

การศึกษาพฤติกรรมทางกลระหว่างการก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

MECHANICAL BEHAVIOR DURING CONSTRUCTION PERIOD OF ROAD EMBANKMENT CONSTRUCTION ON SOFT BANGKOK CLAY

ก้องรัฐ นกแก้ว (KONGRAT NOKKAEW)¹

วิชาญ ภูพัฒน์ (VISHARN POOPATH)²

¹อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร Email Address: kongrat093@yahoo.com

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนองานวิจัยเรื่องการศึกษาพฤติกรรมทางกลในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพซึ่งมีวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลที่สำคัญอันได้แก่ การกระจายของหน่วยแรง พฤติกรรมด้านการเคลื่อนตัวการเคลื่อนตัว และพฤติกรรมด้านเสถียรภาพของคันทางที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนดินฐานรากอ่อนตั้งแต่เริ่มต้นก่อสร้าง เพิ่มความสูงของคันทางจนกระทั่งคันทางเกิดการพิบัติ โดยใช้ทฤษฎี Continuum Mechanics by Finite Element เป็นเครื่องมือสำคัญของการวิจัย ผลการวิจัยพบว่า พฤติกรรมทางกลทั้ง 3 ในสถานะ Elastic State ที่ได้จากการวิเคราะห์โดย Finite Element จะให้ค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ในสถานะ Limit Equilibrium State ให้ผลดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่นิยมใช้ปัจจุบัน (บนพื้นฐานของ Rigid Mechanics) คือ ให้ค่า อัตราส่วนความปลอดภัย ประมาณ 1.00 ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่า Continuum Mechanics สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้ค่อนข้างดี

ABSTRACT: This paper present the study of mechanical behaviors during construction of road embankment construction on soft Bangkok clay by continuously increasing embankment height until collapse mechanism. The objective of this research is to understand their behaviors, namely 1) Stress distribution in the embankment and the foundation Soil. 2) Movement and deformation of the foundation soil. 3) Stability of the embankment. The simulation is done by Finite Element Method based on Continuum Mechanics, and compared with those of the conventional theories that are commonly used. The analysis result shows that mechanical behaviors in elastic state corresponds quite well with results of the conventional theories, while results at the limit equilibrium state of stability correspond very well with the existing conventional theories i.e. factor of safety(F.S) about 1. It can be concluded that continuum mechanics simulation can be used to explain the mechanical behaviors during construction of the road embankment on soft Bangkok clay quite well.

KEYWORDS: Mechanical Behavior, Bangkok Clay, Embankment, Finite Element

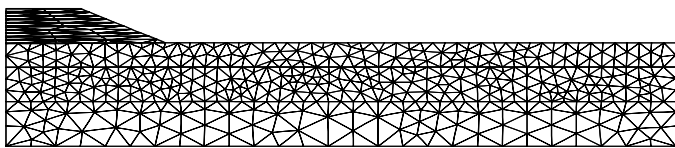
1. บทนำ

โครงสร้างถนนเป็นโครงสร้างหนึ่งซึ่งมักประสบปัญหาเมื่อมีการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ปัญหาโดยทั่วไปที่พบได้แก่วิชาญ(2517) 1) การวิบัติอันเนื่องมาจากคันทางสูงมากเกินไป 2) การทรุดตัวคันทางค่อนข้างสูงระหว่างก่อนและหลังการก่อสร้าง 3) ความอ่อนแอของโครงสร้างคันทางที่มีการหย่อนตัวและแตกง่าย 4) มีการทรุดตัวที่ร่องล้อสูง และ 5) มีการทรุดแอ่น

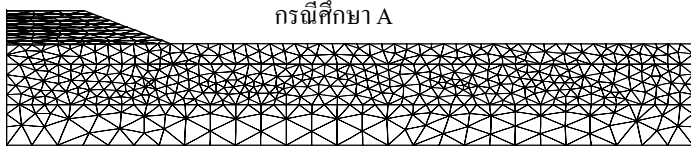
ในอดีตไม่สามารถอธิบายเหตุการณ์และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเหล่านี้ได้อย่างชัดเจนเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้นำเอาวิธี finite element ซึ่งมีพื้นฐานจาก continuum mechanics มาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาตั้งแต่เริ่มต้นการก่อสร้างคันทางจนถึงในขณะที่ยังคันทางเกิดการพังทลายโดยการเพิ่มความสูงคันทางทีละชั้นจนกระทั่งคันทางเกิดการวิบัติ ผลที่คาดว่าจะได้รับคือเพื่อเพิ่มองค์ความรู้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในขณะก่อสร้างคันทางบนดินฐานรากอ่อนให้ชัดเจนและสมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จะใช้เป็นส่วนหนึ่งในการจัดทำหนังสือการออกแบบถนนบนดินอ่อนต่อไป

