บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1) ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2) คุณสมบัติและพฤติกรรมของสารปอซโซลาน 3) พฤติกรรมทางวิศวกรรมด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์ และ 4) การปรับปรุงดินฐานรากโดยการใช้ Cement Column โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

สารประกอบหลักในเม็ดปูน ได้แก่ ไตรคัลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) ไดคัลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, C_2S) ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, C_3A) และเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF) คุณสมบัติของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดนี้แสดงดังตารางที่ 2.1 และมีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนี้

1. คัลเซียมซิลิเกต (C_3S หรือ Alite) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า C_2S เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดความร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 7 วัน ดังภาพที่ 2.1 กำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของ C_3S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณของ C_3S อยู่ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์

2. ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S หรือ Belite) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการแข็งตัวและเกิดความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ ในช่วงแรก กำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุเกินกว่า 7 วัน แต่ในระยะเวลายาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S อยู่ประมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์

3. คัลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม จะทำปฏิกิริยากับน้ำและก่อให้เกิดการก่อตัวทันที (Flash set) และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกันการก่อตัวทันที (Flash set) ทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงไปในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A ปูนซีเมนต์ปอร์ต

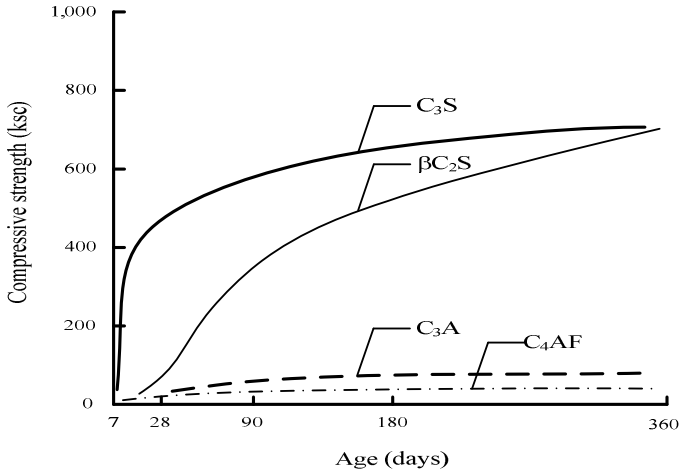
แลนด์จะมี C_3A อยู่ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จะมีความสามารถทนต่อซัลเฟตสูง

4. เตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF หรือ Celite) เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C_4AF มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและก่อตัวภายในเวลาไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ C_4AF มีค่าต่ำและไม่แน่นอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ประมาณ 5-15 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.1

สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)	น้อย (200 จูลต่อกรัม)	สูงมาก (850 จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (420 จูลต่อกรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่เสถียรในน้ำ และถูกซัลเซตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา



ภาพที่ 2.1 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.คุณสมบัติของสารประกอบรองในปูนซีเมนต์

สารประกอบรองในเม็ดปูน ได้แก่ ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate Dihydrate หรือ $CaSO_4.2H_2O$) Lime อิสระ (Free lime, CaO) แมกนีเซียมออกไซด์หรือแมกนีเซีย (Magnesium Oxide หรือ Magnesia หรือ MgO) และอัลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ Na_2O, K_2O) คุณสมบัติของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดนี้ มีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนี้

1. ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate Dihydrate หรือ $CaSO_4.2H_2O$) ในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ จะมีการเติมยิปซั่ม เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A หรือเป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ผลของปฏิกิริยาจะเกิดเป็น Ettringite (Calcium Trisulphoaluminate) ถ้าไม่มีการเติมยิปซั่ม ปูนซีเมนต์จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องมีความเหมาะสม เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุด และเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซั่มที่มากเกินไปจะทำให้เกิด Ettringite ในปริมาณที่สูง และจะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของปูนซีเมนต์

2. Free Lime (CaO) สามารถเกิดได้ 2 กรณี ได้แก่ 1) เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด และ 2) เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายปริมาตร ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ความไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime (Unsoundness due to lime)”

