

กำลังต้านทานแรงเฉือนและเสถียรภาพของกากดินขาว  
ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย  
**Shear Strength and Stability of Industrial Waste of Kaolin  
Stabilized with Cement - Fly Ash**

อรุณเดช บุญสูง

วิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง ภาควิชาโยธาและการออกแบบ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

E-mail: A.Boonsung9@Gmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของกากดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียวให้ค่ากำลังค่อนข้างต่ำแม้จะเพิ่มปริมาณเป็น 2 เท่า ส่วนการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวและปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยพบว่าการพัฒนา กำลังจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม โดยค่าของโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่มเช่นเดียวกับการพัฒนา กำลังต้านทานแรงเฉือน นอกจากนั้นได้นำค่าจากการทดสอบจำลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ใน 2 ลักษณะคือลาดดิน และฐานรากตื้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย

**คำสำคัญ:** ดินขาว การปรับปรุงคุณสมบัติดิน เสถียรภาพลาดดิน ฐานราก

**ABSTRACT**

This paper presents a result of shear strength of industrial waste of kaolin improved by cement and fly ash. The results show that the shear strength increases a little bit although adding double amount of fly ash. While industrial waste of kaolin improved by only cement and cement with fly ash. The results show that the strength and modulus of elasticity(E) were increased by amount of binder and curing time. The parameters from this test were used in the analysis of slope stability and shallow foundation by finite element method (FEM) for understanding behavior and designing is safely. The parameters from simulation were used in the analysis of slope stability and Shallow foundation using finite element method for understanding of behavior and using in design.

**Keyword:** Kaolin, Soil Improvement, Slope Stability, Shallow Foundation

## 1. บทนำ

ดินขาวเป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual Soil) มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียว น้อยซึ่งประกอบด้วยแร่กาโอลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ ดินขาวถูกนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายทั้งในลักษณะเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่ สี เครื่องสำอาง ยารักษาโรค และทำหน้าที่เป็นวัตถุติดหลักเช่นใน เครื่องปั้นดินเผาและผลิตภัณฑ์ก่อสร้างเป็นต้น [1] ในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวกระจายอยู่ทั่วประเทศได้แก่ เชียงราย ลำปาง อุดรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง ชุมพร และนราธิวาส โดยมีจำนวนเหมืองดินขาวเปิดทำการทั่วประเทศรวม 64 เหมืองให้ผลผลิตของเนื้อดินขาวถึง 420,164.9 ตัน การนำแร่ดินขาวไปใช้งานนั้นต้องผ่านกระบวนการคัดแยกสิ่งที่ไม่เจือปนที่มีอยู่ถึงร้อยละ 70 ซึ่งเรียกว่า “กากดินขาว” ออกจากอนุภาคเนื้อดินขาวซึ่งจะมีปริมาณเพียงร้อยละ 30 โดยสถานประกอบการจะกองเก็บกากดินขาวไว้ในที่โล่งทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย เกิดเป็นมลพิษทางอากาศต่อชุมชนหรือพื้นที่ข้างเคียง[2] ดังนั้นการนำกากดินขาวมาใช้ให้เกิดประโยชน์จึงเป็นอีกแนวทางที่จะช่วยรักษาสภาพแวดล้อม แต่กากดินขาวที่เกิดจากกระบวนการคัดแยกนั้นอยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่ทำให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นซึ่งเรียกว่า เทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติดิน (Soil Improvement)

การปรับปรุงคุณสมบัติดินโดยใช้สารผสมเพิ่มเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ได้รับความนิยมเนื่องจากไม่มีความซับซ้อนมาก ต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างต่ำกว่าวิธีการอื่น และสามารถใช้ได้ดีกับดินทุกประเภท โดยสารผสมเพิ่มที่นิยมใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ยางมะตอยหรืออาจใช้ร่วมกันโดยมีวัตถุประสงค์หลักก็เพื่อทำให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นอาจมุ่งเน้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือกำลังแบกทาน ลดการอัดตัว และลดความชื้นได้อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทำหน้าที่ร่วมกัน [3] แต่เนื่องจากคุณสมบัติด้านกำลังของดินมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านปฐพีเป็นลำดับแรกๆ ดังนั้นจึงมักเป็นสาเหตุหลักของการพิจารณาปรับปรุงคุณสมบัติดิน แต่อย่างไรก็ตาม

จำเป็นจะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติดังกล่าวอย่างละเอียด เพื่อให้เกิดความเหมาะสมก่อนการนำไปใช้งาน

บทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดและรูปแบบการวิบัติของฐานรากตื้น จากกากดินขาวที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ เพื่อให้เข้าใจในพฤติกรรมและสามารถนำไปใช้งานได้ถูกต้อง

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การใช้ประโยชน์กากของเหลือจากอุตสาหกรรมในงานธรณีเทคนิค

