

สมบัติการรับแรงของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสำหรับงานปรับปรุงสมบัติโดยวิธีผสมลึกในชั้นดินเชียงใหม่

Strength Properties of Soil – Cement – Fly Ash for

Deep Mixing Stabilization in Chiang Mai Subsoil

อนิรุทธิ์ ธงไชย¹ และ อรุณเดช บุญสูง²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าลอยมาทดแทนปูนซีเมนต์ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โดยวิธีผสมลึก ในการศึกษาได้ทำการเจาะหลุมเก็บตัวอย่างดินจำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อใช้เป็นตัวแทนประกอบด้วยชั้นดินบน (Topsoil), ดินเหนียวปนทราย (SC) และชั้นดินเหนียวแข็ง (CL) แยกทำการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงสองส่วนคือ การทดสอบให้แรงอัดทางเดียวของตัวอย่างดินปรับปรุงคุณสมบัติที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อหาค่าอัตราส่วนการผสมสารปรับปรุงคุณสมบัติที่เหมาะสม และการทดสอบให้แรงอัดสามแกนเพื่อหาค่าคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียด โดยการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมใช้ตัวอย่างดินชนิดเดียวคือ ดินเหนียวแข็ง (CL) ผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 kg/m³ และ 400 kg/m³ และให้สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย (C:F) เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 10:90 ถึง 50:50 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า หากต้องการผสมให้ได้ดินปรับปรุงคุณสมบัติที่มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 60 t/m² ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนดทั่วไปสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยวิธีผสมลึกสามารถใช้อัตราส่วนการผสมได้แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือ อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 50:50, 40:60 และ 31:69 ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานรวมเท่ากับ 280, 385 และ 400 kg/m³ ตามลำดับ

ส่วนการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยใช้ตัวอย่างดินทั้งสามชนิด ผสมด้วยปูนซีเมนต์และ เถ้าลอยในอัตรา 17:83 และ 10:90 ที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 และ 300 kg/m³ ตามลำดับ แล้วนำตัวอย่างที่บ่มจนครบอายุ 28 วัน ไปทำการทดสอบให้แรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้แรงดันรอบด้าน 15, 20 และ 25 t/m² ซึ่งจากผลการทดสอบบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าแรงดันรอบด้านมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย แต่มีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัส ความยืดหยุ่น E₅₀ อย่างชัดเจน โดยจะสามารถสรุปอิทธิพลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับกำลังรับแรงเฉือนของดิน ตามสมการ $E_{50}=K.Su$ โดยค่าสัมประสิทธิ์ K แปรผันตามแรงดันรอบด้านตามสมการ $K = 0.30\sigma_3 + 91.55$ (σ_3 มีหน่วยเป็น t/m²)

คำสำคัญ : การปรับปรุงคุณสมบัติดิน เสาเข็มดินซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังรับแรงอัดสามแกน

*¹ รองศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

ABSTRACT

Series of laboratory test were conducted to investigate strength properties of cement – fly ash stabilized soil. The objective of the study is to investigate the possibility of partial replacement of cement with fly ash in the process of making soil cement column by deep mixing techniques. Subsoil boring was conducted to collect 3 soil sample

representing Chiang Mai subsoil profile : top soil, clayey sand (SC) and stiff clay. Two test series were conducted to study strength properties of stabilized soils. In the first test series, unconfined compression test on soil stabilized with various ratios of stabilizing agent were conducted to establish suitable ratio. In the second test series, triaxial compression were conducted to study stress – strain properties of the stabilized soil. In the unconfined compression test series, the stiff clay soil sample was mixed with cement and fly ash at binding volume of 200 kg/m³ and 400 kg/m³ and with 5 different ratio of cement to fly ash (C:F) ranging between 10:90 to 50:50. The results show that mixtures which could produced stabilized soil having unconfined compressive strength of 60 t/m² suitable for soil cement column in deep mixing could have ratio of cement : fly ash 50:50 or 40:60 or 31:69 with binder volume of 280 kg/m³, 385 kg/m³ and 400 kg/m³ respectively

