

**อิทธิพลของแฟกเตอร์การยึดเกาะต่อความต้าน  
ด้านข้างของฐานรากฝังลึกมากในดินเหนียว**  
**Influence of Adhesion Factor on Lateral Resistance of  
Deeply Embedded Foundations in Cohesive Soils**

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์\* บุญชัย อุกฤษฏชน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

\*Corresponding author: E-mail: suraparb@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาความต้านด้านข้างวิบัติแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากฝังลึกมากในดินเหนียว รูปร่างของฐานรากที่ศึกษา มี ฐานรากรูปวงกลม ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง และฐานรากแบบแผ่นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของปัญหา ฐานรากรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงมีเส้นทแยงมุม (D) ฐานรากแบบแผ่นมีความยาว (D) ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดินเหนียวถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ ฐานรากรูปวงกลมและฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียงถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอีลาสติก ฐานรากแบบแผ่นถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบเพลทที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอีลาสติก ชั้นส่วนเชื่อมต่อดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นรอบรูปของฐานรากทุกรูป แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและฐานรากมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ ผลที่ได้นำเสนอในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติของความต้านด้านข้างวิบัติ ผลจากงานวิจัยนี้ถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต

**คำสำคัญ:** ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระนาบความเครียด ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฐานรากรูปวงกลม ฐานรากสี่เหลี่ยม ฐานรากแบบแผ่น

**ABSTRACT**

This paper presents undrained lateral failure load of deeply embedded foundations in clay. The geometrical sections of foundations include circular foundation, rotated square foundation, and plate foundation. The finite element method with the two dimensional plane strain condition is employed to determine the failure of this problem. The circular foundation has the diameter (D), whereas the rotated square foundation is of the diagonal (D), and the plate foundation is of length (D). For finite element analyses, the clay is modelled as volume elements with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The circular foundation and rotated square foundation are modelled as volume elements with elastic material. The plate foundation is modelled as plate elements with an elastic material. Soil-structure interface is used around circumference lengths of all foundations. The adhesion factor between clay and pile is also studied in the range of 0 – 1 with the increment of 0.1. The adhesion factor of zero

means fully smooth surface and that of one means fully rough surface. The results of analyses are presented in terms of normalized failure lateral load. The computational results are compared with published research in the past.

**Keyword:** Numerical Analysis, Plane Strain, Finite Element, Circular Foundation, Square Foundation, Plate Foundation

## 1. บทนำ

ความดันวิบัติของฐานรากหรือเสาเข็มรับแรงดันด้านข้างถูกเสนอครั้งแรกโดย Broms [1] ส่วนหนึ่งที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือการกล่าวถึงความดันวิบัติ (Limit Pressure) หรือแรงหารด้วยความยาวของเสาเข็ม โดยรูปร่างของฐานรากที่ Broms [1] ได้ศึกษาคือรูปร่างแบบฐานรากรูปวงกลม รูปร่างแบบฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง และรูปร่างแบบฐานรากแบบแผ่น Broms [1] ได้พิจารณาผิวสัมผัสหรือค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม ( $\alpha$ ) ที่เท่ากับ 1 หรือผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) และที่เท่ากับ 0 หรือผิวสัมผัสเป็นเส้นสมบูรณ์ (Smooth Surface) เท่านั้น ไม่ได้พิจารณาค่าผิวสัมผัสอื่น ๆ ระหว่าง 1 และ 0 โดยแฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ  $\alpha = s_u/s_u$  โดย  $s_u$  คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม และ  $s_u$  คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวรอบฐานราก

Randolph และ Houlsby [2] ได้นำเสนอแบบจำลองของเสาเข็มรูปวงกลมรับความดันด้านข้างในดินเหนียวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาค่าขีดจำกัด (Limit Analysis) ทั้งวิธีขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ในการหาผลเฉลยของเสาเข็มรูปวงกลมรับความดันด้านข้างซึ่งสัมพันธ์กับแฟกเตอร์การยึดเกาะ ( $\alpha$ ) โดย Randolph และ Houlsby [2] ได้พิจารณาค่า  $\alpha$  ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 ผลเฉลยของขอบเขตบนและของเขตล่างยังมีความห่างกันพอสมควร

ต่อมา Martin และ Randolph [3] ได้พัฒนาแบบจำลองของเสาเข็มรูปวงกลมรับความดันด้านข้างในดินเหนียวด้วยวิธีขอบเขตบนขึ้นมาใหม่ เพื่อพัฒนาค่าความวิบัติของขอบเขตบนให้มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่างมากขึ้นกว่าวิธีของ Randolph และ Houlsby [2]

Ukritchon [4] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาค่าขีดจำกัด (Finite Element Limit Analysis) ทั้งวิธีขอบเขตบนและวิธีขอบเขตล่างในการหาค่าความวิบัติของปัญหาเสาเข็มรูปวงกลมเช่นกัน นอกเหนือจากนี้ Ukritchon [4] ยังได้หาผลเฉลยของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง และฐานรากแบบแผ่นเพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยของ Broms [1] อีกด้วย แต่ผลเฉลยที่ Ukritchon [4] ได้หาเอาไว้มีเพียงผลเฉลยที่ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะ ( $\alpha$ ) ที่เท่ากับ 1 และ 0 เท่านั้น

