บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินเริ่มต้น

จากผลการทดลองจากคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน ซึ่งปรากฏผลดังนี้

4.1.1 water content	มีค่า 26.06
4.1.2 liquid limit	มีค่า 42.50
4.1.3 plastic limit	มีค่า 26.06
4.1.4 plastic index	มีค่า 16.44
4.1.5 specific gravity	มีค่า 2.59
4.1.6 % Final Than No. 200	มีค่า 95.00

เมื่อนำค่าที่ได้จริงมาเปรียบเทียบเพื่อจำแนกดินทางวิศวกรรม โดยใช้วิธี AASHO classification จะมีลักษณะดินเป็นดิน CL เพราะมีค่า grain size มากกว่า 50% มีค่า LL น้อยกว่า 50%

4.2 ผลการทดสอบดินหลังผสมปูนซีเมนต์

<u>ตารางแสดงสัญลักษณ์ และ คำจำกัดความของแต่ละสัญลักษณ์</u>

สัญลักษณ์	ความหมาย
MIX	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก
MIX 1	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ $w_i = w_{pl}$
MIX 2	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ $w_i = w_{ll}$
MIX 1-1	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างที่ $w_i = w_{pl}$ ใช้ปูน 3 % โดยน้ำหนัก
MIX 1-2	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างที่ $w_i = w_{pl}$ ใช้ปูน 6 % โดยน้ำหนัก
MIX 1-3	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างที่ $w_i = w_{pl}$ ใช้ปูน 9 % โดยน้ำหนัก
MIX 2-1	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างที่ $w_i = w_{ll}$ ใช้ปูน 3 % โดยน้ำหนัก
MIX 2-2	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างที่ $w_i = w_{ll}$ ใช้ปูน 6 % โดยน้ำหนัก
MIX 2-3	การผสมปูนซีเมนต์ TYPE 1 กับดินตัวอย่างที่ $w_i = w_{ll}$ ใช้ปูน 9 % โดยน้ำหนัก
SOIL SAMPLE	ดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบในสภาวะความชื้นธรรมชาติยังไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์
TEST	การทดสอบกำลังอัดโดยใช้วิธี UNCONFINED COMPRESSION TEST หลังทำการบดอัด

การทดลองดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ การดำเนินการทดลองมีขึ้นเพื่อหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยดูค่า Compressive Strength จาก Stress - Strain Curve ปริมาณซีเมนต์มีด้วยกัน 3 สัดส่วน คือ ที่ซีเมนต์ 3 % , 6 % , 9 % โดยน้ำหนัก การผสมดินซีเมนต์ MIXED SOIL AT W (initial) = W (PL) และ MIXED SOIL AT W (initial) = W (LL) ที่ระยะการบ่มนาน 3, 7 , 14 , 28 วันตามลำดับ แล้วทำการทดลอบ ด้วยวิธี Unconfined Compression Test การผสมซีเมนต์เป็นการผสมแบบแห้งโดยใช้ Mold ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2" สูง 4" ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

1. <u>ช่วงระหว่างการผสม</u> ในระหว่างการผสม ลักษณะของดินผสมจะเป็นดินร่วน และแห้ง คือเกิดปฏิกิริยา Hydration ทันที ดังจะเห็นได้จากปริมาณน้ำในดินเปลี่ยนไป คือมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อปริมาณซีเมนต์ผสมเพิ่มขึ้น ดินผสมก็จะยิ่งแห้งขึ้น
2. <u>หลังจากการผสมและการบ่มในแต่ละช่วงเวลา</u> เมื่อพิจารณาจากปริมาณซีเมนต์ที่ผสมแตกต่างกัน ปรากฏว่า ปริมาณซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังความแข็งแรง (Strength) ในดินเพิ่มมากขึ้น รวมถึงค่าความหนาแน่น ในดินที่เพิ่มขึ้นด้วยในขณะเดียวกัน จะมีลักษณะเดียวกับ