ศุภกิจ นนทนานันท์ [4] พบว่ามีการศึกษาวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติกันอย่างกว้างขวาง โดยการนำกากอุตสาหกรรม (Industrial waste) ไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นทุกปีเช่น การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) หรือตะกรันจากการถลุงเหล็ก (Slag) เป็นสารผสมเชื่อมประสาน (Admixture) การนำเอาคอนกรีตเก่า (Demolition Waste) แทนมวลหยาบในคอนกรีตใหม่หรือนำเอาไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางสำหรับการก่อสร้างถนน เนื่องจากงานด้านธรณีวิศวกรรมเป็นงานที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้วัสดุก่อสร้างปริมาณมาก ดังนั้นจึงต้องศึกษาคุณสมบัติหลักของกากอุตสาหกรรมเหล่านั้นให้เสียก่อนนำไปใช้โดยกากทั้งอุตสาหกรรมนั้นต้องไม่เป็นพิษ (Non - Hazardous, N) มีความสามารถในการใช้งานได้ดี (Improvability, I) คุณสมบัติของวัสดุค่อนข้างสม่ำเสมอ (Compatibility, C) และมีต้นทุนต่ำเมื่อนำมาใช้งาน (Economic, E) หรือเรียกว่า “NICE Criteria”

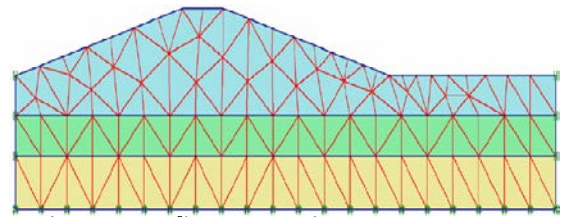
สยาม และคณะ [5] ได้ศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กไหม้ซึ่งเป็นกากของเหลือจากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทางโดยเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางระหว่างหินคลุกและตะกรันเหล็กไหม้ทั้งในกรณีไม่ผสมและผสมซีเมนต์ร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 พบว่าที่ปริมาณร้อยละของซีเมนต์เท่ากัน ตะกรันเหล็กไหม้ผสมซีเมนต์มีคุณสมบัติทางด้านกำลังดีกว่าหินคลุกผสมซีเมนต์ การดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำจึง

ทำให้ลดการวิบัติของชั้นทางภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ได้นอกจากนั้น กรกต [6] ยังได้ศึกษาการนำเถ้าหนักแม่เมาะซึ่งเป็นกากของเหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง โดยการผสมซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และกำลังแบกทาน(CBR) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์โดยร้อยละของซีเมนต์เท่ากับ 2.58 และ 8.00 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังให้ผ่านเกณฑ์ชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของกรมทางหลวงได้ตามลำดับ Erdal [7] ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอย ปูนขาว และปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินกระจายตัว (Expansive Soil) โดยพบว่าสารผสมเพิ่มดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพอันเนื่องมาจากการเพิ่มมวลละเอียดทำให้ Plastic Index, Activity และ Swelling Potential มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสารผสมเพิ่มและอายุการบ่มมากขึ้น

นอกจากนั้น WU et .al [8] ได้ศึกษาถึงการนำเถ้าลอยปรับปรุงคุณสมบัติดินโดยวิธีผสมลิก (Fly Ash Column) ซึ่งก็พบว่าวิธีการนี้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวอ่อนได้ อีกทั้งยังทำให้ดินมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้ดีขึ้น เกิดเป็นทางระบายน้ำในแนวตั้งทำให้ระยะเวลาในการอัดตัวระบายน้ำลดลง (Consolidation) ต่อมา อนิรุทธ์ และ อรุณเดช [9] ได้ศึกษาสมบัติการรับแรงของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสำหรับงานปรับปรุงคุณสมบัติโดยวิธีผสมลิกในชั้นดินเชิงใหม่โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และกำลังรับแรงอัดสามแกน (UU Test) ใช้สารเชื่อมประสานระหว่างซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 200 kg/m<sup>3</sup> และ 400 kg/m<sup>3</sup> ให้สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย (C:F) เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 10:90 ถึง 50:50 พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่มโดยมีอัตราการพัฒนาที่รวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นอัตราการพัฒนากำลังจะลดลงแต่ในกรณีที่ใช้สารเชื่อมประสาน 400 kg/m<sup>3</sup> นั้นยังคงมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเป็นผลเนื่องจากปริมาณสารเชื่อมประสานที่ใช้มากกว่า 1 เท่า ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมียังคงเกิดขึ้นอยู่เป็นจำนวนมาก