Chaudhry [5] ได้วิเคราะห์เสาเข็มหรือฐานรากรูปวงกลมฝังลึกมากในดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ผลของงานวิจัยเป็นการเปรียบเทียบแรงกระทำและการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ผลการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกลุ่มเปรียบเทียบกับเสาเข็มเดี่ยวอีกด้วย

นอกเหนือจากผลเฉลยจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ก็ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้การทดสอบภาคสนาม (In Situ Test) ในการหาค่าความดันวิบัติ (Limit Pressure) ของเสาเข็มอีกจำนวนมากเช่นงานวิจัยของ Gibson และ Anderson [6], Reese et al. [7] และ Marsland และ Randolph [8]

สำหรับหนังสือที่เกี่ยวกับความดันด้านข้างวิบัติของฐานรากเช่นหนังสือของ Reese และ Van Impe [9] หรือหนังสือของ Poulos และ Davis [10] อย่างไรก็ตาม ไม่มีกล่าวถึงผลเฉลยของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงและฐานรากแบบแผ่นเอาไว้

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าความดันด้านข้างวิบัติแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากฝังลึกมากในดินเหนียว รูปร่างของฐานรากที่ศึกษามี ฐานรากรูปวงกลม ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง และฐานรากแบบแผ่น วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติ

ถูกนำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของปัญหาที่ฐานรากรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงมีเส้นทแยงมุม (D) ฐานรากแบบแผ่นมีความยาว (D) ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต

## 2. วิธีการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ Plaxis 2D โดย Brinkgreve et al. [11], [12] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหา

### 2.1 แบบจำลองของดินเหนียว

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์จำลองให้ดินเหนียวเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ อัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ( $E/s_u$ ) = 500 ซึ่งเป็นอัตราส่วนโมดูลัสของยังที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์แรงวิบัติของโครงสร้างในดินเหนียว กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $s_u$ ) มุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) = 0 มุมขยายตัวเชิงปริมาตร ( $\psi$ ) = 0 อัตราส่วนของปัวซอง ( $\nu$ ) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร และดินเหนียวเป็นดินแบบไม่มีน้ำหนักหรือ (Weightless Soil),  $\gamma = 0$  เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นหน้าตัดขวางของเสาเข็ม (Top View Section) ทำให้หากใส่หน่วยน้ำหนัก แบบจำลองจะไม่ใช้แบบจำลองหน้าตัดขวางของเสาเข็มอีกต่อไป โดยจะกลายเป็นแบบจำลองของฐานรากแบบหน้าตัดตั้ง (Side View Section) ที่พิจารณาความเค้นของน้ำหนักดินแทน ขอบเขตของแบบจำลองดินเหนียว มีความกว้างเป็น 4D และความยาวเป็น 8D รายละเอียดต่างๆแสดงในรูปที่ 1

### 2.2 แบบจำลองของฐานราก

ฐานรากรูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตร ฐานรากแบบแผ่นถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบแผ่น ฐานรากทั้งสามมีค่าอัตราส่วนของปัวซอง ( $\nu$ ) = 0.21 โมดูลัสของยัง ( $E$ ) =  $2.545 \times 10^7$  kPa ฐานรากรูปวงกลมมีเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง (D) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงมีเส้นทแยงมุม (D) ฐานรากแบบแผ่นมีความยาว (D) ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ฐานรากทั้งสามเป็นแบบอีลาสติกและไม่เกิดการวิบัติในชั้นส่วนโครงสร้าง