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

การบ่มคอนกรีต นั่นคือ เมื่อมีการบ่มซีเมนต์ ในช่วงเวลาที่นานขึ้น ความแข็งแรงในดินผสมซีเมนต์ ก็จะยิ่งมีค่ามากขึ้น รวมถึงค่าความหนาแน่นในดินที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งดูได้จากปริมาตรของดินตัวอย่างซึ่งมีค่าลดลงตามระยะเวลาของการบ่ม

จากกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง Stress & Strain ของดินตัวอย่างที่ไม่มีการผสมซีเมนต์ ปรากฏว่า จากกราฟรูปที่ 17 จะไม่มีช่วงการ Drop ของ Stress แต่ Stress จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตาม Strain ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่า เมื่อมีแรงอัดกระทำมากขึ้น ดินธรรมดาจะมีลักษณะของการหดตัวเพิ่มขึ้นตามแรงอัดซึ่งจากกราฟรูปที่จะได้ค่า Modulus of Elasticity ของดินธรรมดามีค่าเท่ากับ 52 ksc

เมื่อมีการผสมซีเมนต์ที่ 3 % โดยที่ W (Initial) = W (PL) ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วันซึ่งดูได้จากกราฟ รูปที่ 18 จะเห็นได้ว่า Stress จะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับดินธรรมดา และ Strain ก็จะน้อยลงกว่าดินธรรมดา ที่จุด Max Stress ค่า Modulus of Elasticity ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าดินธรรมดา ซึ่งอธิบายได้ว่า ดินผสมซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยายา Hydration ทันที ซึ่งดูได้จากการที่ ปริมาณน้ำลดลง และดินจะมีลักษณะที่แห้งขึ้นจึงทำให้ดินผสมซีเมนต์ มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นซึ่งดูได้จากปริมาตรของ ดิน-ซีเมนต์ที่ลดลง เนื่องจากซีเมนต์เป็น Hardening Agent ที่ทำให้ดินแข็งขึ้น โดยปฏิกิริยายา Hydration ทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Aluminate และสารประกอบของ Silicate ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน และจากนั้นผลของปฏิกิริยายาเคมีดังกล่าวก็จะทำให้ลดความเหนียวหนืดในดิน นั่นคือทำให้ดินร่วน พร้อมทั้งจะทำให้ลดพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในมวลดินตัวอย่าง ด้วยเหตุนี้ดินตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ ก็จะแข็งแรงสูงขึ้น

ผลของปฏิกิริยายาทางเคมีเมื่อซีเมนต์ผสมน้ำจะก่อให้เกิดสารต่อไปนี้

1. Calcium Silicate Hydrate (CSH)
2. Calcium Aluminate Hydrate (CAH)
3. Calcium Hydroxide (Ca(OH)2)

สาร CAH และ CSH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ โดยสามารถเกาะยึดมวลเม็ดดิน เข้าด้วยกันทำให้รวมตัวกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ ที่มีความแข็งแรงสูง

ส่วนสาร Ca(OH)2 จะทำปฏิกิริยากับดินซิลิก้า (Soil Silica) และดิน อะลูมินา (Soil Alumina) ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยา ที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง เขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$Cement + H_2O \rightarrow CSH + CAS + Ca(OH)_2$

$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca + 2OH$ ------------------------------(1)

$Ca + 2OH + Soil\ Silica\ (SiO_2) \rightarrow CSH$ ------------------------------(2)

$Ca + 2OH + Al_2O_3 \rightarrow CAH$ ------------------------------(3)

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำและผสมลงในดิน จะทำให้เกิดสาร CAH & CSH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะดังสมการ (1), (2) , (3) ตามลำดับ

ซึ่งสมการ 1 เป็นสมการที่แสดงว่า CSH & CAH ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยายาซีเมนต์ผสมกับน้ำโดยตรงดังนั้น CSH & CAH ที่เกิดโดยตรงนี้ จะเรียกว่า " ปฏิกิริยายาเริ่มแรก " (Primary reaction)

ส่วนสมการ 2 , 3 เป็นสมการที่แสดงว่า CSH & CAH เกิดจากปฏิกิริยายาต่อเนื่อง ระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับ ซิลิก้า และ อลูมิน่า ในดิน ซึ่งเรียกปฏิกิริยายานี้ว่า Secondary Reaction

