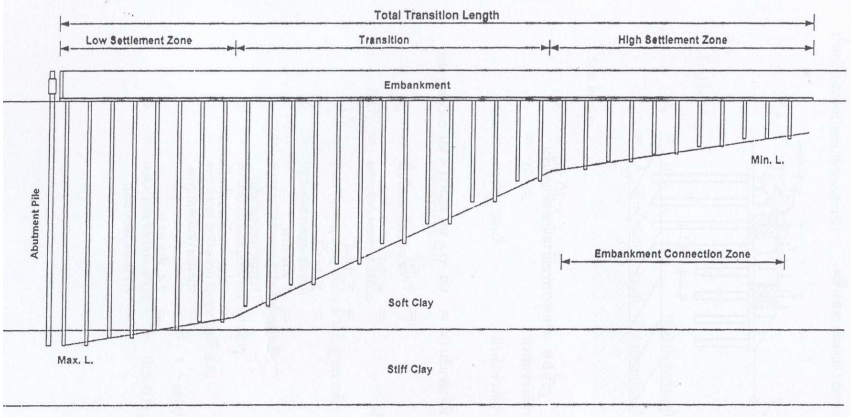
1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัญหาความไม่ต่อเนื่องของผิวทาง (Differential Settlement) บริเวณคอสะพานเป็นปัญหาที่มักพบในการก่อสร้างถนนบนดินอ่อนในประเทศไทย ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรและความปลอดภัยของผู้ใช้ถนนลดลง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง ตัวอย่างปัญหาการทรุดตัวบริเวณคอสะพานแสดงใน**ภาพที่ 1** สาเหตุที่สำคัญของความไม่ราบเรียบบริเวณคอสะพานเนื่องมาจาก การยุบตัวที่แตกต่างของดินฐานราก กล่าวคือ การที่คันทาง ซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินอ่อนโดยตรงหรือวางบนเสาเข็มสั้นในชั้นดินอ่อน (Friction Pile) เกิดการทรุดตัวสูง เมื่อเทียบกับสะพานซึ่งเกิดการทรุดตัวน้อยมาก เพราะมีเสาเข็มเป็นตัวถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งในระดับลึก (End Bearing Pile)

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

การวิจัยนี้จึงเสนอให้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว โดยจะเน้นการวิเคราะห์ออกแบบฐานรากเสาเข็มปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานดังแสดงใน**ภาพที่ 2** นอกจากนี้ยังรวบรวมการออกแบบวิธีการวิเคราะห์การทรุดตัว ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ 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) ตรวจวัดพฤติกรรมการทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานอย่างต่อเนื่องในระยะยาว

2) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน สำหรับวิธีซึ่งกำหนดให้ดิน ฐานราก และโครงสร้างไม่ปฏิสัมพันธ์กัน และใช้หลักการ Terzaghi Consolidation Theory

3) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างปรับการทรุดตัวสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างบริเวณคอสะพาน