### 2.3 ชั้นส่วนเชื่อมต่อกันระหว่างฐานรากและดิน

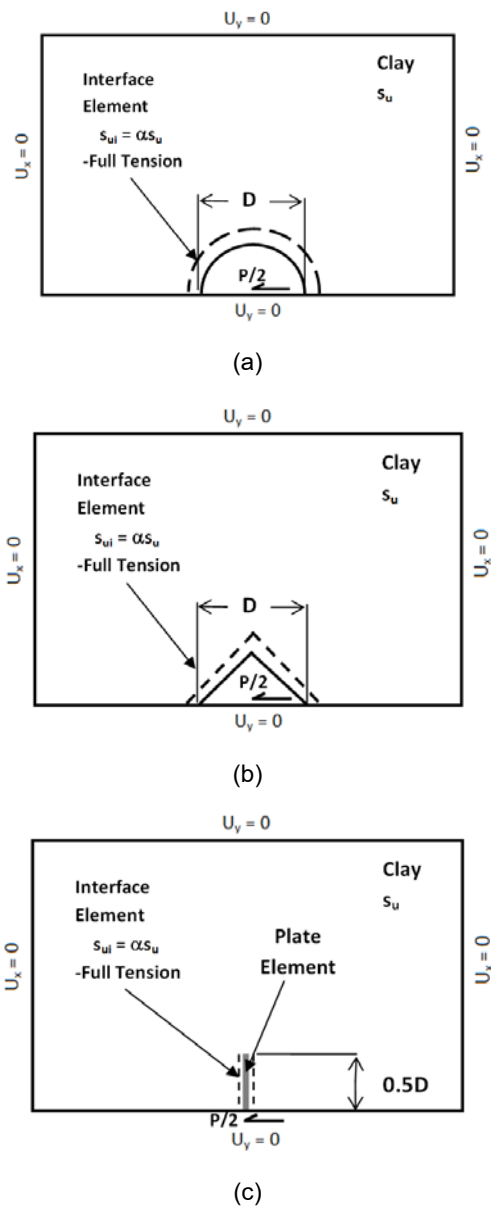
#### เหนียว

ชั้นส่วนเชื่อมต่อกันระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นรอบรูปของฐานรากทั้งสาม ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม ( $\alpha$ ) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 ชั้นส่วนเชื่อมต่อกันถูกกำหนดให้เป็นแบบรับแรงดึงได้โดยสมบูรณ์ (Full Tension) ในทุกกรณีของฐานราก

### 2.4 เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่

#### ขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองฐานรากทั้งสามถูกกำหนดให้ขอบบนและขอบล่างไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 แบบจำลองทั้งสามแบบของฐานรากใช้เพียงครั้งเดียว เนื่องจากปัญหาทั้งหมดมีความสมมาตรโดยใช้แกนแนวราบ เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองครึ่งเดียวของฐานราก ดังนั้น แรงวิบัติที่คำนวณได้จึงเป็นแรงเพียงครึ่งเดียวของแรงวิบัติ กำหนดให้ตำแหน่งของแรงกระทำกับฐานรากที่ศูนย์กลางของฐานราก ซึ่งการที่ไม่ใส่แรงกระทำที่ผิวสัมผัสของฐานรากเพื่อต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาของการเกิดการหมุนของแบบจำลอง ซึ่งอาจจะทำให้การคำนวณผิดพลาดได้

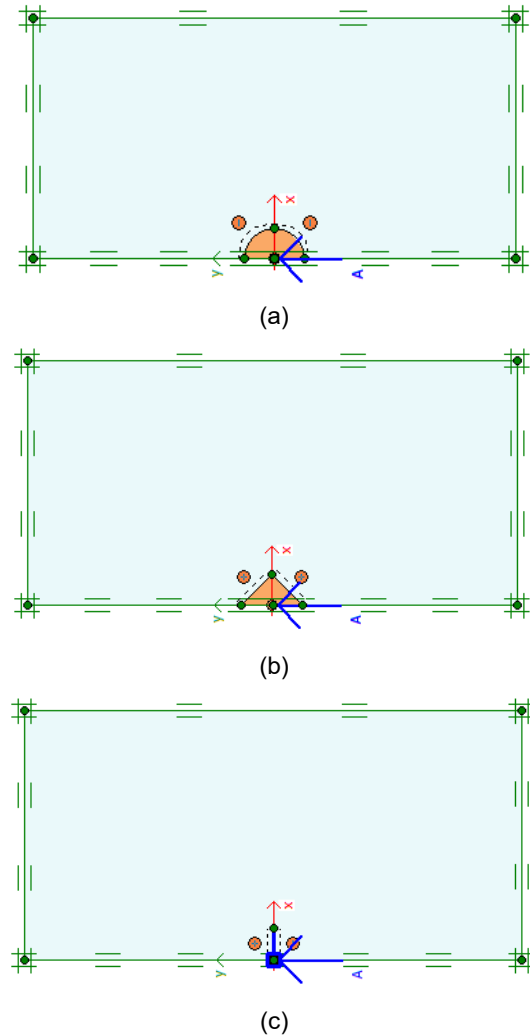


รูปที่ 1 ปัญหาฐานรากฝังลึกมากในดินเหนียว (a) ฐานรากรูปวงกลม (b) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง (c) ฐานรากแบบแผ่น

2.5 โครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ชั้นส่วนดินและฐานรากเป็นชั้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และความเค้นภายในชั้นส่วน 12 จุด (Stress Points) ชั้นส่วนเชื่อมต่อมี 10 จุดต่อ และความเค้นภายในชั้นส่วน 5 จุด รายละเอียดต่าง ๆ สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก

Brinkgreve et al. [11], [12] การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชั้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 3

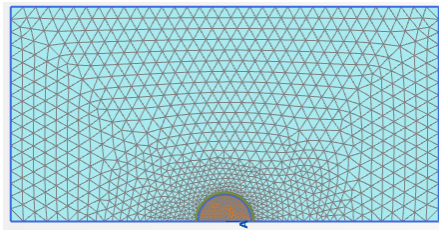


รูปที่ 2 แบบจำลองปัญหาฐานรากฝังลึกมากในดินเหนียวด้วยโปรแกรม Plaxis (a) ฐานรากรูปวงกลม (b) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง (c) ฐานรากแบบแผ่น