In the triaxial compression test series, all the 3 soil sample were mixed with cement and fly ash at binding volume of 200 kg/m³ and 300 kg/m³ and with ratio of cement fly ahs to 17:83 and 10:90 respectively. At to 28 days of curing, the samples were subjected to unconsolidated undrained triaxial test at 15, 20 and 25 t/m² confining pressure. Results of the test indicate that, eventhough confining pressure has very little effect on the compressive strength, effects on modulus of elasticity (E₅₀) are clear. In the relationship between modulus of elasticity and shear strength $E_{50} = K.S_u$ the coefficient K can be related to the confining pressure by the equation $K = 0.30\sigma_3 + 91.55$ ($\sigma_3 = t/m^2$)

Key word: Soil Stabilization, Cement Column, Unconfined Compressive Strength, Triaxial Compressive Strength

บทนำ

การผสมแบบลึก (Deep Mixing) เป็นวิธีการผสมสารเชื่อมประสานลงไปในดินด้วยการใช้หัวเจาะที่มี ไบรอนเจาะลึกลงไปดิน พร้อมกับใช้แรงดันอัดสารเชื่อมประสานเข้าไปในดิน จากนั้นจึงถอนไบรอนขึ้นมา พร้อมทั้งกวาสารเชื่อมประสานให้เข้ากันกับดินเพื่อให้ก่อตัวขึ้นมาเป็นรูปเสา ซึ่งสารเชื่อมประสานที่นิยมใช้ทั่วไปคือปูนซีเมนต์จึงเป็นที่มาของชื่อ “เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column)” เสาเข็มดินซีเมนต์นี้อาจถูกใช้เพื่อเพิ่มกำลังแบกทาน ลดการทรุดตัว เพิ่มเสถียรภาพของดินฐานรากหรือใช้แทนกำแพงเข็มพิคในงานขุด นอกจากปูนซีเมนต์แล้วยังอาจใช้ขี้เถ้า (Holm et al, 1983) เถ้าลอยและตะกรันจากการหลอมโลหะ (Nieminen, 1974) อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Bryhn et al, 1983) วิธีการผสมแบบลึกนี้พัฒนาขึ้นโดยสถาบันวิจัยในประเทศญี่ปุ่นในปี 1967 เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนที่

ตกตะกอนจากน้ำทะเลโดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวจึงมีชื่อเรียกว่า Deep Lime Mixing (DLM) หรือ Cement Deep Mixing Method (CDM)

โรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง ซึ่งผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนับได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย มีปริมาณเถ้าลอยที่เป็นกากของเหลือมากถึง 2.2 ล้านตันต่อปี (ดร.รชฏ และ ภัสราภรณ์, 2545) ศึกษาการนำเถ้าลอยแม่เมาะไปใช้ประโยชน์เป็นสารเชื่อมประสานมีมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 (ประจิด จิรัชปภา, 2524) จนในปี พ.ศ. 2537 จึงได้มีการนำเถ้าลอยแม่เมาะไปใช้อย่างจริงจังในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ คือใช้เป็นสารเชื่อมประสานร่วมกับปูนซีเมนต์สำหรับทำคอนกรีตอัดในการก่อสร้างเขื่อนปากมูล (สมชัย, 2537) สำหรับการใช้เถ้าลอยเป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติดินนั้น อนิรุทธิ์ และ สุเทพ (2530) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยเป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติดิน โดยพบว่าสามารถทำให้ค่า การรับกำลังแบบไม่แช่น้ำ (Soaked, CBR) ของดินลูกรังชนิดหนึ่งเพิ่มขึ้นได้ถึงมากกว่า 100 % การวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำ เถ้าลอยมาทดแทนปูนซีเมนต์สำหรับก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติการรับแรงของดินที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และยังเป็นการช่วยเพิ่มแนวทางการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอย ซึ่งเป็นกากของเหลือจากอุตสาหกรรม

1. การปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรม

การปรับปรุงคุณสมบัติดินมีวัตถุประสงค์หลักก็เพื่อให้ดินในบริเวณที่ต้องการก่อสร้างมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติดินสามารถแบ่งเป็น 3 วิธีหลักซึ่งได้แก่

- การปรับปรุงคุณสมบัติโดยวิธีทางกล (Mechanical Stabilization) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้แรงภายนอกกระทำกับมวลดินทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ
- การปรับปรุงคุณสมบัติโดยวิธีระบายน้ำออก (Hydraulic Modification) เป็นการลดความชื้นในดิน
- การปรับปรุงคุณสมบัติโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) เป็นการใส่สารเคมีผสมเข้าไปในมวลดินเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีสร้างสารเชื่อมประสานทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

2. สารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติดิน

การปรับปรุงคุณสมบัติดินโดยวิธีผสมสารเคมีสามารถทำได้หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งมีชนิดหลัก ๆ ที่ใช้กันแพร่หลายดังต่อไปนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มโดยทั่วไปเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ดินที่ผสมปูนซีเมนต์เรียกว่า ดินซีเมนต์ (Soil Cement) (Mitchell 1976) โดยดินซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงที่ดีขึ้น ลดการบวมตัว และเพิ่มความทนทาน ซึ่งเป็นผลมาจากสารเชื่อมประสานจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ที่เป็นปฏิกิริยาหลักในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicates Hydrated) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrated) ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและยึดเหนี่ยวอนุภาคของเม็ดดินเข้าด้วยกันดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งนอกจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เป็นปฏิกิริยาหลักแล้วยังมีปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) กับอากาศทำให้ได้ CaCO_3 ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานอย่างอ่อน

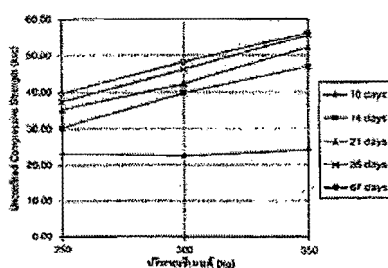
- เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยเป็นกากของเหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเถ้าลอยได้แก่ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Cation Exchange) ซึ่งเหมือนกับที่เกิดในปูนขาว ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) แต่เถ้าลอยจะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียม (Ca(OH)_2) ที่อยู่ในเถ้าลอยเป็นตัวทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานยึดเหนี่ยวอนุภาคของเม็ดดิน และปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration) เมื่อใช้สารเคมีเพื่อเพิ่มเสถียรภาพดินลงไปดินจะทำให้อนุภาคของดินเหนียวเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่ม เนื่องจากแคลไฮดรอกไซด์เพิ่มเสถียรภาพทำให้ชั้นน้ำดับเบิลเลเยอร์ (Double Layer) บางลง อนุภาคเม็ดดินจึงเคลื่อนตัวเข้าหากันโดยพยายามหันด้านที่เป็นประจุบวกเข้าหาด้านที่เป็นประจุลบ

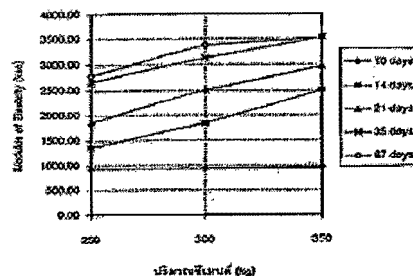
3. การออกแบบส่วนผสม

ก่อนการก่อสร้างจริงในสนามต้องทำการทดลองผสมดินกับปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาอัตราของสารเชื่อมประสานที่จะใช้ในการปรับปรุงดินเพื่อให้ได้กำลังตามที่ต้องการ โดยนำตัวอย่างดินในที่ไปผสมกับสารเชื่อมประสานที่สัดส่วนต่าง ๆ กันแล้วนำไปหล่อเป็นแท่งตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain Shear Strength) ด้วยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength Test) หรือการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidate Undrain Triaxial Compression Test) ที่อายุการบ่มต่าง ๆ โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์นั้นจะใช้เพียงร้อยละ 25 ของค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อายุการบ่ม 28 วัน (Miura et.al, 1986) เนื่องจากในการก่อสร้างจริงอาจไม่สามารถผสมปูนซีเมนต์กับดินให้เข้ากันได้สม่ำเสมอเหมือนการผสมในห้องปฏิบัติการ

เกษม (2541) ได้ศึกษาผลของการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินเหนียวอ่อนในห้องปฏิบัติการโดยใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณ 250 300 และ 350 kg/m^3 ของดินที่ถูกปรับปรุงใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

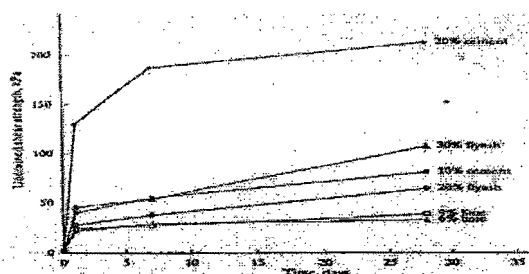


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับปริมาณ

กับปริมาณปูนซีเมนต์ (เกษม, 2541) ปูนซีเมนต์ (Modulus of Elasticity) (เกษม, 2541) วัฒนา (2546)