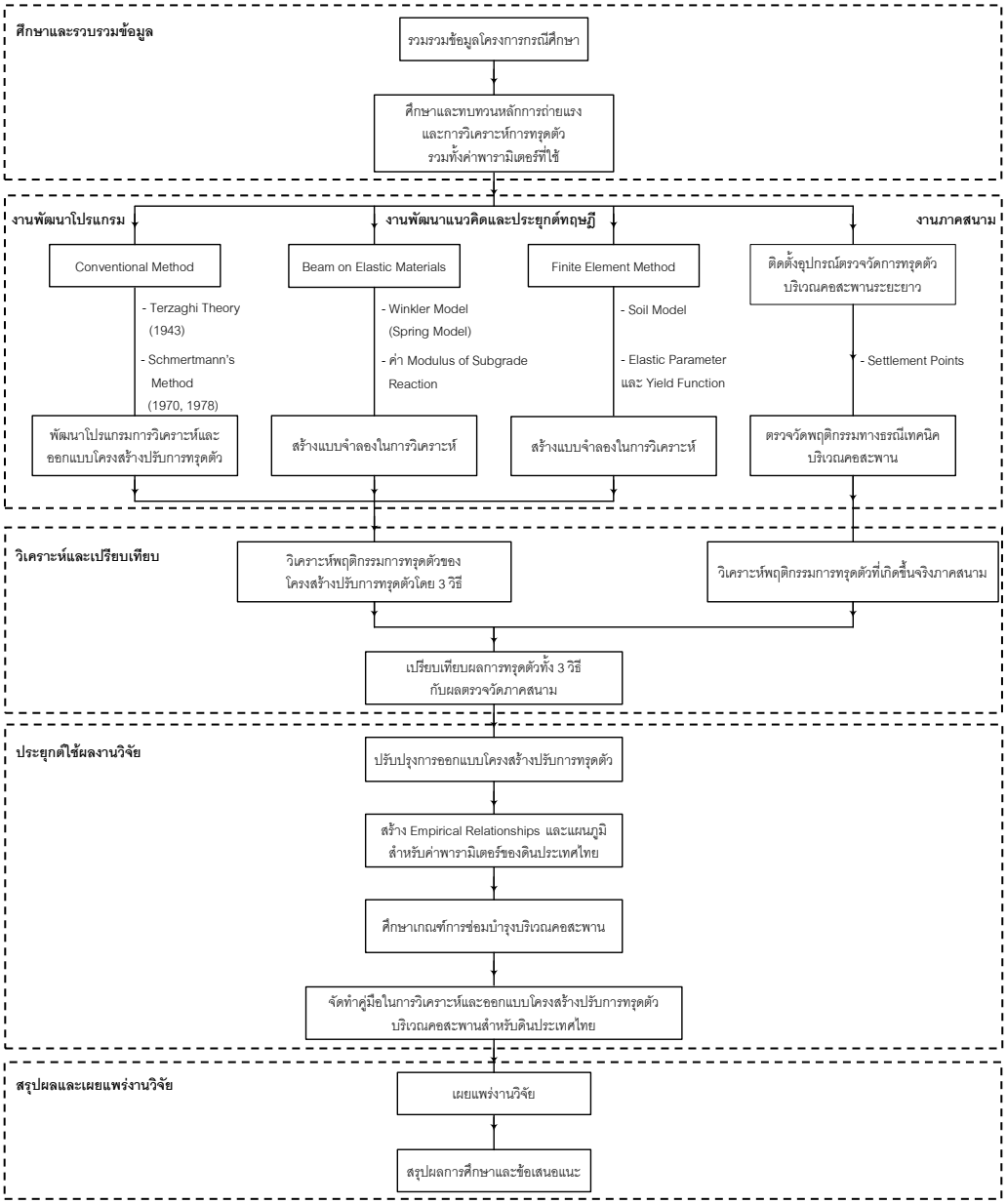
4) รวบรวมและศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การทรุดตัวสำหรับดินอ่อนในประเทศไทย โดยหลักการ Terzaghi Consolidation Theory และ Soil-Structure Interaction รวมทั้งเสนอความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (Empirical Equation) และ แผนภูมิ (Chart) สำหรับดินอ่อนในประเทศไทย

5) จัดทำวิธีการออกแบบและวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวสำหรับดินประเทศไทย

3 ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ดำเนินงานตามแผนดำเนินงานดัง**ภาพที่ 3** โดยพื้นที่ที่ทำการศึกษาหลักคือที่โครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 เพื่อพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว โดยใช้หลักการถ่ายแรงแบบ Conventional Method และไม่คำนึงถึงอิทธิพลของ Reinforced Concrete Slab ต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของ

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 โดยวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวและการออกแบบหาความยาวเสาเข็มที่เหมาะสมตามหลักการออกแบบความลาดชันในแนวดิ่งของวิศวกรรมการทาง และจัดทำรายงานสรุปผลการศึกษาคู่มือในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานสำหรับดินประเทศไทย

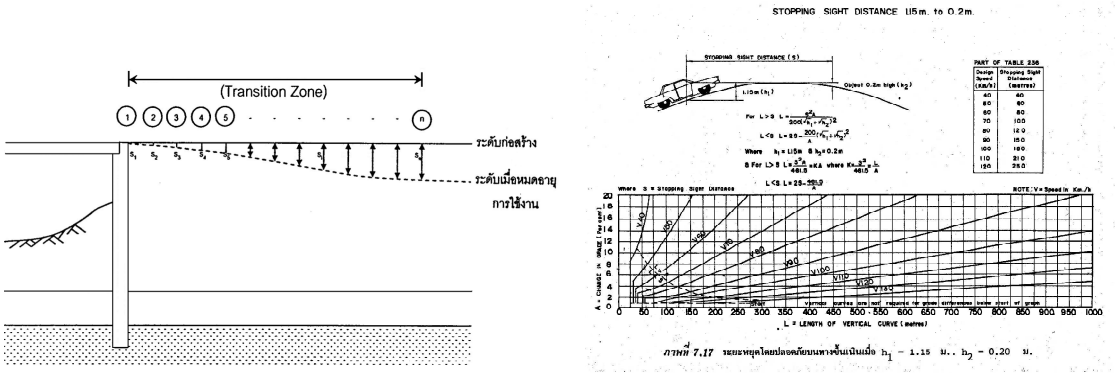


ภาพที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย

4 ผลการวิจัย

4.1 ศักยภาพของโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0

โปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณเชิงลาดสะพาน โดยพัฒนาขึ้นจากการนำทฤษฎีการทรุดตัวของชั้นดินในแนวดิ่งทางวิศวกรรมปฐพี (Consolidation Theory โดย Terzaghi, 1943) และการออกแบบเชิงเรขาคณิต (โค้งดิ่ง) ทางวิศวกรรมการทางดังแสดงใน**ภาพที่ 4** มาใช้ร่วมกัน และการเลือกใช้ลักษณะหน้าตัดของคันดินถมมากถึง 2 รูปแบบ เพื่อคลอบคลุมถึงรูปแบบคันทางทั้งแบบลาดเอียง และแบบตั้งตรง (เช่น กรณีก่อสร้างโดยใช้ MSE-wall หรือกำแพงกันดินบริเวณคอสะพาน) ดังแสดงใน**ภาพที่ 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 จะวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินที่ได้ใส่คุณสมบัติการยุบตัวการยุบตัวครบถ้วน [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

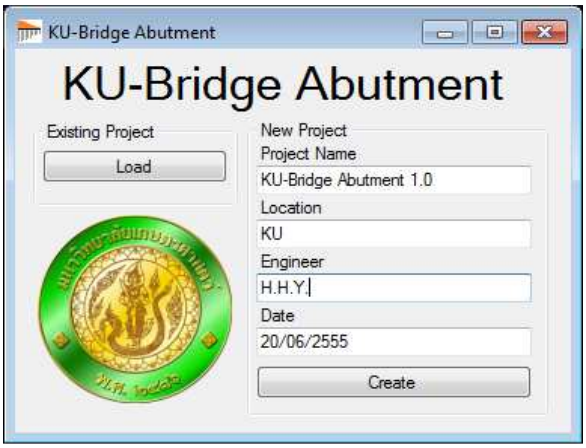
ส่วนตำแหน่งฐานรากสมมูลย์ของเสาเข็มนั้นใช้หลักการของ Terzaghi and Peck (1948) และเมื่อใดที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่มีค่า c_v โปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 จะสมมุติให้เสาเข็มมีลักษณะ Friction Pile และตำแหน่งฐานรากสมมูลย์จะถูกกำหนดให้อยู่ที่ระดับ L/3 จากปลายเสาเข็ม โดย L = ความยาวเสาเข็ม แต่ถ้าปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่ไม่ได้ถูกป้อนค่า c_v โปรแกรมจะสมมุติให้เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ End-Bearing Pile และ ตำแหน่งฐานรากสมมูลย์จะอยู่ที่ระยะ $L'/3$ 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 ดัง **ภาพที่ 7** โดยจะมีหลักการวิเคราะห์ทำงานดังนี้

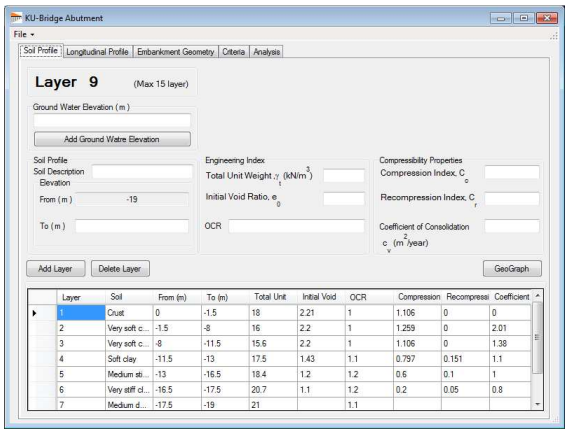
1) Soil Profile หน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินบริเวณโครงการที่จะวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน และสามารถเปิดดูความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบกับความลึกของชั้นดินได้
2) Longitudinal Profile หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลพื้นฐานและค่าระดับความลาดชันของคันทางที่ระดับก่อสร้างเสร็จ(รูปร่างเชิงเรขาคณิตของคันทาง)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