2. ไฟไนต์เอลิเมนต์และแบบจำลองชั้นดิน

ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดแบบ Elastic Perfectly Plastic เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยม กำหนด Boundary Condition ที่ด้านข้างเป็น Roller และด้านล่างเป็น Hinge แบ่งชั้นดินย่อยออกเป็น 3 ชั้นได้แก่ คือ ชั้น Weathered Crust ชั้น Soft Marine



กรณีศึกษา A



กรณีศึกษา B

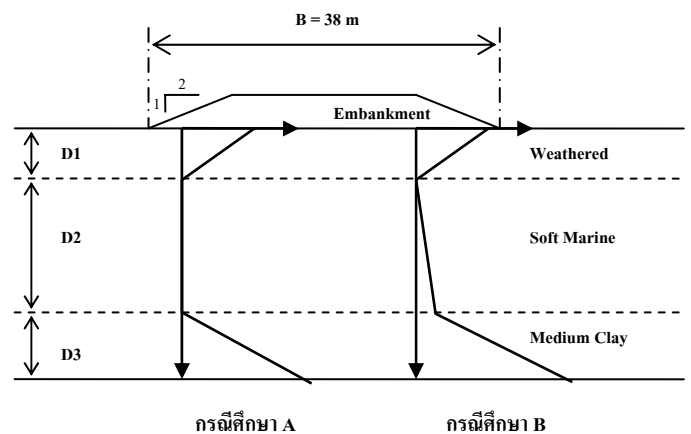
รูปที่ 1 แสดงรูปแบบปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

Clay และชั้น Medium Clay โดยมีความลึกชั้นดินรวม 15 เมตร โดยแบ่งออกเป็นกรณีศึกษา A และกรณีศึกษา B ซึ่งมีรายละเอียดกรณีศึกษาหัวข้อที่ 3.2 ทำการจำลองการก่อสร้างโดยการเพิ่มความสูงคันทางทีละ 0.5 เมตร จนกระทั่งคันทางเกิดการพังทลายกำหนดสมบัติของดินฐานรากทั้ง 3 ชั้นเป็นวัสดุที่มีสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained) และการก่อสร้างเกิดขึ้นเร็วมากไม่พิจารณาถึงอิทธิพลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการ Consolidation

3. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

3.1 คันทาง

ยึดตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กำหนดให้พื้นผิวคันทางกว้าง 10 เมตร (รวมไหล่ทาง) ความกว้างฐานคันทางมีค่าเท่ากับ 38 เมตร ความลาดชันคงที่เท่ากับ 1: 2 (ความยาวแนวราบต่อความยาวแนวตั้ง) และทำการเพิ่มความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น กำหนดให้ชั้นดินคันทางประกอบด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน (Homogeneous Material) โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัยดังนี้ คือ Cohesion(c) = 0 kN/m² , Friction Angle(ϕ) = 30, Poisson Ratio(μ) = 0.35, Unit Weight(γ) = 20kN/m²



รูปที่ 2 รูปร่างคันทางและกรณีที่ใช้ในการศึกษา

3.2 ชั้นดินฐานราก

ได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พบว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ผิวดินจะมีค่าลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงชั้น Soft Marine Clay จะไม่เพิ่มขึ้น เมื่อความลึกมากขึ้นและเมื่อเข้าสู่ชั้น Medium Clay กำลังต้านทาน

แรงเฉือนจะเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับงานวิจัยของ มณฑา (2546) สามารถแบ่งรูปแบบความสัมพันธ์ได้เป็น 2 รูปแบบซึ่งจะขอตั้งชื่อว่าการณีศึกษา A สำหรับกรณีที่มีค่า Undrained Shear Strength ไม่เพิ่มขึ้นตามความลึกในชั้น Soft Marine Clay และกรณีศึกษา B สำหรับกรณีที่มีค่า Undrained Shear Strength เพิ่มขึ้นตามความลึกในชั้น Soft Marine Clay ดังสมมติฐานของ Shansep

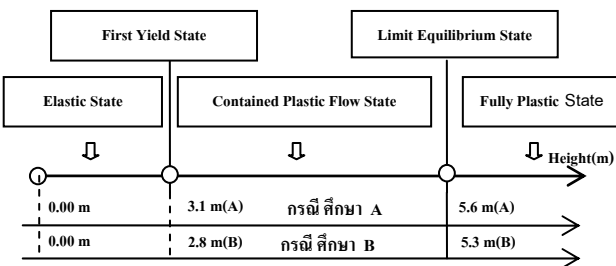
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดและคุณสมบัติชั้นดินฐานรากที่ใช้ในการวิจัย

Layer	Cohesion(c)				γ (kN/m^3)
	กรณีศึกษา A		กรณีศึกษา B		
	Dept (m)	S_u (kN/m^2)	Dept (m)	S_u (kN/m^2)	
Weathered Crust	-0.5	33	-0.5	37	17
Soft Marine Clay	-3.5	23	-2.8	20.5	15.5
	-8.5	23	-9	25	
Medium Clay	-15.0	57	-14.5	61	18

4. พฤติกรรมทางกลโดยภาพรวมที่เกิดขึ้นขณะการ

ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

จากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งช่วงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยพิจารณาจากสภาพความเป็น Plastic ของเนื้อดิน แบ่งได้เป็น 5 สถานะอันได้แก่



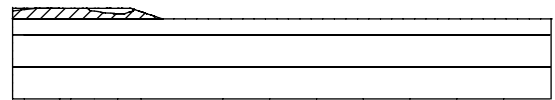
รูปที่ 3 แสดงช่วงความสูงในสถานะต่าง ๆ ของกรณีศึกษา A และกรณีศึกษา B

1) *Elastic State* เมื่อทำการถมคันทางจะเกิดหน่วยแรงในชั้นดินฐานราก และในส่วนดินถมเอง ในช่วงต้นการก่อสร้างความสูงของคันทางยังไม่มากและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นยังมีค่าต่ำ

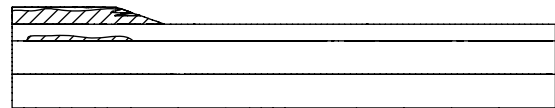
(τ_{max}) ที่เกิดขึ้นในชั้นดินฐานรากทุกแห่งมีค่าต่ำกว่ากำลังเฉือน (S_u) ของดิน เรียกสภาวะนี้ว่า “Elastic State”

2) *First Yield State* เมื่อเพิ่มความสูงคันทางจนกระทั่งค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในชั้นดินฐานรากมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานความเฉือนในดิน ณ บริเวณนั้นดินจะสูญเสียกำลังรับแรงเกิด Plastic Zone ครั้งแรกในดินฐานรากเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า “First Local Yield State”

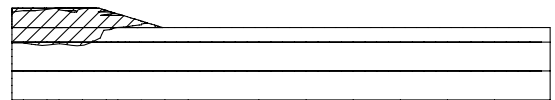
3) *Contained Plastic Flow State* หากยกความสูงของคันทางต่อไป Plastic Zone จะขยายตัวมากขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพของคันทางต่ำลงแต่ยังไม่ถึงกับเกิดการวิบัติของคันทางเนื่องจาก Plastic Zone ที่เกิดขึ้นยังคงถูกห่อหุ้มด้วยดินที่อยู่ในสภาวะ Elastic State ที่มีกำลังสูงคอยหุ้มพยุงอยู่ เรียกสภาวะนี้ว่า “Contained Plastic Flow State”



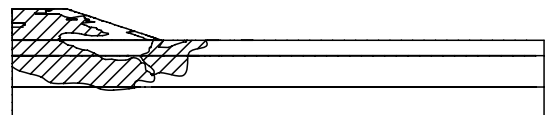
1) Elastic State (F.S. > 1.80)