เมื่อเพิ่มระยะเวลาของการบ่มออกไป ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นส่วน Strain จะลดลงตามระยะเวลาของการบ่มที่นานขึ้น ค่า Max Stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่ 3 , 7 , 14 , 28 วันตามลำดับ ซึ่งดูได้จากรูปที่ 18,22,26,30 ตามลำดับ ค่า E จะมีลักษณเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่ระยะเวลาของการบ่มนานขึ้นปฏิกริยาเคมีเกิดได้มากขึ้น Strength จะมีค่าเพิ่มขึ้น Strain ก็จะน้อยลงเนื่องจากดินผสมซีเมนต์จะแข็งขึ้น จากความสัมพันธ์ของ $E = \sigma / \in$ เมื่อ σ มากขึ้น และ $\in$ ลดลงจะทำให้ E มีค่ามากขึ้น

เมื่อผสมซีเมนต์ที่ 6 % และ 9 % ที่ MIXED SOIL AT $W_i = W_{PL}$ จากกราฟ Stress- Strain รูปที่ 19,23,27,31 และ 20,24,28,32 ตามลำดับ

จะเห็นว่า Stress และ E มีลักษณะเพิ่มขึ้นตาม % Cement ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม แต่ Strain จะลดลงซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการผสมซีเมนต์ ที่ 3 %

MIXED AT $W_{(initial)} = W_{LL}$ เมื่อผสมซีเมนต์ที่ 3 % ที่ระยะการบ่มที่ 3 วัน

ผลจากกราฟ Stress-Strain รูปที่ 34 จะเห็นว่า Stress จะไม่มี ช่วงการตกของกราฟที่แน่นอน **ส่วน Strain จะมีค่ามากขึ้นตาม Stress ซึ่งค่า Max Stress จะมีค่าน้อยกว่าดินตัวอย่างที่ยังไม่ได้ผสมซีเมนต์ด้วย ส่วนที่กราฟช่วงระยะเวลาการบ่ม ที่ 7 , 14 , 28 วัน Stress จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และลักษณะเส้นกราฟของ Stress จะไม่มีช่วงของการตกที่แน่นอน ส่วน Strain จะมีลักษณะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม**

เช่นเดียวกัน ค่า Modulus of Elasticity จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นนิดเดียว ซึ่งดูได้จากกราฟที่ 34,38,42,46

เมื่อผสมซีเมนต์ที่ 6 % ที่ระยะการบ่มที่ 3 วัน

ผลจากกราฟ Stress- Strain รูปที่ 35 จะเห็นได้ว่า Stress จะสูงขึ้นและกราฟจะมีลักษณะ ช่วงของการตกที่เด่นชัดขึ้นกว่า ส่วนผสมซีเมนต์ 3 % และ Strain จะมีค่าลดลงที่จุด Max Stress ค่า E จะเพิ่มขึ้นกว่าปริมาณซีเมนต์ผสมที่ 3 % และค่า E ที่ได้จะมากกว่าค่า E ของดินที่ยังไม่ได้ผสมซีเมนต์

ส่วนกราฟที่ระยะเวลาของการบ่มที่ 7 , 14 , 28 วัน

Stress จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และมีลักษณะดังรูปที่ 35,39,43,47

Strain จะลดลงตามระยะเวลาการบ่ม เนื่องจาก ดิน-ซีเมนต์จะแข็งขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม

เมื่อผสมซีเมนต์ที่ 9 % ที่ระยะการบ่มที่ 3 วัน

ผลจากกราฟ Stress- Strain รูปที่ 36 จะเห็นได้ว่า กราฟของ Stress จะมีลักษณะของช่วงการตกที่เด่นชัด และจะมีค่าสูงกว่าของปริมาณซีเมนต์ผสมที่ 6 % ตามระยะเวลาการบ่มที่ 3, 7,14 ,28 วันตามลำดับ ส่วน Strain จะลดลงตามระยะเวลาของการบ่ม และค่า E จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม และมากกว่าที่ซีเมนต์ผสม 6 % ซึ่งดูได้จากรูป 36,40,44,48