## 2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM)

วิธีการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถแก้ปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งอาศัยหลักการแบ่งโครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง (Continuum) ออกเป็นหน่วยย่อย (Element) โดยแต่ละหน่วยจะมีจุดยึดต่อเข้ากับหน่วยข้างเคียงเรียกว่าโหนด (Node) ดังแสดงในรูปที่ 1 สมการของชิ้นส่วนย่อยนั้นจะพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Relationship) ในรูปของเมตริกซึ่งจะขึ้นอยู่กับที่ตั้งสมมติฐานให้กับวัสดุ โดยสมการที่ (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบเชิงเส้นตามกฎของฮุก (Hooke's Law) [10]



รูปที่ 1 การแบ่งชิ้นส่วนย่อยเพื่อวิเคราะห์ปัญหาคัดดินถล่มโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM Mesh)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}' \\ \sigma_{yy}' \\ \sigma_{zz}' \\ \sigma_{xy}' \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^e \\ \epsilon_{yy}^e \\ \epsilon_{zz}^e \\ \gamma_{xy}^e \end{bmatrix} \quad (1)$$

Francisco et.al [11] ได้ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินตาม Eurocode7(EN7) ในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S) เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอโดย Fellenius และ Bishop(Rigid – Plastic Method) กับวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ พบว่าวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันแต่การวิเคราะห์แบบ FEM ให้ผลดีกว่าในแง่ของการแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของลาดดินและการกระจายหน่วยแรงในลาดดินได้อย่างชัดเจน นพดล และพงศกร [12] ได้ศึกษาค่าการ

ทรุดตัวของคันทางที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน  
กรุงเทพซึ่งปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์  
ระหว่างวิธี FEM และวิธีดั้งเดิมของ Brom ในปี1984  
ซึ่งผลการศึกษาพบว่าวิธีดั้งเดิมนั้นให้ค่าอัตราการทรุด  
ตัวเร็วกว่าความเป็นจริงโดยเฉพาะในช่วงเวลาต้นๆ  
หลังการถมคันทาง โดยค่าการทรุดตัวจริงของคันทาง  
ให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

### 3. วิธีการดำเนินงาน

กากดินขาวที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้เกิดจาก  
กระบวนการคัดแยกเนื้อดินขาวของโรงแต่งแร่ใน  
จังหวัดอุดรธานีโดยมีคุณสมบัติต่างๆดังนี้  $GS = 2.29$ ,  
 $LL = 26.3 \%$ ,  $PL = 19.4 \%$ ,  $PI = 6.9 \%$ ,  $SL =$   
 $11.0 \%$ ,  $OMC = 14.2\%$ ,  $\gamma_d = 1.97 \text{ kN/m}^3$  และ  $UCS$   
 $= 549 \text{ kN/m}^2$  การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดิน  
พบว่ากากดินขาวประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นทราย  
 $76.14 \%$  ดินตะกอน  $21.14 \%$  และดินเหนียว  $2.72\%$   
และสามารถจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS และ  
ASSHTO อยู่ในกลุ่ม ML และ A - 4 ตามลำดับ



รูปที่ 2 กากดินขาวจากกระบวนการคัดแยกและการ  
กองเก็บภายในสถานประกอบการ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า  
แม่เมาะจังหวัดลำปาง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีของ  
เถ้าลอยดังต่อไปนี้  $SiO_2 = 40.33\%$ ,  $Al_2O_3 =$   
 $23.21\%$ ,  $Fe_2O_3 = 11.82\%$ ,  $CaO = 15.19\%$ ,  $MgO =$   
 $2.67\%$ ,  $Na_2O = 1.16\%$ ,  $K_2O = 3.06\%$ ,  $P_2O_5 =$   
 $0.14\%$ ,  $TiO_2 = 0.47\%$ ,  $MnO_2 = 0.10\%$ ,  $SO_3 =$   
 $1.87\%$

### 3.1 การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน

การทดสอบหาค่าต้านทานแรงเฉือนใช้วิธีการ  
การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined  
Compressive Strength, UCS) โดยใช้ก้อนตัวอย่างที่  
ได้จากการบดอัดในแบบหล่อมาตรฐานขนาด  $\varnothing 4'' \times$   
 $4.6''$  (โดยอนุโลมตามมาตรฐาน ทล - 105/2517) และ  
ใช้ฟิล์มถนอมอาหารหุ้มเพื่อบ่มแล้วรอครบอายุการบ่ม  
โดยจะทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน



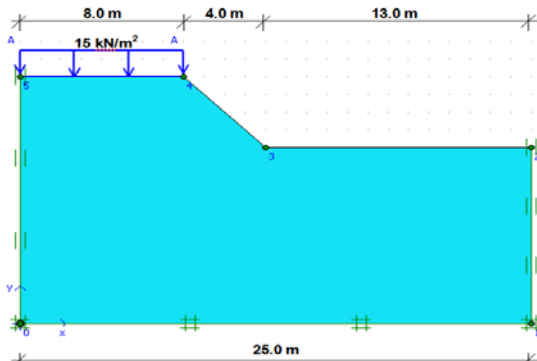
รูปที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ก้อนตัวอย่างจะถูกแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ  
จนวิบัติ โดยกากดินขาวจะผสมด้วยสารเชื่อมประสาน  
ระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอย (C:F) ในสัดส่วนร้อยละ  
1(C0:F1,C0.5:F0.5,C1:F0), ร้อยละ2(C0:F2, C1:F1  
,C2:F0) และ ร้อยละ 4 (C0:F4,C2:F2,C4:F0) โดย  
น้ำหนักของดินแห้งซึ่งตัวเลขหลังอักษร C และ F  
หมายถึงค่าร้อยละในส่วนผสมนั้น (C0:F1 = Cement  
0 % : Fly Ash 1%) ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคือปริมาณน้ำ  
เหมาะสม (OMC) จากการทดสอบการบดอัดแบบสูง  
กว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

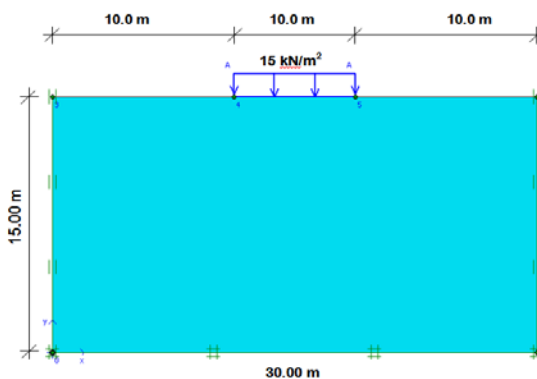
### 3.2 แบบจำลองและเงื่อนไขในการวิเคราะห์ เสถียรภาพ

ลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์  
เสถียรภาพจะถูกแยก 2 ส่วนได้แก่ ลาดดินถมและดิน  
ฐานรากซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกระจายสม่ำเสมอ  
เท่ากับ  $15 \text{ kN/m}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ  
โดยจะแปรเปลี่ยนค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและ  
โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วัน จากการทดสอบ  
กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของกากดินขาวปรับปรุง

คุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยตั้งแสดงในตารางที่ 1 วิเคราะห์ปัญหาโดยใช้โปรแกรม PLAXIS ภายใต้ปัญหาแบบ Plan Strain กำหนดให้วัสดุที่ใช้เป็นอิฐเม็ดแบบ 15 Node ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นแบบอีลาสติกพลาสติก-มอร์คูลอมป์ (Elastic – Plastic Mohr Coulomb)



รูปที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินภายใต้น้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินใต้ฐานรากภายใต้น้ำหนักบรรทุก

เสถียรภาพจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 กรณีจะอยู่ในรูปค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กำหนด และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S) ด้วยวิธีการลดกำลัง (C –  $\phi$  Reduction) ซึ่งเป็นการปรับลดค่าตัวแปรด้านกำลังได้แก่แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายใน (C and  $\phi$ ) ของดินภายใต้สภาพเงื่อนไขที่ทำการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการวิบัติซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2) เมื่อ  $\tau$  และ  $\tau'$  คือค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน

เริ่มต้นของวัสดุและภายหลังการลดลงจนวิบัติตามลำดับ และหากพิจารณาวัสดุให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของ Mohr – Coulomb การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีลดกำลังสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4) [13]

$$\omega = \frac{\tau}{\tau'} \quad (2)$$

$$\tau' = \frac{\tau}{\omega} = \frac{c + \sigma \tan \phi}{\omega} \quad (3)$$

$$= \frac{c}{\omega} + \sigma \frac{\tan \phi}{\omega} = c' + \sigma \tan \phi'$$

$$c' = \frac{c}{\omega} \quad \text{and} \quad \tan \phi' = \frac{\tan \phi}{\omega} \quad (4)$$