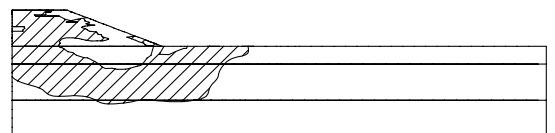
2) First Yield State (F.S. = 1.80, 1.68)



3) Contained Plastic Flow State (F.S. = 1.68-1.00)



4) Limit Equilibrium State (F.S. = 1)



5) Fully Plastic State (F.S. < 1)

รูปที่ 4 พฤติกรรมการพัฒนาของ Plastic Zone ที่เกิดขึ้นในขณะทำการก่อสร้าง

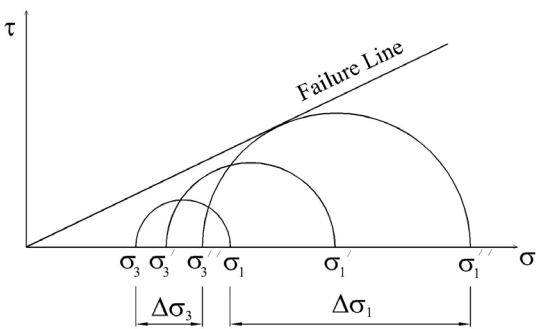
4) *Limit Equilibrium State* หากการก่อสร้างยังดำเนินการต่อไป Plastic Zone จะขยายตัวออกไปและผิวฐานรากมากกว่าหนึ่งแห่ง ณ ขณะที่ Plastic Zone แต่ละผิวของดินฐานรากแห่งที่สองผิวของการวิบัติ (Failure Surface) จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์พอดีและพร้อมที่จะเกิดการพังทลาย สภาวะ ณ ขณะก่อนที่จะ

เกิดการพังทลายเรียกว่า “Limit Equilibrium State” เป็นสภาวะที่พร้อมจะเกิดการพังทลายแต่ยังอยู่ในสภาพของการสมดุล สำหรับกรณีศึกษา A พบว่าสภาวะนี้เกิดขึ้นที่ความสูง 5.6 เมตร และที่ความสูง 5.3 เมตร ที่กรณีศึกษา B ตามลำดับ

5) Fully Plastic State หลังผ่านสภาวะ Limit Equilibrium State แล้วหากเพิ่มความสูงคันทางต่อไปทำให้สมดุลของระบบเสียไป เกิดการขยายตัวของ Yield Zone อย่างรวดเร็วจนเต็มชั้นดินฐานราก คันทางเกิดการเคลื่อนพัง เรียกสภาวะนี้ว่า “Fully Plastic State”

5. พฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้นในดินคันทาง

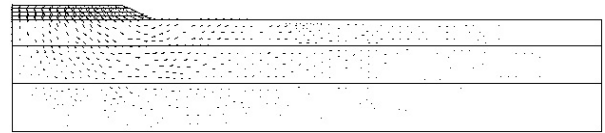
เมื่อพิจารณาในส่วนของคันทางในภาพที่ 4 พบว่า เกิดการ yield ตั้งแต่เริ่มต้นถมคันทางในสภาวะ Elastic จนกระทั่งคันทางเกิดการพังทลายในสภาวะ Fully Plastic ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณการทรุดตัวของดิน (Differential Settlement) ที่กึ่งกลางคันทางและที่บริเวณขอบคันทาง(Toe Embankment) ที่อัตราเพิ่ม σ_3 ในดินคันทางน้อยกว่าอัตราเพิ่มของ σ_1 ทำให้เกิด Maximum Shear Stress มากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับสภาพปัญหาจริงที่มักสังเกตเห็น Tension Crack ในขณะก่อสร้างพื้นผิวถนนบนดินอ่อน



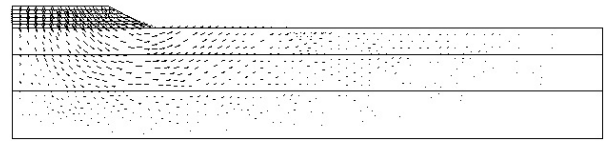
รูปที่ 5 แสดงสภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อดินคันทาง