3. แมกนีเซียมออกไซด์ หรือ แมกนีเซียม วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์โดยมากจะมี $MgCO_3$ เมื่อเผาจะเกิดการแยกตัวเป็น MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูป Periclase (MgO) ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะเหมือนกับ CaO คือทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้

4. อัลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ Na_2O, K_2O) ที่อยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือด่างในปูนซีเมนต์ จะทำให้เกิด “ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction หรือ ARR)” ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลลาไลต่ำ

3.ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสองลักษณะ

1.อาศัยสารละลาย: ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง: ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์

3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด “คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)” ประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์ และสารประกอบ “คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ $3CaO.2SiO2.3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH)” ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

<u>สมการของ C_3S</u>

$$3(3CaO.SiO_2) + 6H_2O = 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$\text{หรือ} \quad 2C_3S + 6H_2O = C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

<u>สมการของ C_2S</u>

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O = 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

$$\text{หรือ} \quad 2C_2S + 4H_2O = C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \qquad (2.2)$$

ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้ จะได้ Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน (CSH) โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก (pH ประมาณ 12.5) และช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

3.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A เกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O = 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

$$\text{หรือ} \quad C_3A + 6H_2O = C_3AH_6 \qquad (2.3)$$

ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิปซั่มเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดย Ions ของซัลเฟตจากยิปซั่มที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของEttringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้

$$3CaO.Al_2O_3 + CaSO_4.2H_2O = 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$$

$$\text{หรือ} \quad C_3A + \text{Gypsum} = \text{Ettringite} \qquad (2.4)$$

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวของชั้น Ettringite ก็จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่ง Ions ของซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite เมื่อ Ions ของซัลเฟตทำปฏิกิริยากับ C_3A หมดแล้ว C_3A จะทำปฏิกิริยากับ Ettringite และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนต (Calcium Monosulfoaluminate, $CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O$) แคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตสามารถเปลี่ยนกลับเป็น Ettringite เมื่อได้ Ions ของซัลเฟตอีก ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้คอนกรีต/ดินซีเมนต์ถูกกัดกร่อนด้วยสารซัลเฟต

3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการต่อไปนี้

$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + CaSO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 = 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3).3CaSO_4$

หรือ C_4AF + Gypsum + $Ca(OH)_2$ =Sulphoaluminate และ Sulphoferrite (2.5)

4.ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์

ดังได้กล่าวแล้ว ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลักสี่ตัว คือไตรคัลเซียมซิลิเกต ไดคัลเซียมซิลิเกต ไตรคัลเซียมอลูมิเนต และเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ สารประกอบทั้งสี่นี้เป็นองค์ประกอบหลักที่ให้กำลังอัดกับดินซีเมนต์ เมื่อน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore water) สัมผัสกับปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นหลัก (ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานปฐมภูมิ (Primary cementitious products)) ที่เกิดขึ้น ได้แก่ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C_2SH_x, $C_3S_2H_x$) คัลเซียมอลูมิเนต (C_3AH_x, C_4AH_x) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นสองตัวแรกเป็นผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious products) หลัก คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มีลักษณะเป็นผลึกแข็งฝังตัวอยู่ในดิน ผงปูนซีเมนต์ (Cement particles) จะเชื่อมเม็ดปูนซีเมนต์ (Cement grains) ที่อยู่ติดกันเข้าด้วยกันระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและก่อตัวเป็นโครงแข็ง (Hardening skeleton matrix) ล้อมรอบเม็ดดิน (Soil particles) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะทำให้ pH ของน้ำในช่องว่างระหว่างดินมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเป็นด่างที่สูงนี้จะทำปฏิกิริยาหลอมละลายกับซิลิกาและอลูมินาในดิน (ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดตามธรรมชาติ) ปฏิกิริยานี้มีลักษณะเช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับด่างเข้มข้น ซิลิกาและอลูมินาที่ถูกหลอมละลายจะทำปฏิกิริยาอย่างช้ากับอิออนของแคลเซียมอิสระที่เกิดจากการสลายตัว (Hydrolysis) ของปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการแข็งตัวของดินซีเมนต์ตามอายุบ่ม ปฏิกิริยาทุติยภูมินี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอสซาลาน (Pozzolanic reaction)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์สามารถอธิบายได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้ ปฏิกิริยาที่จะแสดงต่อไปนี้เป็นเพียงปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