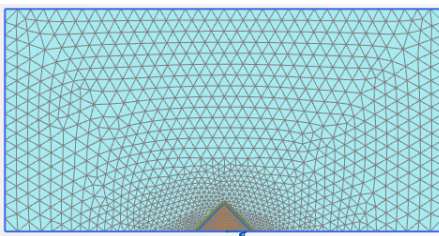
2.6 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรป้อนเข้าของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์คือความกว้าง (D) ของฐานรากทั้งสามแบบดังที่แสดงในรูปที่ 1 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $s_u$ ) แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม ( $\alpha$ ) = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1

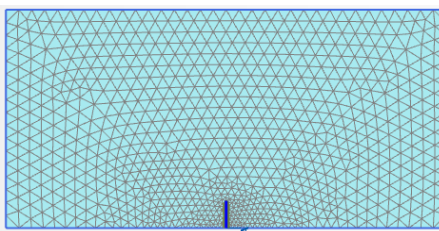
ผลตัวแปรไร้มิติเป็นฟังก์ชันของตัวแปร  
ป้อนเข้าคือ  $P/s_u D = f(\alpha)$  โดยที่  $P$  = ความดันด้านข้าง  
วิบัติแบบไม่ระบายน้ำของฐานราก



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3 ตัวอย่างโครงข่ายไฟไนต์อีลิเมนต์ (a) ฐานราก  
รูปวงกลม (b) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง (c)  
ฐานรากแบบแผ่น

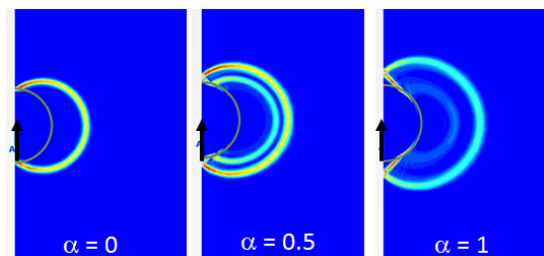
### 3. ผลการวิเคราะห์

#### 3.1 รูปแบบการวิบัติของฐานรากรูปวงกลม

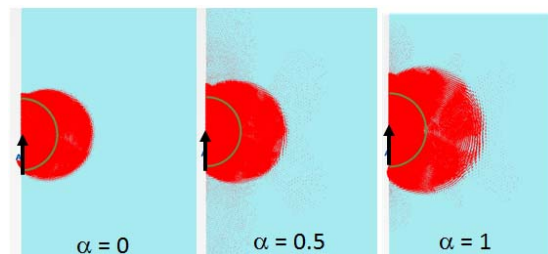
รูปที่ 4-6 แสดงตัวอย่างรูปแบบการวิบัติ  
(Failure Mechanism) ของปัญหาฐานรากรูปวงกลมฝัง  
ในดินเหนียว ผลรูปแบบการวิบัติประกอบด้วย Total  
Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour  
และ Plastic Point เปรียบเทียบระหว่างสามกรณีคือ  $\alpha$   
= 0, 0.5 และ 1 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4-5 พบว่ารูปแบบการวิบัติของ  
Incremental Shear Strain Contour ของทั้ง 3 กรณีมี

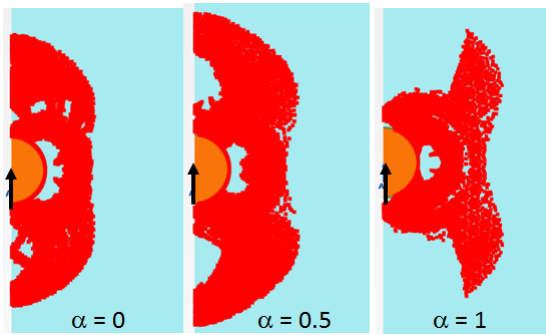
ลักษณะคล้ายกันโดยมีลักษณะเป็นรูปวงกลมและ  
ขยายตัวขึ้นเรื่อยๆตามค่า  $\alpha$  ที่เพิ่มขึ้นดังที่แสดงในรูปที่  
4 สำหรับรูปแบบการวิบัติแบบ Incremental Shear  
Strain Contour ของ  $\alpha = 0$  เส้นรอยเฉือนมีลักษณะเป็น  
เหมือนครึ่งวงกลมหนึ่งวงซ้อนอยู่บนเส้นรอบวงของฐาน  
รากรูปวงกลม เมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 พบว่าเส้นรอยเฉือน  
เพิ่มขึ้นเป็นรูปวงกลมสองวงซ้อนกันอยู่บนเส้นรอบวง  
ของฐานรากรูปวงกลม และเมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้นเป็น 1 พบว่าเส้น  
รอยเฉือนสองเส้นมีความห่างกันมากขึ้นและขยายใหญ่  
ขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งรูปแบบการวิบัติแบบ Total  
Increment Vector ก็เป็นเช่นเดียวกันดังที่แสดงในรูปที่  
5 สำหรับรูปแบบการวิบัติแบบ Plastic Point พบว่าที่  $\alpha$   
= 0 การกระจายตัวของจุดที่เข้าสู่สภาวะพลาสติกขยาย  
ออกไปจากฐานราก โดยมีลักษณะคล้ายรูปครึ่งวงรี  
จากนั้นเมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 พบว่าการกระจายตัวเพิ่ม  
มากขึ้นกว่าที่  $\alpha = 0$  แต่เมื่อ  $\alpha = 1$  พบว่าการกระจาย  
ตัวของจุดที่เข้าสู่สภาวะพลาสติกในแนวที่แรงกระทำมี  
จำนวนลดน้อยลงแตกต่างจากทั้งสองกรณีแรกดังที่แสดง  
ในรูปที่ 6