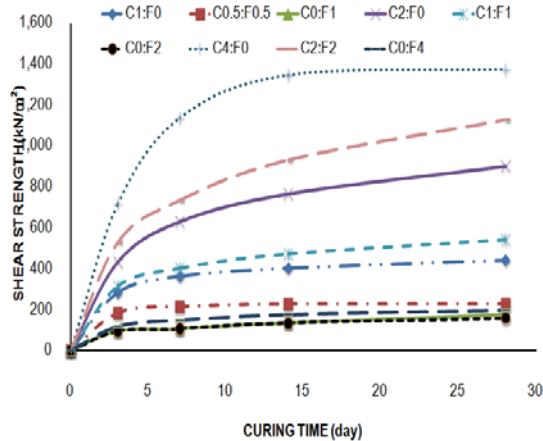
#### 4. ผลการศึกษา

##### 4.1 กำลังต้านทานแรงเฉือน

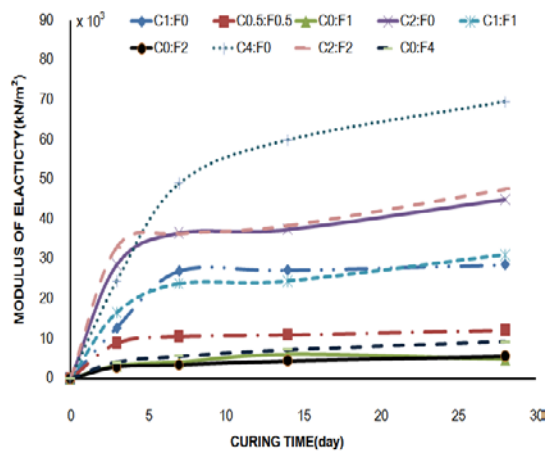
จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) กับอายุการบ่มของกากดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติได้ดังรูปที่ 6 พบว่าอัตราการพัฒนา กำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก (0 – 3 วัน) ของอายุการบ่มในทุกส่วนผสม โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่มีเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว (C0:F1, C0:F2, C0:F4) นั้นจะให้ค่ากำลังค่อนข้างต่ำแม้จะเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็น 2 เท่า และมีแนวโน้มที่จะไม่สามารถพัฒนา กำลังได้สูงขึ้นแม้จะเพิ่มระยะเวลาการบ่ม เนื่องจากการใช้เถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียวทำให้ขาด  $\text{Ca(OH)}_2$  จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Recation) ที่มักเกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ จึงทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในรูปของปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 150 – 200  $\text{kN/m}^2$

ส่วนการใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว (C1:F0, C2:F0, C4:F0) แสดงการพัฒนา กำลังที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอายุการบ่มและแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ Lambe et.al (1959) พบว่าเกิดจาก

ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น [14] โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 440 – 1,350 kN/m<sup>2</sup> ตามลำดับ



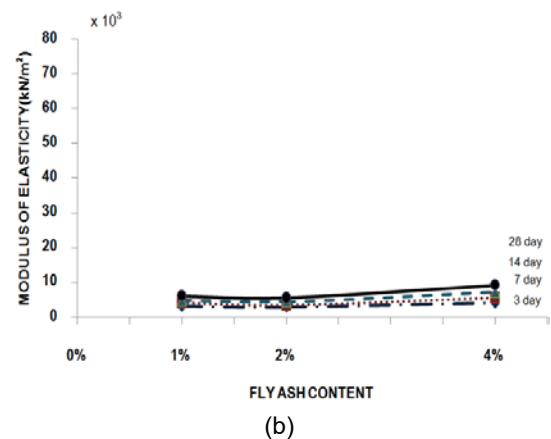
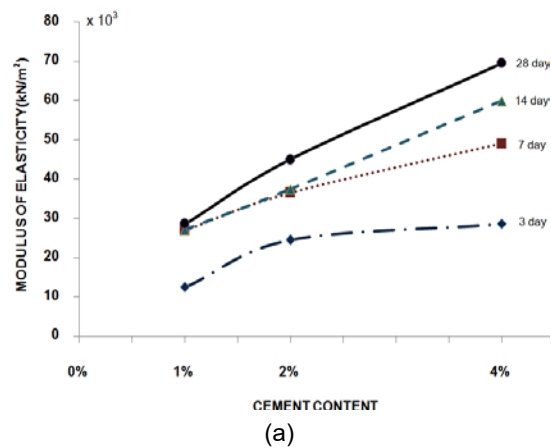
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนกับอายุการบ่มของภาคดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น(E) กับอายุการบ่มของภาคดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณสารเชื่อมประสานต่างๆ

ในกรณีที่ใช้ซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสาน (C0.5:F0.5, C1:F1, C2:F2) พบว่าลักษณะการพัฒนากำลังมีความคล้ายคลึงกับการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ยุทธนา และสุขสันต์ [15] พบว่าเถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัวทำให้อนุภาคของเม็ดดินแตกตัวมีขนาดเล็กกลงทำให้ซีเมนต์สามารถทำ

ปฏิกิริยากับน้ำได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนั้น อภิชาติ และคณะ [16] พบว่าการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ ยังเป็นการเพิ่มปริมาณแร่ Silica ในมวลดินซึ่งจะเป็นส่วนสนับสนุนการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) เกิดเป็นสารเชื่อมประสานในดินซีเมนต์ โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 220 – 1,100 kN/m<sup>2</sup> ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress – Strain Relationship) ของภาคดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติในรูปโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7 โดยพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีการพัฒนาค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม เช่นเดียวกับกำลังต้านทานแรงเฉือน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น(E)กับปริมาณของสารเชื่อมประสานที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติภาคดินขาวที่อายุการบ่มต่างๆ