6. พฤติกรรมด้านการเคลื่อนตัวของดินฐานราก

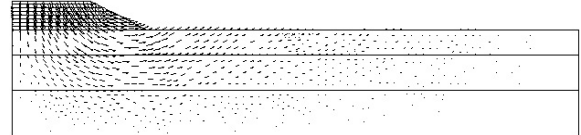
เมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นพบว่ารูปแบบการเคลื่อนตัวทั้งกรณีศึกษา A และกรณีศึกษา B จะให้ผลสอดคล้องกันโดยปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับการขยายตัวของ Plastic Zone ดังแสดงในภาพที่ 6 เมื่อเริ่มต้นถมคันทางดินอยู่ในสภาวะ Elastic State ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นยังมีค่าไม่มากนัก จากนั้นเมื่อดินเข้าสู่ First Yield State



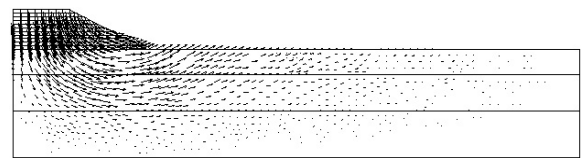
ก) Elastic State (H= 2m ขยาย 10 เท่า)



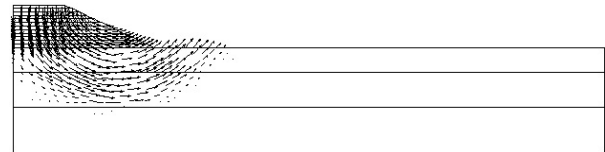
ข) First Yield State (H=3.1m ขยาย 10 เท่า)



ค) Contained Plastic Flow State (H=4.0m,ขยาย 10 เท่า)



ง) Limit Equilibrium State (H=5.6mขยาย 10 เท่า)



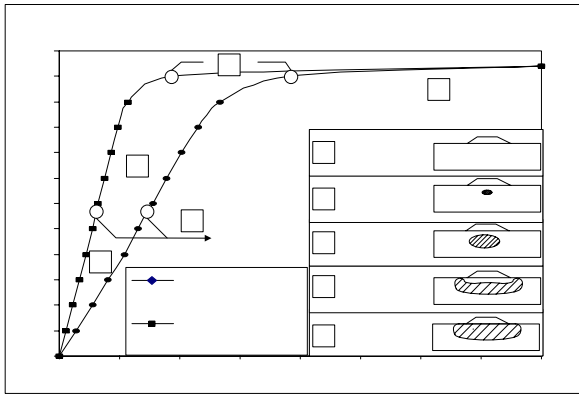
จ) Fully Plastic State (H=5.6m ขยาย 10 เท่า)

รูปที่ 6 Deformation Arrow การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ

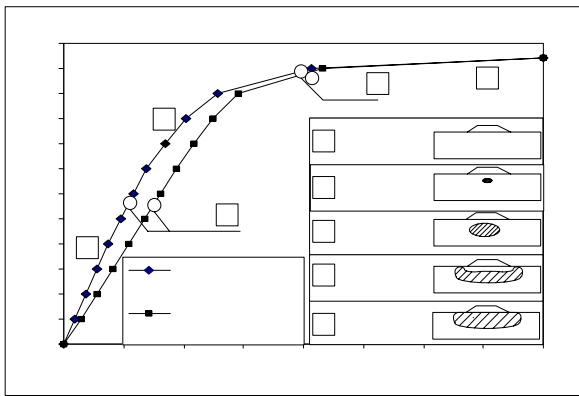
ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Plastic Deformation และจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตาม Plastic Zone ที่เพิ่มขึ้นในสภาวะ Contained Plastic Flow State เมื่อเข้าสู่สภาวะ Limit Equilibrium State การเคลื่อนตัวของดินฐานรากจะ Form ตัวให้เห็นเป็นรูปโค้งเริ่มเห็นพื้นผิวการวิบัติและจะเห็นพื้นผิวการวิบัติชัดเจนเมื่อดินเกิดการวิบัติในสภาวะ Fully Plastic State

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวในแนวตั้งสูงสุด, การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดกับความสูงของคันทางพบว่าในช่วงสภาวะ Elastic การทรุดตัวในแนวตั้งสูงสุด, การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดจะมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นตามความสูงคันทางโดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและเมื่อเพิ่มความสูงคันทางจนกระทั่งถึงความสูงที่ดินคันทางเข้าสู่สภาวะ First Yield Point ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจะเพิ่มสูงมากขึ้นตาม