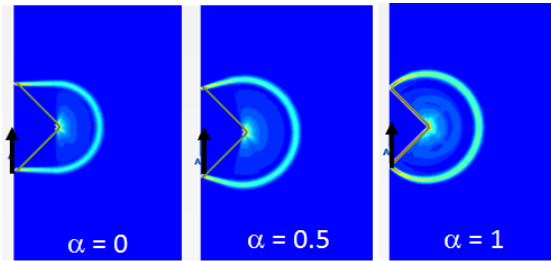
รูปที่ 4 Incremental Shear Strain Contour ของฐานราก  
รูปวงกลม



รูปที่ 5 Total Increment Vector ของฐานรากรูป  
วงกลม



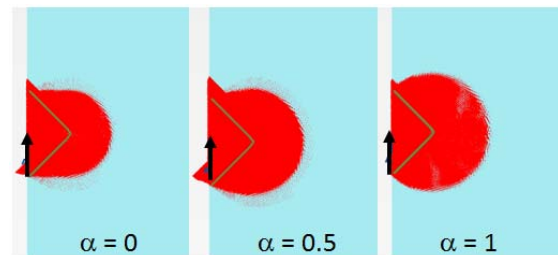
รูปที่ 6 Plastic Point ของฐานรากรูปวงกลม



รูปที่ 7 Incremental Shear Strain Contour ของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียง

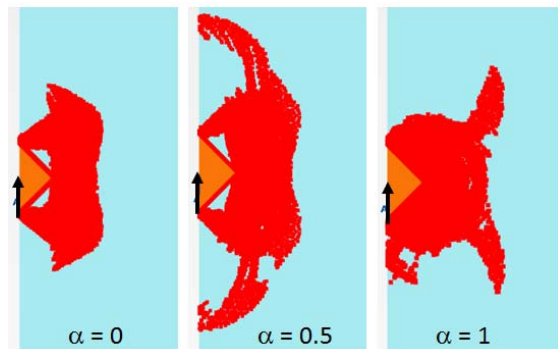
### 3.2 รูปแบบการวิบัติของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง

รูปที่ 7-9 แสดงตัวอย่างรูปแบบการวิบัติ (Failure Mechanism) ของปัญหาฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงฝังในดินเหนียว ผลรูปแบบการวิบัติประกอบด้วย Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point เปรียบเทียบระหว่างสามกรณีคือ  $\alpha = 0, 0.5$  และ  $1$  ตามลำดับ



รูปที่ 8 Total Increment Vector ของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียง

จากรูปที่ 7-9 พบว่ารูปแบบการวิบัติแบบ Incremental Shear Strain Contour ของ  $\alpha = 0$  เส้นรอยเฉือนมีลักษณะเป็นเหมือนรูปทรงกระบอกผสมวงกลม เมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น เส้นรอยเฉือนก็จะขยายตัวคล้ายรูปวงกลมมากขึ้นเช่นกันดังที่แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งรูปแบบการวิบัติแบบ Total Increment Vector ก็เป็นเช่นเดียวกันดังที่แสดงในรูปที่ 8 สำหรับการวิบัติแบบ Plastic Point พบว่าที่  $\alpha = 0$  การกระจายตัวของจุดที่เข้าสู่สภาวะพลาสติกขยายออกโดยเริ่มจากตรงมุมของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียงและขยายตัวออกไป เมื่อ  $\alpha$  เพิ่มเป็น  $0.5$  พบว่ามีการขยายตัวของจุดที่เข้าสู่สภาวะพลาสติกมากที่สุด และเมื่อ  $\alpha = 1$  พบว่าการกระจายตัวของจุดที่เข้าสู่สภาพพลาสติกในแนวที่แรงกระทำมีจำนวนลดน้อยลงและมีลักษณะคล้ายกับในกรณี  $\alpha = 0$  ดังที่แสดงในรูปที่ 9

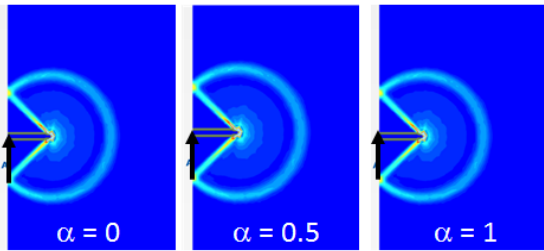


รูปที่ 9 Plastic Point ของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียง

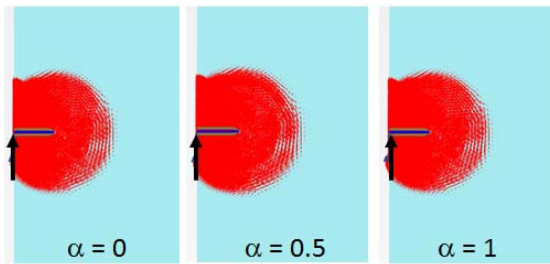
### 3.3 รูปแบบการวิบัติของฐานรากแบบแผ่น

รูปที่ 10-12 แสดงตัวอย่างรูปแบบการวิบัติ (Failure Mechanism) ของปัญหาฐานรากแบบแผ่นฝังในดินเหนียว ผลรูปแบบการวิบัติประกอบด้วย Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point เปรียบเทียบระหว่างสามกรณีคือ  $\alpha = 0, 0.5$  และ  $1$  ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบการวิบัติทั้งสามกรณีเหมือนกันโดยเส้นรอยเฉือนก็จะขยายตัวคล้ายรูปวงกลม รวมไปถึงการวิบัติ

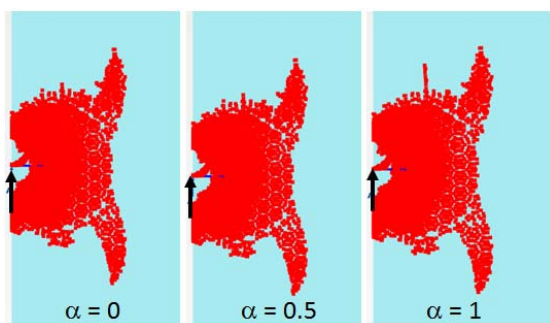
แบบ Total Increment Vector ก็มีลักษณะเป็นรูปวงกลมด้วย สำหรับ Plastic Point ของทั้งสามกรณีที่  $\alpha = 0$ , 0.5 และ 1 ก็มีลักษณะเหมือนกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 12 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะ ( $\alpha$ ) ไม่มีผลต่อปัญหาฐานรากแบบแผ่น



รูปที่ 10 Incremental Shear Strain Contour ของฐานแบบแผ่น



รูปที่ 11 Total Increment Vector ของฐานรากแบบแผ่น

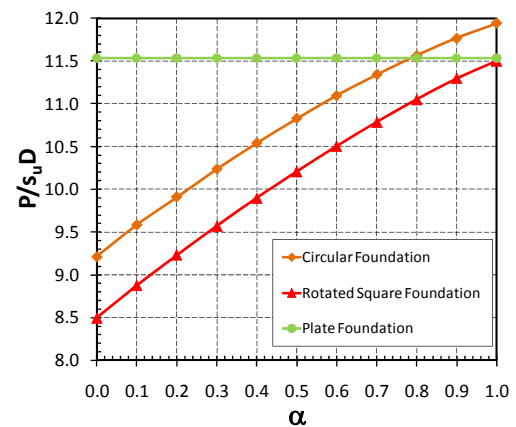


รูปที่ 12 Plastic Point ของฐานรากแบบแผ่น

### 3.4 ผลเฉลยความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากทั้ง 3 แบบ

รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยความต้านทานข้างวิบัติ ( $P/s_u D$ ) ของแบบจำลองฐานรากรูป

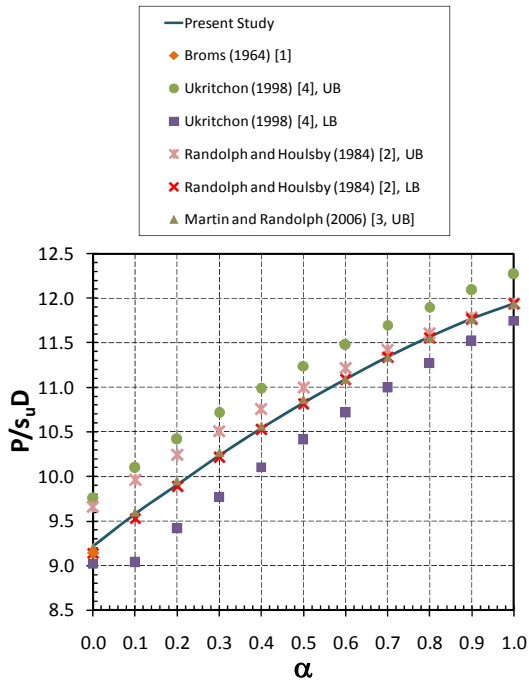
วงกลม, ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียง และฐานรากแบบแผ่น จากรูปพบว่าผลเฉลยฐานรากรูปวงกลมและฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะ ( $\alpha$ ) แบบไม่เชิงเส้น สำหรับฐานรากแบบแผ่นพบว่าค่า  $\alpha$  ไม่มีผลต่อความต้านทานข้างวิบัติ ( $P/s_u D$ ) กล่าวคือค่าความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากแบบแผ่นมีค่าคงที่ โดยทั่วไปเมื่อค่า  $\alpha$  คงที่และน้อยกว่า 0.7 ความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากแบบแผ่นมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือฐานรากรูปวงกลม และน้อยที่สุดคือฐานรากสี่เหลี่ยมแบบเอียง อย่างไรก็ตาม กรณีฐานรากเป็นแบบหยาบสมบูรณ์หรือ  $\alpha = 1$  ความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากรูปวงกลมจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือแบบแผ่นและแบบสี่เหลี่ยมเอียงจะมีค่าวิบัติเท่ากัน คือ 11.53



รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลเฉลยความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากทั้งสามกรณี

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยของฐานรากรูปวงกลมกับงานวิจัยในอดีต เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยขอบเขตบนของ Martin และ Randolph [3] และขอบเขตล่างของ Randolph และ Houlsby [2] (ซึ่งผลเฉลยของขอบเขตบนและขอบเขตล่างของทั้งสองงานวิจัยมีค่าเข้าใกล้กันจนเกือบเป็น Exact Solution) พบว่าผลเฉลยจากงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของทั้งสองพอดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่  $\alpha = 1$  ซึ่งงานวิจัยในอดีตได้มีการหา Exact Solution

เอาไว้แล้วคือ  $P/s_u D = 11.94$  โดยงานวิจัยนี้ก็ได้อ่าค่า  $P/s_u D = 11.94$  เช่นเดียวกัน

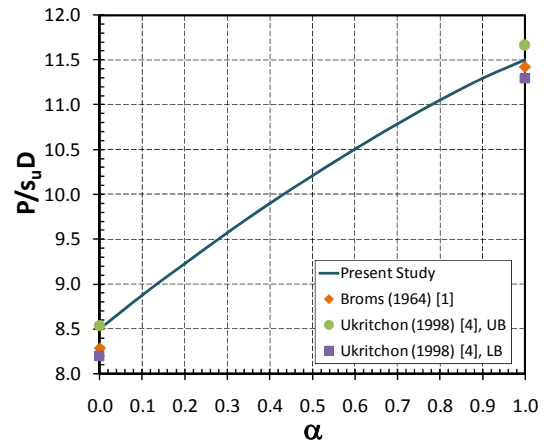


รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าผลเฉลยความต้านทานวิบัติของฐานรากรูปวงกลมกับงานวิจัยในอดีต

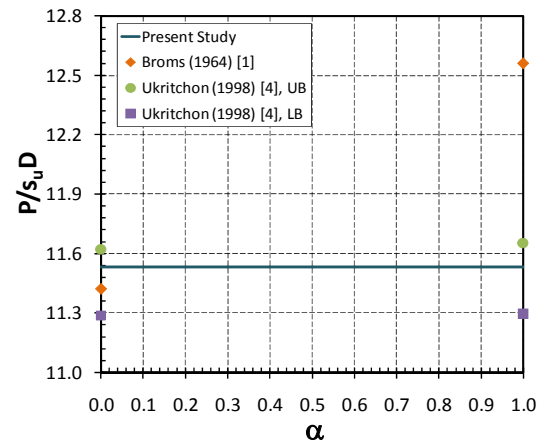
รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยของฐานรากรูปวงกลมกับงานวิจัยในอดีต เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยขอบเขตบนของ Martin และ Randolph [3] และขอบเขตล่างของ Randolph และ Housby [2] (ซึ่งผลเฉลยของขอบเขตบนและขอบเขตล่างของทั้งสองงานวิจัยมีค่าเข้าใกล้กันจนเกือบเป็น Exact Solution) พบว่าผลเฉลยจากงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของทั้งสองพอดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่  $\alpha = 1$  ซึ่งงานวิจัยในอดีตได้มีการหา Exact Solution เอาไว้แล้วคือ  $P/s_u D = 11.94$  โดยงานวิจัยนี้ก็ได้อ่าค่า  $P/s_u D = 11.94$  เช่นเดียวกัน

รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียงกับงานวิจัยในอดีต โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Broms [1] และ Ukritchon [4] ซึ่งงานวิจัยของทั้งสองได้หาค่า  $P/s_u D$  ของฐานรากรูป

สี่เหลี่ยมแบบเอียงไว้ที่ค่า  $\alpha = 0$  และ 1 เท่านั้น จากการเปรียบเทียบพบว่าผลเฉลยของงานวิจัยนี้ที่  $\alpha = 0$  และ 1 มีค่าอยู่ระหว่างค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของ Ukritchon [4] และมีค่ามากกว่าผลเฉลยของ Broms [1]



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบค่าผลเฉลยความต้านทานวิบัติของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียงกับงานวิจัยในอดีต



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบค่าผลเฉลยความต้านทานวิบัติของฐานรากแบบแผ่นกับงานวิจัยในอดีต

รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยของฐานรากแบบแผ่นกับงานวิจัยในอดีตโดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Broms [1] และ Ukritchon [4] เช่นเดียวกัน จากรูปพบว่าค่า  $P/s_u D$  ของฐานรากแบบแผ่นอยู่ระหว่างค่า



ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของ Ukritchon [4] เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Broms [1] พบว่าที่  $\alpha = 0$  ผลเฉลยของงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับที่  $\alpha = 1$  พบว่าผลเฉลยของ Broms [1] มีค่ามากเกินไปเป็นอย่างมาก ซึ่งมากกว่าขอบเขตบนของ Ukritchon [4] และผลเฉลยจากงานวิจัยนี้

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาความต้านทานข้างวิบัติแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากฝังลึกมากในดินเหนียว รูปร่างของฐานรากที่ศึกษามี ฐานรากรูปวงกลม ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง และฐานรากแบบแผ่น วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของปัญหานี้ ฐานรากรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงมีเส้นทแยงมุม (D) ฐานรากแบบแผ่นมีความยาว (D)

จากผลการศึกษาพบว่าผลเฉลยของฐานรากรูปวงกลมและรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียงขึ้นอยู่กับค่าแฟกเตอร์การบีบเกาะ ( $\alpha$ ) เมื่อค่า  $\alpha$  มีค่ามากขึ้นความต้านทานข้างวิบัติแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากทั้งสองก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับฐานรากแบบแผ่น ค่า  $\alpha$  จะไม่มีผลต่อความต้านทานข้างวิบัติของฐานราก ( $P/s_uD$ ) กล่าวคือค่าความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากแบบแผ่นมีค่าคงที่ กรณีฐานรากเป็นแบบหยาบสมบูรณ์หรือ  $\alpha = 1$  ความต้านทานวิบัติของฐานรากรูปวงกลมจะมีค่ามากที่สุดคือ  $P/s_uD = 11.94$  แต่ความต้านทานวิบัติของฐานรากแบบแผ่นจะมีค่าใกล้เคียงกันกับฐานรากรูปสี่เหลี่ยมแบบเอียงคือ  $P/s_uD = 11.53$  ต่างจากกรณีไม่หยาบสมบูรณ์คือ  $\alpha < 0.7$  ความต้านทานข้างวิบัติของฐานรากแบบแผ่นมีค่ามากที่สุดรองลงมาคือฐานรากรูปวงกลมและน้อยที่สุดคือฐานรากสี่เหลี่ยมแบบเอียง

เมื่อนำผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของงานวิจัยนี้ไปเทียบกับการวิเคราะห์ลิมิต (Limit Analysis) ของงานวิจัยในอดีตพบว่าผลเฉลยของ

งานวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างทุกกรณี

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] B.B. Broms, "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils," *Journal of the soil mechanics and foundation*, no. 90 (2), pp. 27-63, 1964.
- [2] M.F. Randolph and G. T. Houlsby. "The Limiting Pressure on Circular Pile Loaded Laterally in Cohesive Soil," *Géotechnique* 34, no. 4, pp. 613-623, (1984).
- [3] C.M. Martin and M. F. Randolph, "Upper-Bound Analysis of Lateral Pile Capacity in Cohesive Soil," *Géotechnique* 56, no. 2, pp. 141-145, 2006.
- [4] B. Ukritchon. *Application of Numerical Limit Analyses For Undrained Stability Problems in Clay*. ScD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, USA, (1998).
- [5] A.R. Chaudhry. *Static Pile-Soil-Pile Interaction in Offshore Pile Groups*. PhD Thesis, University of Oxford, UK, (1994).
- [6] R.E. Gibson and W.F. Anderson, "In Situ Measurement of Soil Properties with Pressuremeter," *Civ. Engng. Pub., Wks Rev.* 56, pp. 615, (1961).
- [7] L.C. Reese, W.R. Cox, and F. D. Koop. "Field Testing of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay". *7th Annu. Offshore Technology Conf.*, Houston: pp. 671-690, (1975).
- [8] A. Marsland and M.F. Randolph. "Comparison of the Result from Pressuremeter Test and Large in Situ Plate Tests in London Clay," *Géotechnique* 27, no. 2, pp. 217-243, 1977.
- [9] Van Reese, L.C. and Impe, W.F., "Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading," *Taylor & Francis Group plc*, London, UK, 2007.

- [10] Poulos, H.G. and Davis, E.H., "Pile Foundation Analysis and Design," *John Wiley & Sons*, USA, 1980.
- [11] Brinkgreve, R.B.J. et al, "PLAXIS 2D Version 8 Manual," *A.A. Balkema Publishers*, 2002.
- [12] Brinkgreve, R.B.J., "PLAXIS 2D Version 8.5 Finite-Element Code for Soil and Rock Analyses: Complete Set of Manuals, R. Brinkgreve, ed., Balkema, Rotterdam," *the Netherlands*, 2007.