ได้ทำศึกษาค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำและโมดูลัสความยืดหยุ่น (E_{50}) ของดินเหนียวแข็ง (CL) และทรายปนดินเหนียว (SC) ในชั้นดินเชิงใหม่ที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์พบว่า กำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นหรือเมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักลดลง เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์ในอัตรา 100 ถึง 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ของดินที่ถูกปรับปรุงและใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 ถึง 1.7 โดยน้ำหนักพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 40 ถึง 125 และ 14,000 ถึง 41,000 ตันต่อตารางเมตร ตามลำดับและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออายุการบ่มเป็น 90 และ 180 วัน โดยอัตราส่วน $E_{50}/c_{u, col}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 200 ถึง 500 สำหรับทรายปนดินเหนียวเมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์และน้ำในสัดส่วนเดียวกันพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน มีค่าระหว่าง 60 ถึง 180 และ 26,000 ถึง 60,000 ตันต่อตารางเมตรตามลำดับ และค่าจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออายุการบ่มเป็น 90 และ 180 วัน สำหรับอัตราส่วน $E_{50}/c_{u, col}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 200 ถึง 600

DQ WU et.al (1993) ได้ศึกษาถึงวิธีการใช้เถ้าลอยปรับปรุงคุณสมบัติดินโดยการผสมลิก (Fly Ash Column) ซึ่งก็พบว่าวิธีนี้สามารถเพิ่มกำลังแบกทานของดินเหนียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังทำให้ดินมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้ดีขึ้นทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีคุณสมบัติเป็นทางระบายน้ำในแนวตั้ง ส่งผลให้ระยะเวลาการอัดตัวระบายน้ำลดลง โดยที่อัตราส่วนผสมด้วยเถ้าลอย 30% จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมากกว่ากรณีการผสมด้วยปูนซีเมนต์ 10%



รูปที่ 3 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย ปูนขาวปูนซีเมนต์ เถ้าลอย (DQ WU, 1993)

วัตถุประสงค์และวิธีการ

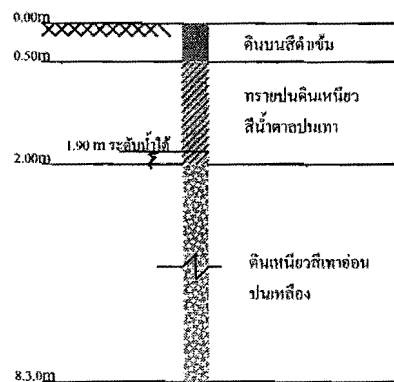
วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงซึ่งได้แก่ อายุการบ่ม ปริมาณของสารเชื่อมประสานต่อมวลดินที่ผสม เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์โครงสร้างกันดินที่ก่อสร้างจากเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมซีเถ้าลอยต่อไป

1. การเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แยกได้ออกเป็น 2 ส่วน คือการเจาะสำรวจเพื่อจำแนกลักษณะ ชั้นดิน และการเก็บตัวอย่างดินสำหรับนำไปผสมในห้องปฏิบัติการโดยการเจาะสำรวจเพื่อจำแนก ลักษณะชั้นดินนั้นตัวอย่างดินจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม โดยจะรวมตัวอย่างดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกันเข้าด้วยกันให้เหลือแบ่งชั้นดินเพียง 2 ถึง 3 ชั้น ดินที่ใช้ในการทดลองผสมนั้นเป็น ตัวอย่างดินแบบถูกรบกวนซึ่งได้มาจากการเจาะเก็บด้วยสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ในบริเวณใกล้เคียงอีก 1-2 หลุม เพื่อเก็บตัวอย่างดินตามชั้นที่แบ่งไว้ให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการทดสอบต่อไป



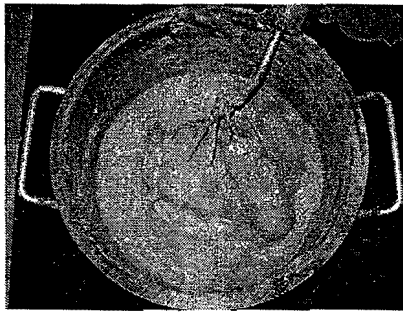
รูปที่ 4 แสดงการเจาะเก็บตัวอย่างดิน



รูปที่ 5 แสดงลักษณะชั้นดินของหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง

2. การเตรียมก้อนตัวอย่าง

นำดินอบแห้งมาทุบด้วยค้อนยางให้แตกเป็นเม็ดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการผสมร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จากนั้นผสมตัวอย่างดินเหนียวกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยโดยกำหนดให้ใช้สารเชื่อมประสานต่อน้ำหนักดินเท่ากับ 200 kg/m_3 และ 400 kg/m_3 ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปหล่อเป็นตัวอย่างสำหรับหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7 ถึง 28 วัน เพื่อหาอิทธิพลของปริมาณการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดที่อายุต่างๆ ก่อนจะนำส่วนผสมที่เหมาะสมนั้นไปทดสอบกำลังรับแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (UU Test) ต่อไป การผสมจะใช้เครื่องผสมแบบโรตารี (Rotary) โม่ผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 35 cm และลึก 30 cm การผสมแต่ละครั้งจะใช้ดินน้ำหนักประมาณ 5 กิโลกรัม โดยดินจะถูกหมักทิ้งไว้หนึ่งคืนด้วยปริมาณน้ำร้อยละ 40 โดยน้ำหนักดินแห้งเพื่อให้เม็ดดินแตกตัว ก่อนนำไปปั่นทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นจะใช้น้ำอีกร้อยละ 20 โดยน้ำหนักดินแห้งผสมกับสารเชื่อมประสานในสัดส่วนต่างๆ เทลงไปในโม่ผสมปล่อยให้ปั่นต่อไปอีกประมาณ 10 นาทีจึงหยุด และนำส่วนผสมที่ได้เทลงแบบหล่อที่ทำมาจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm สูง 10 cm และแบ่งการเทเป็น 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะทำการเคาะกับโต๊ะเป็นจำนวน 30 ครั้งต่อชั้น เพื่อให้ฟองอากาศที่ค้างอยู่ภายใน



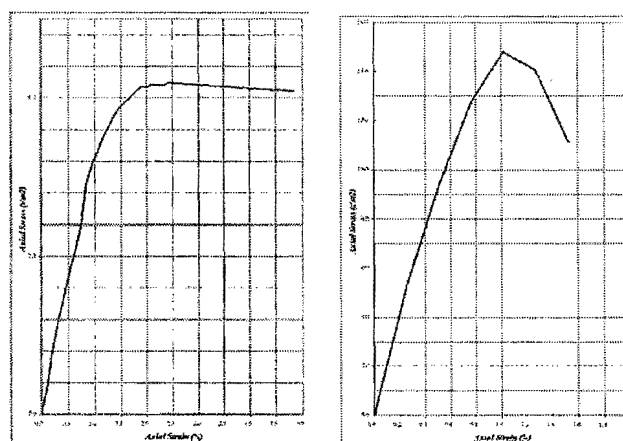
รูปที่ 6 ดินภายหลังการผสมด้วยสารเชื่อมประสาน รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

3. การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

วิธีการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของก้อนตัวอย่างนั้นมี 2 วิธีคือ วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D2166-9 สำหรับดินชนิดที่เป็น ดินเหนียวผสมกับเถ้าลอยในสภาพที่แข็งตัวแล้วที่อายุการบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน เพื่อหาอัตราสัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมซึ่งทำให้อ่อนตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 60 t/m^2 วิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนตามมาตรฐาน ASTM D2850-87 ซึ่งเป็นการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่อัดตัวอย่างและระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนจะไม่มีการระบายน้ำ (Unconsolidate Undrained, UU Test) การทดสอบจะทำกับผสมซีเมนต์ต่อเถ้าลอยที่สัดส่วนที่เหมาะสมกับดินทั้งสามชนิด ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 วัน โดยก่อนการทดสอบจะให้แรงดันน้ำกับก้อนตัวอย่างเพื่อให้อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้แรงดันกลับ 10 t/m^2 และใช้แรงดันน้ำรอบข้างในช่วง 15, 20, 25 t/m^2