รูปที่ 8 (a) และ (b) แสดงการลักษณะการพัฒนาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเปรียบเทียบระหว่าง(1)กรณีที่ใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียวและ (2)ถ้าล้อยเพียงอย่างเดียว พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสในกรณีที่ 1 นั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม ในขณะที่กรณีที่ 2 นั้นจะให้ค่าโมดูลัสค่อนข้างต่ำโดยการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานจากร้อยละ 1 ถึง 4 นั้นไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังต้านทานแรงเฉือนดังแสดงในรูปที่ 6 โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของกากดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และถ้าล้อยจะมีค่าในช่วง 2.9 - 28.6 kN/m<sup>2</sup>, 3.2 - 45.0 kN/m<sup>2</sup> และ 4.0 - 69.5 kN/m<sup>2</sup> ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานเท่ากับ 1%, 2% และ 4% ตามลำดับ

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การศึกษาในส่วนนี้จะใช้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 คุณสมบัติของกากดินขาวปรับปรุงที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น(E) และค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน(C<sub>u</sub>) จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว(UCS) ของกากดินขาวที่ใช้สารเชื่อมประสานร่วมกันระหว่างปูนซีเมนต์และถ้าล้อยให้ครอบคลุมร้อยละของปริมาณสารเชื่อมประสานที่ 1, 2 และ 4 ซึ่งได้แก่ C0.5:F0.5 C1:F1 และ C2:F2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง

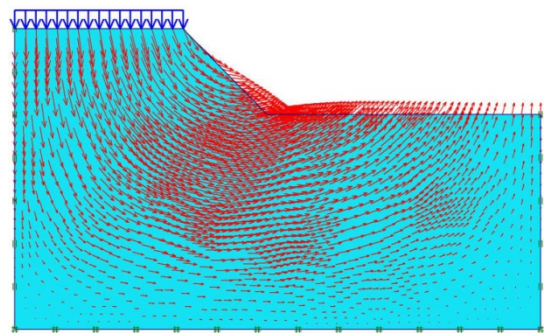
Parameter	Unit	Waste kaolin stabilized with C:F		
Model	-	Mohr-Coulomb		
Type	-	undrained		
$\gamma_{dry}^{***}$	kN/m <sup>3</sup>	19.7		
$\gamma_{wet}$	kN/m <sup>3</sup>	22		
$K_x=K_y^{**}$	m/day	0.001		
Binder Ratio		C0.5:F0.5	C1:F1	C2:F2
$E^{***}$	kN/m <sup>2</sup>	12.3 x 10 <sup>3</sup>	31.1 x 10 <sup>3</sup>	47.6 x 10 <sup>3</sup>
$\nu^*$	-	0.35		
$C_u^{***}$	kN/m <sup>2</sup>	226	540	1,128

หมายเหตุ ที่มา \* Plaxis V7 Tutorial Manual[10]

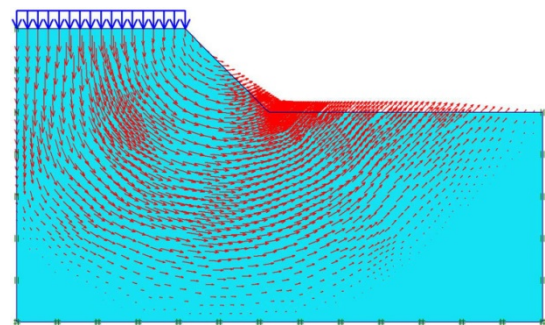
\*\* Braja M.Das(2002)[17]

\*\*\* ผลการทดสอบ UCS

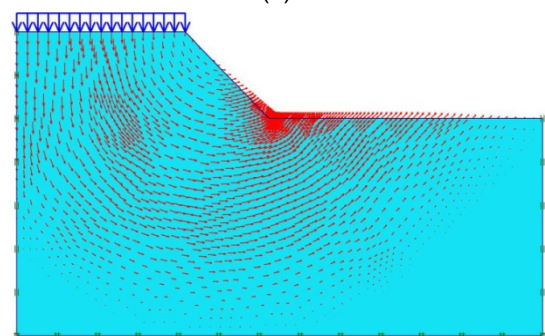
รูปที่ 9 (a) ถึง (c) แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดกากดินขาวบดอัดโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของลาดดินมีความคล้ายคลึงกันในทุกระดับความลึก โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดและปริมาณของลูกศร(สีแดง)ที่แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนตัว ซึ่งทั้ง 3 กรณีจะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ด้านท้ายของลาดดินจนเข้าสู่การวิบัติ



(a)



(b)

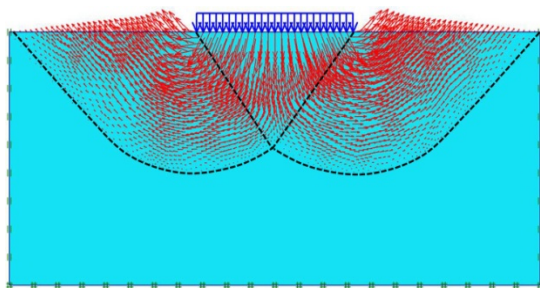


(c)