$C_3S + H_2O$ = $C_3S_2H_x$ (Hydrated gel) + $Ca(OH)_2$ (2.6)
Primary cementitious products

$Ca(OH)_2$ = $Ca^{++} + 2(OH)^-$ (2.7)

$Ca^{++} + 2(OH)^- + SiO_2$ (soil silica) = CSH (2.8)
(Secondary cementitious product)

$Ca^{++} + 2(OH)^- + Al_2O_3$ (Soil alumina) = CAH (2.9)
(Secondary cementitious product)

เมื่อ pH น้อยกว่า 12.6 จะเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$C_3S_2H_x$ = $C_3S_2H_x$ (Hydrated gel) + $Ca(OH)_2$ (2.10)

การเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมประสานในดินซีเมนต์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการละลายของซิลิกาและอลูมินาในดินเหนียว การละลายนี้จะแปรผันตามความบริสุทธิ์ของดินเหนียว ความเป็นผลึกของซิลิกาและอลูมินา และขนาดของเม็ดดิน เป็นต้น จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าพันธะเชื่อมประสานของผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิมีความแข็งแรงกว่าพันธะเชื่อมประสานของผลิตภัณฑ์ทุติยภูมิอย่างมาก ที่ pH ต่ำๆ (pH มีค่าต่ำกว่า 12.6) จะเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (2.9) pH จะมีค่าลดลงขณะที่เกิดปฏิกิริยาปอสซาลาน (เกิดการลดลงของ $Ca(OH)_2$) และการลดลงของ pH จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบ $C_3S_2H_x$ เป็น CSH ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปอสซาลานจะกินเวลานานหลายเดือนหรือแม้กระทั่งเป็นปี ดังนั้น กำลังอัดของดินซีเมนต์จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

เราอาจสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปอซซาลานจะเกิดขึ้นกับดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดอยู่มาก ผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิจะเพิ่มกำลังอัดให้กับดินซีเมนต์ กระบวนการทุติยภูมิ (Secondary process) จะเพิ่มกำลังและความคงทนให้กับดินซีเมนต์โดยการผลิตสารเชื่อมประสานเพิ่มเติม ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดิน

คุณสมบัติและพฤติกรรมของสารปอซโซลาน

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหินหรือได้จากการเผาไหม้จากวัสดุทางธรรมชาติ เรียกเถ้าชีวมวล เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร $Ca(OH)_2$ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยคงต้องพิจารณากฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต แต่จากการศึกษาของ สมชัยและคณะ (2540) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าวอาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

1. คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย

1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X- ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ตารางที่ 2.2

ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO_2 + Al_2O_3 และ Fe_2O_3), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากกาการเผา (Loss on Ignition (LOI)), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับ เถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (Alkali) ในรูปของโซเดียม

ออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ. 2431 – 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ $SiO_2 + Al_2O_3$ และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงมากกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมาก คือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าแหล่งอื่น

ตารางที่ 2.3

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 – 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

1.2 ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition)

สมชัยและคณะ (2540) เมื่อถ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวลงของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกัน สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (glass) มากกว่าร้อยละ 90% อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X- ray diffraction จะ

พบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซท์

1.3 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) จะได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในคือเถ้าลอยได้แก่ซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ได้สารไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลิตผลเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลาเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement)

$$2\,(2\,CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3\,CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

$$2\,(3\,CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3\,CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2\,(2\,CaO.Al_2O_3) + 4H_2O \longrightarrow 3\,CaO.2Al_2O_3.3H_2O + Ca(OH)_2$$

$$2\,(3\,CaO.Al_2O_3) + 6H_2O \longrightarrow 3\,CaO.2Al_2O_3.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยาระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับเถ้าลอยลิกไนต์ (pozzolanic reaction)

$$3\,Ca(OH)_2 + 2.SiO_2 \longrightarrow 3\,CaO.2SiO_2.3H_2O$$

$$3\,Ca(OH)_2 + 2.Al_2O_3 \longrightarrow 3\,CaO.2Al2O_3.3H_2O$$

อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะซับซ้อนกว่าการนำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง ชัย และคณะ (2542) รายงานว่าเถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมอลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงแรก แต่จะหน่วงแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

2.คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

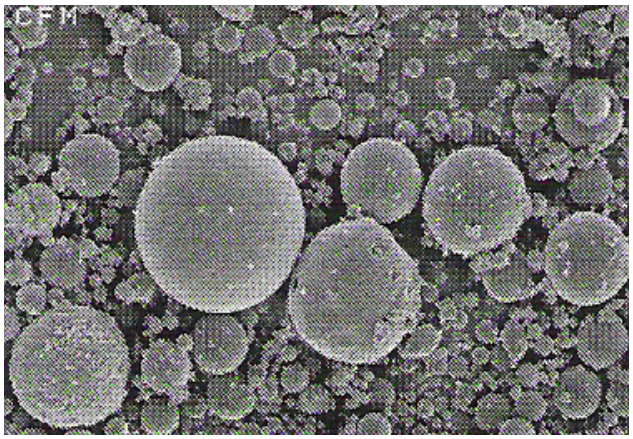
ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนค้างตะแกรงเบอร์325 หลังการร่อนแบบเปียก, Max %	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน , Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน , Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave , Max %	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
- ความหนาแน่น , Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
- ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 , Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Mutiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ค้างตะแกรงเบอร์325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

2.1 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่ง

แตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังภาพที่ 2.2 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



ภาพที่ 2.2 Scanning Electron Microsope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 3,000 เท่า)

2.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 m.m.) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี Particle size-analysis หรือวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิมิเตอร์ (turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจาก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.5 จะ

เห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้างบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

ตารางที่ 2.5
ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

Sample Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 (%)	Air Permeability (cm^2/g)	Mean Particle Size (mm)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