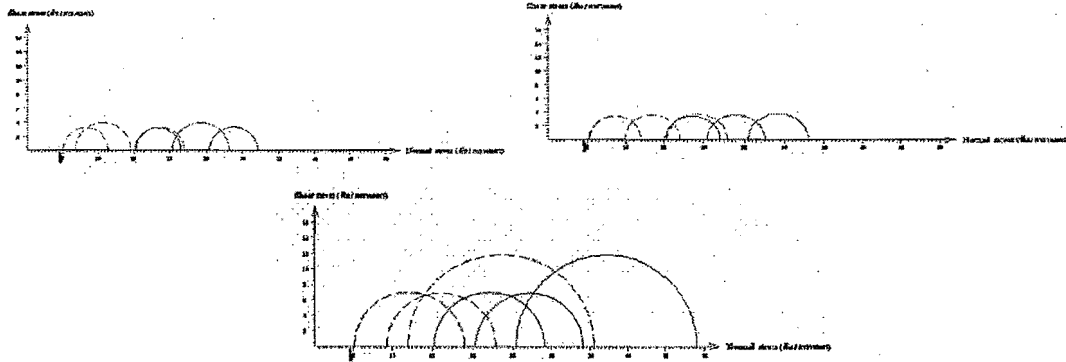
ผลการศึกษา

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว(Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D2166-9 และวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกน ตามมาตรฐาน ASTM D2850-87 (Unconsolidate Undrained,UU Test) สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ซีเมนต์ต่อเถ้าลอยร้อยละ 10:90 และ 20:80 ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ผสม เถ้าลอยจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงออกมาเป็น 2 รูปแบบคือใน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยผสมอยู่มากค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าที่ไม่มาก โดยความสัมพันธ์เป็น แบบวัสดุยืดหยุ่น แต่ในก้อนตัวอย่างที่มีการลดปริมาณเถ้าลอยเพียง 10 % ที่อายุการบ่ม ที่เท่ากันสามารถ ทำให้ก้อนตัวอย่างเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดไปเป็นลักษณะของวัสดุแบบแข็ง เปราะ(Brittle Strength) ซึ่งภายหลังการวิบัตินั้นแรงเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว

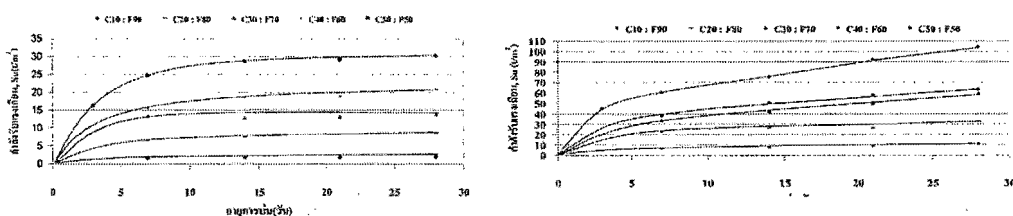


รูปที่ 9 วงกลมมอร์ของดิน CL, SC และ Topsoil ผสมซีเมนต์ผสมเถ้าลอยตามลำดับ

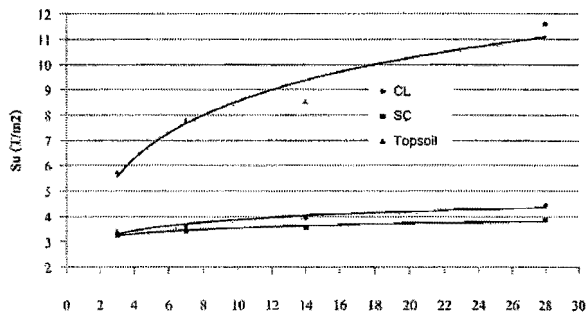
รูปที่ 9 แสดงวงกลมมอร์ของตัวอย่างดินสามชนิดผสมซีเมนต์และเถ้าลอย จากการทดสอบแรงอัดสามแกน ภายใต้แรงดันด้านข้าง 15, 20, 25 t/m^2 เพื่อหาค่า c และ ϕ สำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะนิยามหาด้วยวิธีทางกราฟิก (Mohr's Circle) จากรูปพบว่าแรงดันรอบข้างไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนอย่างชัดเจน และไม่แสดงค่าของมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ได้อย่างชัดเจน