5) Analysis [Step 1] หน้าต่างวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินจากการผสานทฤษฎีการทรุดตัวในแนวดิ่งทางวิศวกรรมปฐพี และการวางโค้งทางแนวราบทางวิศวกรรมการทาง เพื่อให้การสัญจรไปมามีความราบเรียบและรู้สึกสบาย

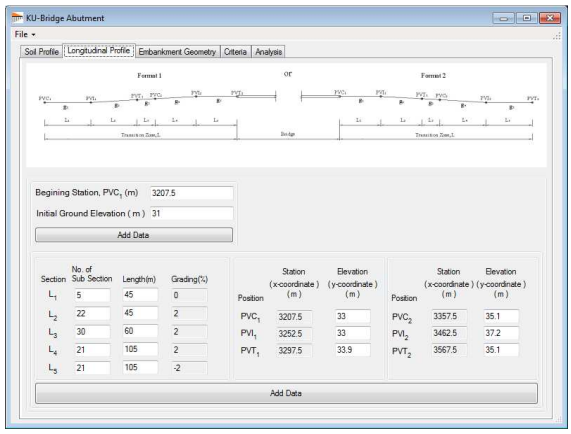
6) Analysis [Step 2] หน้าต่างวิเคราะห์ความยาว Bearing Unit ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานจากโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0



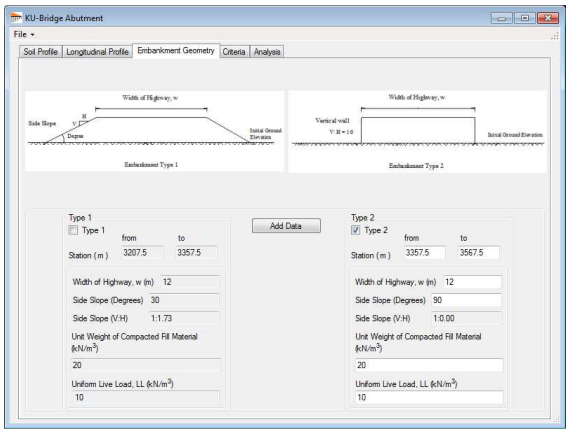
ภาพที่ 6 หน้าต่างโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0



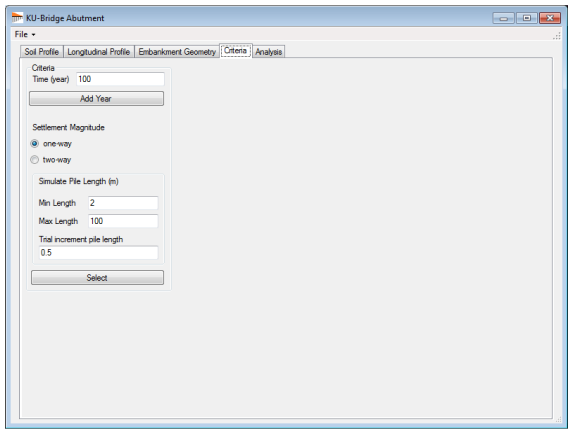
(ก)



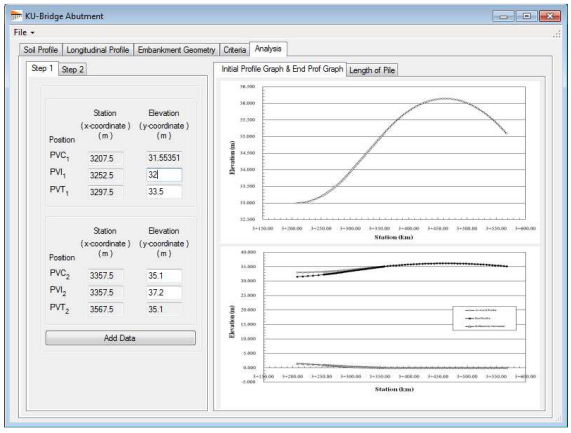
(ข)