เมื่อนำกราฟ Stress-Strain มาเขียนในกราฟเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกัน ลักษณะของกราฟจากการ Test ที่ 3 วัน (ดูกราฟรูปที่ 21) จะเห็นได้ว่า Max Stress จะเกิดจาก Mix 1-3 และที่ Max Stress จะเกิด Strain ที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุก MIXED

ส่วนกราฟของ Mix 2-1 จะให้ค่า Stress น้อยที่สุดและค่า Strain จะมีค่ามากที่สุดด้วย ซึ่งจากกราฟสามารถสรุปได้ว่า

กราฟที่มี Max Stress จะให้ Min Strain

กราฟที่มี Min Stress จะให้ Max Strain

กราฟของ Mix 1-3 จะมีค่า E มากที่สุด ส่วน Mix 2-1 จะมีค่า E น้อยที่สุด

ที่ระยะเวลาการบ่ม 7,14,28 วัน ก็จะให้ผลเช่นเดียวกัน ดังแสดงด้วยกราฟที่ 25,29,33 ตามลำดับ จากกราฟเปรียบเทียบ Stress-Strain ผลที่ได้ทั้งหมดจะเห็นได้ว่า Stress จะสูงขึ้นในทุกๆ Mixed และจะสูงที่สุดที่ระยะการบ่ม 28 วัน ส่วน Strain จะมีลักษณะลดลงในทุก ๆ Mixed และลดลงมากที่สุดที่ระยะการบ่ม 28 วัน และค่า E จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่มในทุก ๆ Mixed และจะสูงที่สุดที่ระยะการบ่ม 28 วัน

การพัฒนากำลัง Strength จะเพิ่มมากขึ้นในทุก Mixed ที่ระยะเวลาการบ่มนานขึ้นซึ่งดูได้จากกราฟที่ 56

ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำและสารเคมีในดินดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น

จากตารางที่ 35 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Water Content กับระยะเวลาของการบ่ม ที่ Mixed Soil At W_i = W_{PL}

จากกราฟจะเห็นได้ว่า Water Content จะลดลงตามระยะเวลา โดยที่ Mix 1-3 จะลดลงมากที่สุด

อธิบายได้ว่า เกิดจากปฏิกิริยายา Hydration โดยที่ Mix 1-3 ใช้ปริมาณซีเมนต์มากที่สุดคือ 9 % โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกริยามากที่สุดและน้ำก็เข้าทำปฏิกริยามากตามปฏิกริยาเคมีด้วยจึงทำให้น้ำลดลงดังกล่าว และผลของปฏิกิริยายา Hydration ก็ยังส่งผลต่อ Mixed Soil At W_i = W_{LL} เช่นกันคือ เมื่อระยะเวลาของการบ่มที่นานขึ้น Water Content ก็จะน้อยลง

จากกราฟ Plastic Index & % Cement Mixed (กราฟรูปที่ 63) จะเห็นได้ว่าที่ระยะหลังการบ่มที่ 28 วัน แล้วค่า Plastic Index ของ Mixed Soil At W_i = W_{Pl} และของ Mixed Soil At W_i = W_{LL} ซึ่งจะลดลงตาม % Cement ที่เพิ่มขึ้นโดยที่ PI ของ Mixed At W_i = W_{Pl} จะลดลงมากกว่าของ Mixed Soil At W_i = W_{LL}

อธิบายได้ว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังความแข็งแรงในดินเพิ่มมากขึ้นรวมทั้งความหนาแน่นในดินเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้ PI ลดลงตามความแข็งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเข้าทำปฏิกิริยา Hydration ของน้ำในมวลดิน ดังนั้นคุณสมบัติความเหนียวหนืดในดินจะมีผลกระทบต่อปฏิกริยาเคมีระหว่างซีเมนต์และน้ำในดินนั่นคือ ดินที่มี PI สูงปริมาณซีเมนต์ผสมที่เหมาะสมก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น เพื่อจะได้ Strength ตามต้องการ