อภิปรายผล

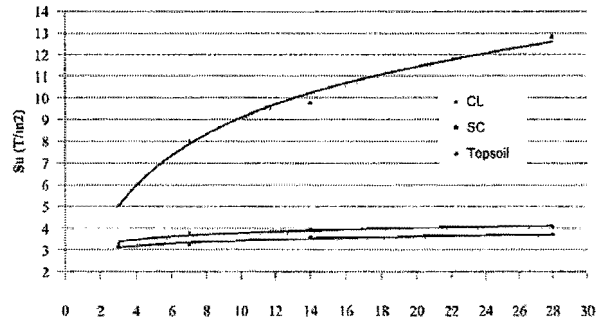
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับอายุการบ่มของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่ ปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 kg/m^3 และ 400 kg/m^3 ทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะ ทำให้เกิดการพัฒนากำลังได้อย่างรวดเร็วในช่วงอายุการบ่ม 3 วัน หลังจากนั้นอัตราการพัฒนากำลังจะลดลง แต่ในกรณีของก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยสารเชื่อมประสาน 400 kg/m^3 นั้นอัตราการพัฒนากำลังยังคงสูงกว่า กรณีแรก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณสารเชื่อมประสานที่ใช้มีมากกว่าถึง 1 เท่าทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ยังคงเกิดขึ้นอยู่โดยสามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นได้มากกว่า 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบ กำลังรับแรงเฉือนที่อายุ 7 14 21 กับที่อายุ 28 วัน โดยภาพรวมจะเห็นว่าทั้งสองกรณีนั้นการพัฒนากำลัง ก่อนข้างจะคงที่ตามอายุการบ่ม



รูปที่10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับเวลาการบ่มตัวอย่างที่สารเชื่อมประสาน 200 kg/m^3 และ 400 kg/m^3 ตามลำดับ

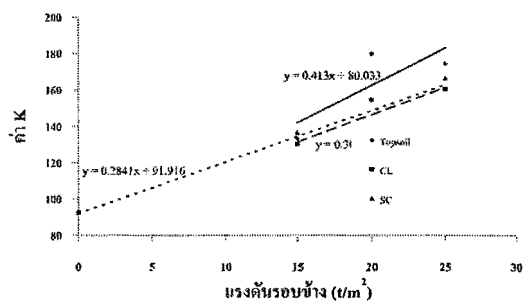


รูปที่ 11 ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับอายุการบ่มจากทดสอบ
แรงอัดสามแกนที่ประสานเชื่อมประสาน 200 kg/cm²
สัดส่วน ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยร้อยละ 17 : 83

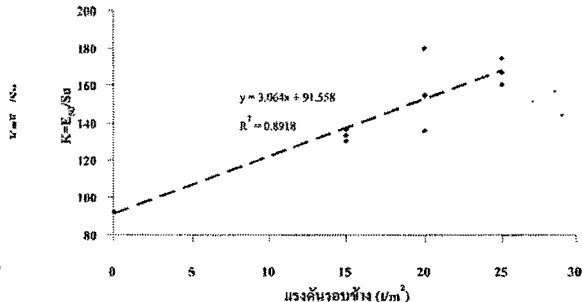


รูปที่ 12 ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับอายุการบ่มจากทดสอบ
แรงอัดสามแกนที่ประสานเชื่อมประสาน 300 kg/cm² สัดส่วน
ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยร้อยละ 10 : 90

ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการทดสอบกำลังรับแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำแล้ว ได้นำข้อมูลการทดสอบดังกล่าว หาค่าอัตราส่วนระหว่าง กำลังรับแรงเฉือนกับโมดูลัสยืดหยุ่น ($K = E_{50}/S_u$) ในรูปของค่าตัวแปร K โดยค่าทั้งหมดเป็นค่าเฉลี่ยที่ทุกอายุ การบ่ม ซึ่งพบว่าค่าตัวแปรดังกล่าวมีค่าเพิ่มตามแรงดันรอบข้างสำหรับดินทุกชนิดดังแสดงในรูปที่ 13 และเมื่อนำไปคำนวณค่า E_{50} ของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างงานดินชุดสำหรับแต่ละกรณี พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง $5.7 \times 10^3 - 5.9 \times 10^3$ t/m² โดยสามารถแสดงในรูปสมการเฉลี่ยของดินทั้งสามชนิดคือ $K = 0.3064\sigma_3 + 91.558$ (เมื่อ σ_3 มีหน่วยเป็น t/m²)