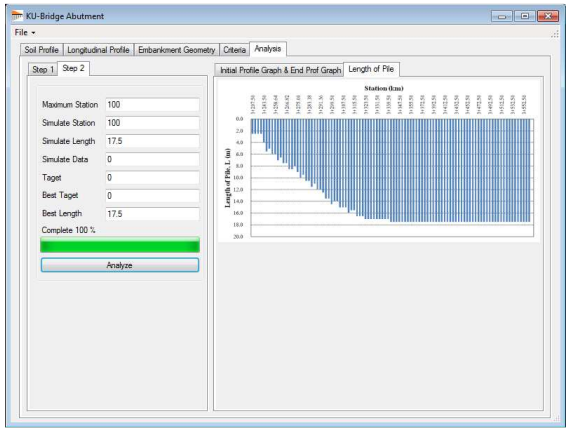
(ค)



(ง)



(จ)



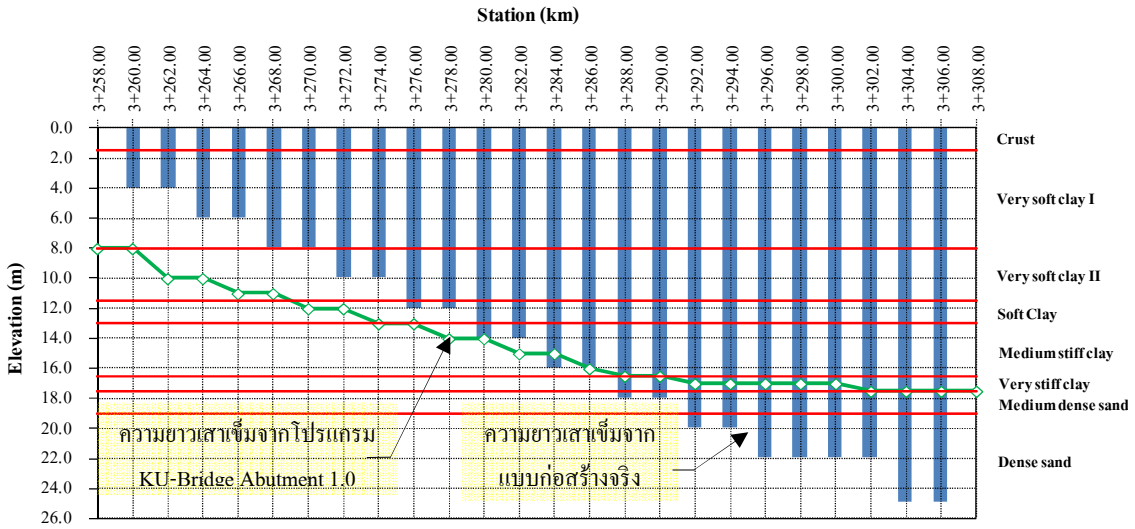
(ฉ)

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 ดังแสดงใน**ภาพที่ 8** โดยความยาวเสาเข็มของโครงสร้างปรับการทรุดตัวจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม KU-Bridge Abutment 1.0 แสดงโดยสัญลักษณ์เส้น และความยาวเสาเข็มจากแบบก่อสร้าง (As-Built Drawing) แสดงโดยรูปแท่งสี่เหลี่ยม

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) การแก้ปัญหาการทรุดตัวต่างระดับของโครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Pile สามารถบรรเทาโดย (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 และการวางโค้งดิ่งทางวิศวกรรมการทาง ซึ่งการทรุดตัวของชั้นดินแข็ง (Elastic Settlement) ถือว่ามีค่าน้อยมาก จึงไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในการเขียนโปรแกรมนี้ ส่วนกรณีที่ดินฐานรากมีหลายชั้น และค่า c_v ต่างกัน การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว จะใช้การเฉลี่ยค่า c_v ของดินทุกๆ ชั้น โดย Weighting Method

6 การนำไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปจัดทำเป็นคู่มือการออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณดินอ่อน และปรับปรุงแบบมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวที่ใช้ในปัจจุบันให้มีประสิทธิ์ภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้ในการช่วยวิเคราะห์ออกแบบเบื้องต้นสำหรับโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบฐานรากเสาเข็มสำหรับลักษณะดินชนิดต่างๆ สำหรับวิศวกรรมงานทาง และยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ถนน และประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างและลดราคาซ่อมบำรุงบริเวณคอสะพานในระยะยาว