Plastic Zone ที่ขยายตัวลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟจะเริ่มเป็นแนวโค้งมีความชันลดลงเรื่อยๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ในขณะที่คันทางเกิดการพังทลาย(Fully Elastic State) รายละเอียดดังสังเกตได้จากภาพที่ 7



ก) กรณีศึกษา A



ข) กรณีศึกษา B

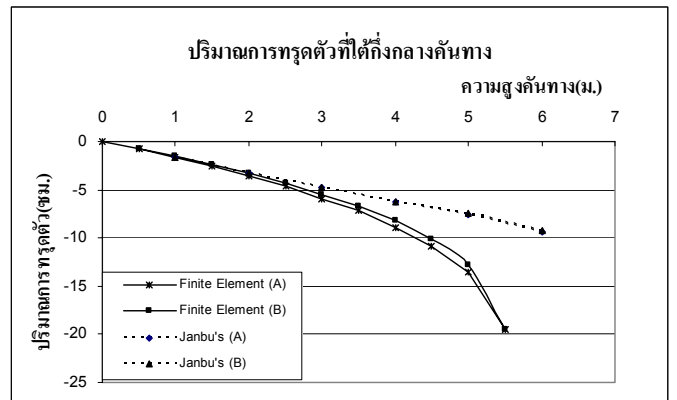
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวแนวตั้งสูงสุด, การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดกับความสูงคันทางที่สถานะต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบการทรุดตัวที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางคันทางที่ได้จากวิธี Finite Element กับการคำนวณโดยวิธีการของ Janbu ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎี Elasticity มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$S_e = A_1 A_2 \frac{q_o}{E_s} \quad (1)$$

โดยที่ A_1 เป็น ฟังก์ชันของ H/B และ L/B, A_2 เป็น ฟังก์ชันของ D/B สำหรับคันทางซึ่งเป็น Strip Load จะมีค่าเท่ากับ 1, q_o คือน้ำหนักแรงมีหน่วยเป็น kN/m^2 , E_s คือ ค่า Elastic Modulus เฉลี่ย มีหน่วยเป็น kN/m^2 พบว่าค่าการทรุดตัวที่สถานะ Elastic State (ช่วงความสูงคันทาง 0.5 – 3 เมตร) ค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันมากแต่เมื่อความสูงคันทางเริ่มเกิด Plastic Zone ค่าที่ได้จากวิธี Finite Element ซึ่งรวมอิทธิพลของ

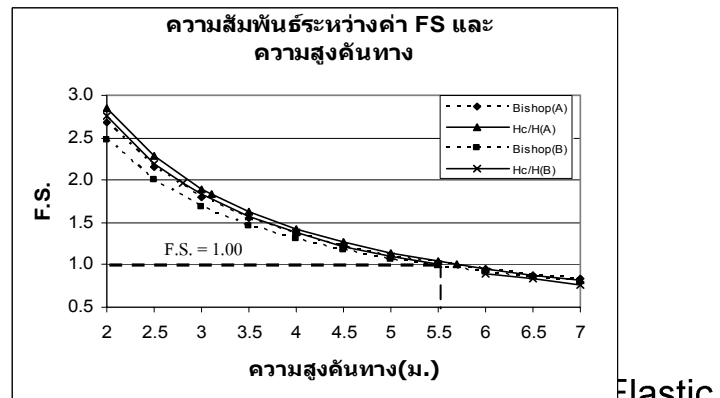
Plastic Deformation จะมีค่าสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ปริมาณการทรุดตัวที่กึ่งกลางคันทาง

7. พฤติกรรมด้านเสถียรภาพคันทาง

ในการศึกษาพฤติกรรมด้านเสถียรภาพของคันทางจะใช้วิธีเปรียบเทียบความสูงวิกฤติซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์ Finite Element และวิธี Simplify Bishop ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวิธีเปรียบเทียบความสูงวิกฤตินั้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FS และความสูงคันทาง

สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงที่คันทางเกิด State 1 First Yield State 2 Contained Plastic State 3 Flow State 4 Limit Equilibrium State 5 Fully Plastic State