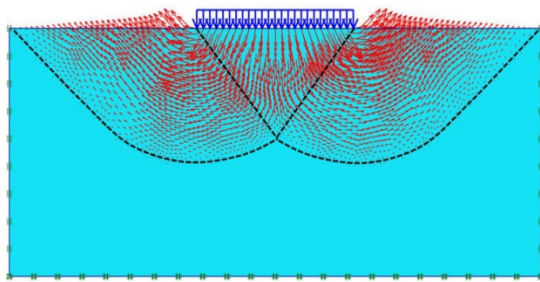
รูปที่ 9 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดกากดินขาวบดอัดปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และถ้าล้อย (a) C0.5 : F0.5 (b) C1 : F1 และ(c) C2 : F2

นอกจากนั้นการใช้ปริมาณสารเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน(C0.5:F0.5, C1:F1 และ C2:F2) ยังแสดงให้เห็นว่า

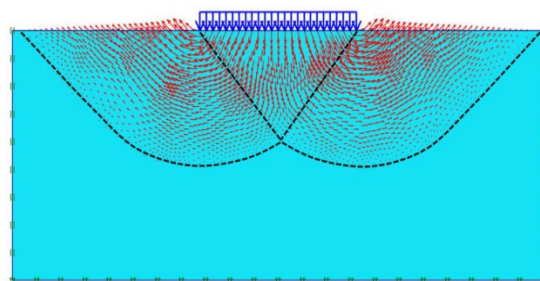
ปริมาณการเคลื่อนตัวของลาดดินจะแปรผกผันกับปริมาณสารเชื่อมประสาน โดยค่าการเคลื่อนตัวและค่า F.S ของลาดดินภายใต้น้ำหนักบรรทุกแสดงไว้ดังตารางที่ 2 และจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดกาดดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวที่ 4% ส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเพียงร้อยละ 26 ส่วนการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ที่ 4% สามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้ถึง 4 เท่า ในขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวที่ 4% ทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสารเชื่อมประสาน 1% ในทุกอัตราส่วน



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 10 การวิเคราะห์เสถียรภาพของดินฐานรากกาดดินขาวบดอัดปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย (a) C0.5 : F0.5 (b) C1 : F1 และ(c) C2 : F2

รูปที่ 10 (a) ถึง (c) แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินใต้ฐานรากจากกาดดินขาวบดอัดโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์พบว่า การวิบัติของทั้ง 3 กรณีเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันโดยแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของดินใต้ฐานรากจนเกิดการดันดินทางด้านข้างของฐานรากจนขยายตัวออกไปเกิดเป็นแนวเลื่อนไถลซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติภายใต้แรงเฉือนทั่วไป (General Shear Failure) แต่จะมีปริมาณการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันดังสังเกตได้จากขนาดและปริมาณของลูกศร(สีแดง)ที่อยู่เหนือระนาบวิบัติ โดยจะพบการวิบัติรูปแบบนี้ในดินที่มีความแน่นหรือแข็ง การเคลื่อนตัวของดินใต้ฐานรากที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ C0.5:F0.5, C1:F1 และ C2:F2 จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเชื่อมประสานดังแสดงในตารางที่ 3 และจากการวิเคราะห์รูปแบบการวิบัติของกาดดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติทุกอัตราส่วนผสมพบว่า การวิบัติจะเป็นแบบภายใต้แรงเฉือนทั่วไปทั้งสิ้น โดยปริมาณการเคลื่อนตัวจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดกาดดินขาวบดอัด

ตารางที่ 2 ปริมาณการเคลื่อนตัวและ F.S ของลาดดิน

Binder Ratio	C0.5:F0.5	C1:F1	C2:F2
Total Displacement	$28.6 \times 10^{-3}$ (m)	$11.3 \times 10^{-3}$ (m)	$7.4 \times 10^{-3}$ (m)
F.S	12	29	61

ตารางที่ 3 ปริมาณการเคลื่อนตัวและ F.S ของกาดดินขาวใต้ฐานราก

Binder Ratio	C0.5:F0.5	C1:F1	C2:F2
Total Displacement	$5.2 \times 10^{-3}$ (m)	$2.1 \times 10^{-3}$ (m)	$1.4 \times 10^{-3}$ (m)
F.S	77	185	386

## 5. สรุปผล



จากการศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนและเสถียรภาพของภาคดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการพัฒนากำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก(0 - 3วัน)ของการบ่มในทุกอัตราส่วนโดยการใช้เถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียวจะให้ค่ากำลังค่อนข้างต่ำแม้จะเพิ่มปริมาณเป็น 2 เท่า ส่วนการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวและปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยพบว่าการพัฒนากำลังจะเพิ่มขึ้นได้อีกตามสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม

2. การเคลื่อนตัวของลาดภาคดินขาวดัดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในทุกระดับความลึก โดยจะเกิดขึ้นสูงสุดที่ด้านท้ายของลาดดินจนเข้าสู่การวิบัติและปริมาณการเคลื่อนตัวของลาดดินจะแปรผกผันกับปริมาณสารเชื่อมประสาน นอกจากนั้นการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานจะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) เพิ่มขึ้นได้มากกว่ากรณีอื่นๆ

3. การวิบัติของดินใต้ฐานรากจากภาคดินขาวปรับปรุงคุณสมบัติเป็นรูปแบบการวิบัติภายใต้แรงเฉือนทั่วไป (General Shear Failure) โดยการเคลื่อนตัวของดินใต้ฐานรากภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเชื่อมประสานและการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีการศึกษา 2554 โดยคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Mining & Materials Engineering Prince of Songkla University. (2011, Dec. 25). *Engineering Ceramics*. [Online] Available: <http://www.mne.eng.psu.ac.th>

- [2] ลัดดา ลากจตุภูช. (2554, ธันวาคม. 12). *kaolin*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.cpairat.tripod.com>
- [3] Manfred R.Hausmann., "Engineering Principles of Ground Modification," *Mc-Graw-Hill, Inc*, Singapore, 1<sup>st</sup>, pp.4-10 and 320, 1990.
- [4] ศุภกิจ นนทนานันท์. (2554, ธันวาคม. 6). *ธรณีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมสำหรับการใช้ประโยชน์ของภาคทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.Thaiengineering.com>
- [5] สยาม ยิ้มศิริ, คลังวิชัย อุทัยเรือง และ นันทวรรณ พาชื้อ. "การใช้ตะกรันเหล็กไม่เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง". *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14*. 13-15/พฤศจิกายน/2552. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : pp 267-272, (2552).
- [6] กรกต โนภริระ. "การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเถ้าหนักแม่เมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง". *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16*. 18-20/พฤษภาคม/2554. มหาวิทยาลัยมหิดล : pp 1-11, (2554).
- [7] Erdal Cokca, "Use Of Class C Fly Ashes for the Stabilization - of an Expansive Soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, Vol. 127, pp. 568-573. 2001.
- [8] DQ WU, B.B.Broms and V.Choa. "Soil Improvement with Fly Ash Column". *Southeast Asian Geotechnical Conference 11<sup>th</sup>*. 4-8/May/1993. Singapore : pp435-438, (1993).
- [9] อนิรุทธ์ ธงไชย และ อรุณเดช บุญสูง. "สมบัติการรับแรงของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสำหรับงานปรับปรุงสมบัติโดยวิธีผสมลึกในชั้นดินเชิงใหม่". *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*. ปีที่ 2 (ฉบับที่ 4) : pp. 19-27, 2553.

- [10] R.B.J Brinkgreve et.al., "PLAXIS FiniteElement Code for Soil and Rock Analyses Version 7.0," *A.A Balkema* Rotterdam, Netherland, 1<sup>st</sup>., pp.2-1- 2-10, 1998.
- [11] Francisco F.Martin, Bruno D.S.S Valente, Castorina F.S.Vieira and Julio B.Martins. (2011, Dec. 8). *Slope Stability of Embankments*. [Online] Available: <http://www.lib.hpu.edu.cn>
- [12] นพดล เพียรเวช และ พงศกร พรณรัตน์ศิลป์. "คาดการณ์การทรุดตัวของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์คอลลัมน์". *เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมทางครั้งที่ 1. 16-17/กรกฎาคม /2544*. กรุงเทพฯ : pp 103-127, (2544).
- [13] Yingren Zheng, Xiaosong Tang, Shangyi Zhao, Chujian Deng and Wenjie Lei, "Strength reduction and Step-loading finite element approaches in geotechnical engineering," *journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*, vol. 1, pp. 21–30, 2009.
- [14] Lambe, T.W., Mitchaels, A.S and Moh, Z.C., "Improvement of Soil-Cement with Alkali Compounds," *Highway Research Board Bulletin* No 241, New York, 1<sup>st</sup>., PP 67-103, 1995
- [15] ยุทธนา รักษาชนม์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. "แก้ล้อย-วัสดุกระจายตัวในดินซีเมนต์". *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. 13-15/พฤษภาคม/2552*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : pp 251-256, (2552).
- [16] อภิชาติ คำภาหล้า, วรชัย เกษกัน และ สุขสันต์ หอพิบูล. "กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้าแกลบ". *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4/พฤษภาคม/2550*. มหาวิทยาลัยนเรศวร : pp 267-272, (2550).
- [17] Braja M.Das., "Principle of Geotechnical Engineering," *Brook/Cole Thomson Learning*, California, 5<sup>th</sup> Ed., pp.143, 2002.