รูปที่ 13 อิทธิพลของแรงดันรอบข้างต่ออัตราส่วนระหว่าง
กำลังรับแรงเฉือนกับโมดูลัสยืดหยุ่นของดินแต่ละ
ชนิด ($K = E_{50}/S_u$)



รูปที่ 14 อิทธิพลของแรงดันรอบข้างต่ออัตราส่วนระหว่าง
กำลังรับแรงเฉือนกับโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทั้งสาม
ชนิด ($K = E_{50}/S_u$)

สรุปผลการศึกษา

1. คุณสมบัติจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

- ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวมีลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยผสมอยู่มากค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าต่ำ จะมีความสัมพันธ์เป็นแบบวัสดุยืดหยุ่นซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงกำลังหลังจุดสูงสุดได้อย่างชัดเจน แต่ในก้อนตัวอย่างที่มีการลดปริมาณเถ้าลอยเพียงร้อยละ 10 ที่อายุการบ่มที่เท่ากันสามารถทำให้ก้อนตัวอย่างเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดไปเป็นลักษณะของวัสดุแบบแข็งเปราะ ซึ่งภายหลังการวิบัตินั้นแรงเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว

- การเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานที่มีสัดส่วนการผสมซีเมนต์ต่อเถ้าลอยต่างๆ จาก 200 kg/m^3 เป็น 400 kg/m^3 สามารถทำให้กำลังรับแรงของดินปรับปรุงคุณสมบัติมีค่าเพิ่มขึ้นได้มากกว่า 3 เท่า
- หากต้องการผสมให้ได้ดินปรับปรุงคุณสมบัติที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 60 t/m^2 ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนดทั่วไปสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โดยวิธีผสมลึกสามารถใช้อัตราส่วนผสมได้แตกต่างกัน 3 รูปแบบดังนี้คือใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 50:50, 40:60 และ 31:69 ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานรวมเท่ากับ 280, 385 และ 400 kg/m^3 ตามลำดับ

2. คุณสมบัติด้านกำลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดสามแกน

- การพัฒนากำลังรับแรงเฉือนของดิน CL และ SC มีแนวโน้มเพิ่มก่อนข้างใกล้เคียงกัน ในขณะที่ดิน Topsoil มีอัตราการพัฒนากำลังที่สูงกว่ามากที่ทุกอายุการบ่ม เนื่องจากดิน Topsoil มีปริมาณดินเม็ดละเอียดปนน้อยกว่าและมีความเหนียวน้อยกว่า
- ผลการทดสอบบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าแรงดันรอบด้านมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย แต่จะมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น E_{50} มากกว่าโดยสามารถสรุปผลการทดสอบในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับกำลังรับแรงเฉือนของดิน ตามสมการ $E_{50}=K.S_u$ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ K จะแปรผันตามแรงดันรอบด้านตามสมการ $K = 0.30\sigma_3 + 91.55$ (มีหน่วยเป็น t/m^2)

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษม เพชรเกตุ (2539). “การปรับปรุงดินโดยวิธีอัดฉีดแรงดันสูงสำหรับงานขุดลึกบริเวณดินเหนียวกรุงเทพ”. เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการเรื่องงานก่อสร้างใต้ดิน’39, 18 กันยายน 2539, กรุงเทพมหานคร, หน้า 100-107.
- [2] ชงยุทธ แต่ศิริ (2540). “การออกแบบและก่อสร้างเสาเข็ม Cement Column รับถนนบนชั้นดินอ่อนกรุงเทพ”. เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการเรื่องฐานราก’40, 4 กุมภาพันธ์ 2540, กรุงเทพมหานคร, หน้า 158-180.
- [3] วัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์ (2546). “การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับดินเหนียวและทรายปนดินเหนียว”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] Bengt B.Broms (1992). “Applied Ground Improvement Techniques”. Contributions of Prof.B.B.Broms for work shop, Asian Institute of Technology.
- [5] D.Q. WU, B.B.Broms and V .Choa (1993). “Soil Improvement With Fly Ash Column”. Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, 4 - 8May, Singapore, PP435 - PP438.
- [6] Erdal Cokca (2001). “Use of Class C Fly Ash For the Stabilization of an Expansive Soil”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, July 2001, ASCE.
- [7] Hausmann, M.R. , (1990). Engineering Principal of Ground Modification. Mc Graw-Hill.