ฟังก์ชัน H_c ต่อความสูงที่สถานะที่ต้องการ (H) แสดงดังสมการ

$$FS = \frac{H_c}{H} \quad (2)$$

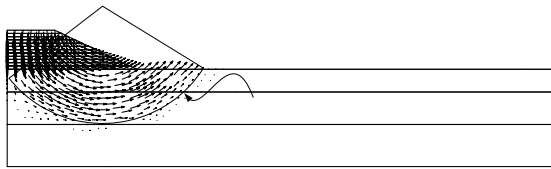
เมื่อ H_c คือ ความสูงคันทางที่สถานะ Limit Equilibrium Settlement Maximum Lateral Displacement

วิเคราะห์ Maximum Lateral Displacement

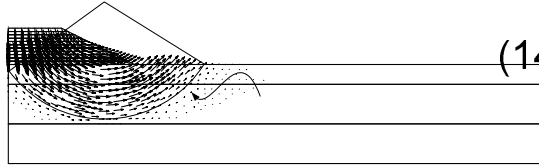
3

3

5



กรณีศึกษา A



กรณีศึกษา B

รูปที่ 10 ตำแหน่งศูนย์กลางและรัศมีพื้นผิววิกฤติ

(14.2, 8.3)

(13.8, 8.5)

8. สรุป

พฤติกรรมทางกลทั้ง 3 ในสถานะ Elastic State ที่ได้จากการวิเคราะห์โดย Finite Element ให้ค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ในสถานะ Limit Equilibrium State ให้ผลดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่นิยมใช้ปัจจุบัน (บนพื้นฐานของ Rigid Mechanics) คือ ให้ค่า อัตราส่วนความปลอดภัย ประมาณ 1.00 ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่า Continuum Mechanics สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพตั้งแต่เริ่มต้นถมคันทางจนกระทั่งคันทางเกิดการพังทลายได้ค่อนข้างดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] มณฑา ดันดิพรหมินทร์, 2546, แผนภูมิการวิเคราะห์ความสูงคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยวิธี Simplify Bishop มหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, เกษตรศาสตร์.
- [2] วิชาญ ภูพัฒน์, 2517, ถนนบนดินอ่อน., รายงาน ฉบับที่ วว. 10., กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง.
- [3] Lambe, T.W. and Whitman, Robert V., 1979. Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Son, Inc. Singapore.

R=15.5 m

Failure Line by
Simplify Bishop

จากการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบค่า FS ที่ได้จากการเทียบความสูงวิกฤติกับวิธีของ Simplify Bishop ทั้งกรณีศึกษา A และกรณีศึกษา B มีค่าใกล้เคียงกันมากตั้งแต่เริ่มถมคันทางจนกระทั่งถึงสถานะที่คันทางเกิดการพังทลาย โดยเฉพาะที่สถานะ Limit Equilibrium การวิเคราะห์โดยวิธีความสูงวิกฤติ ที่ความสูง 5.6 เมตรสำหรับกรณีศึกษา A และ ที่ 5.4 เมตรสำหรับกรณีศึกษา B ให้ค่า 1.00 และวิธี Simplify Bishop (รวมอิทธิพลของ Tension Crack) ที่ผิวดินคันทางด้วยให้ค่า 1.09 และ 1.05 ตามลำดับ โดยผิวการวิกฤติมีลักษณะเป็นแนวโค้งของวงกลมตัดผ่านชั้นดินคันทางและดินฐานรากและเส้นรัศมีสัมผัสกับผิวชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากวิธีเปรียบเทียบความสูงวิกฤติและวิธี Simplify Bishop

วิธีที่ใช้ในการคำนวณ	กรณีศึกษา A	กรณีศึกษา B
ความสูงคันทางที่สถานะ Limit Equilibrium	5.60 เมตร	5.40 เมตร
1. เปรียบเทียบความสูงวิกฤติ	1.09	1.05
2. Simplify Bishop (Crack)	1.09	1.05

นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นผิวการวิกฤติ (Slip Surface) ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ Finite Element และการวิเคราะห์โดยวิธี Simplify Bishop จะมีตำแหน่งศูนย์กลางและรัศมีของวงกลมใกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 10 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางและรัศมีของเส้นผิวการวิกฤติ