2.3 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

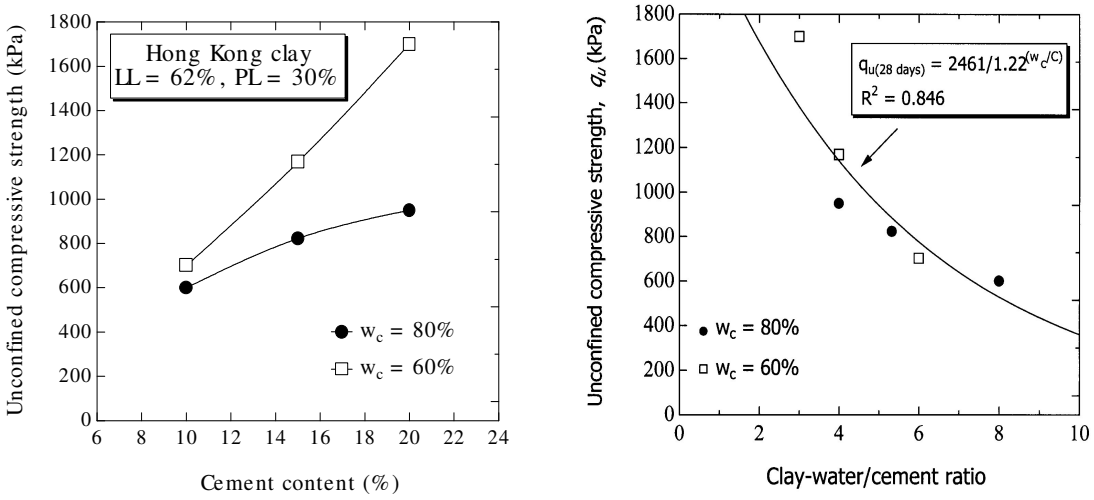
พฤติกรรมด้านกำลังของดินซีเมนต์

Horpibuksuk et al., 2003 ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์อย่างละเอียด และได้สร้างสมมติฐานขึ้นเรียกว่า Clay-water/cement ratio hypothesis ซึ่งกล่าวว่า “กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียวคือ Clay-water/cement ratio” ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และสมการที่ 2.11

$$q_u = \frac{A}{B^{w_c/C}} \qquad (2.11)$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa) A และ B คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และ w_c/C คือ Clay-water/cement ratio ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อ

ปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักผึ่งแห้ง จากการทดสอบดินตัวอย่างหลายชนิดทั้งในประเทศญี่ปุ่นและต่างประเทศ พบว่า *B* มีค่าอยู่ระหว่าง 1.22 ถึง 1.24



ภาพที่ 2.3 การประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ Clay-water/cement ratio ในการศึกษาลักษณะกำลังของดินซีเมนต์ (Horpuibulsuk et al, 2003)

Horpibulsuk et al., 2003 ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของกำลังของดินหลายชนิดผสมกับซีเมนต์กับระยะบ่ม และได้สรุปว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ทุกชนิดมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และสามารถแสดงในฟังก์ชันของล็อคกาลิทึม” ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \qquad (2.12)$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่มใดๆ q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน และ *D* คือระยะบ่ม

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะได้สมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ดังสมการที่ (2.13)

$$\left(\frac{q_{(w_c/C)1,D}}{q_{(w_c/C),28}}\right)=1.24^{\{(w_c/C)_{,28}-(w_c/C)_{1,28}\}}\left(0.038+0.0281\ln D\right) \quad (2.13)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)1,D}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ $(w_c/C)_1$ หลังจากระยะบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/C),28}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วันที่ w_c/C สมการที่ (2.13) นี้เป็นสมการสากลที่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิดเนื่องจากว่าผลของชนิดของดินได้ถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนของกำลังอัดแกนเดียว ดังแสดงในเทอมทางซ้ายมือของสมการ สมการนี้ได้ถูกใช้ในการทำนายกำลังของดินกรุงเทพผสมซีเมนต์ และดินต่างๆ ทั่วประเทศญี่ปุ่นโดย Horpibulsuk et al., 2003

การปรับปรุงดินฐานรากโดยการใช้ Cement Column

การปรับปรุงดินโดยใช้ซีเมนต์และ/หรือปูนขาว (Lime) ผสมกับดินเดิมในที่ที่เป็นดินอ่อนหรือดินที่ต้องการปรับปรุง เพื่อการเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังการรับแรงของดินเดิมและด้านการซึมน้ำ วิธีการปรับปรุงดินได้มีวิวัฒนาการมาจากการศึกษาเป็นระยะเวลานานแล้วทั้งในประเทศสวีเดนและญี่ปุ่น ได้เริ่มมีการทดสอบการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในปี 1950 และก่อสร้าง Lime Column ในช่วงปี 1970 (Chida , 1996) ในประเทศ สวีเดน Prof. Bengt Broms และ Swedish Geotechnical Institute ได้ร่วมกันพัฒนาการออกแบบและควบคุมการก่อสร้าง Lime Column และ Lime/Cement Column โดยเริ่มก่อสร้างครั้งแรกในปี 1975 ซึ่งในประเทศไทยก็ได้เริ่มมีการนำ Cement Column มาประยุกต์ใช้ในงานจริงประมาณปี 1990 โดยนำมาใช้สำหรับงานปรับปรุงดินอ่อน ฐานรากถนน เขื่อนดินกันลำน้ำ การทำกำแพงกันดินสำหรับงานขุดลึก , ป้องกันลาดริมตลิ่ง ป้องกันการเคลื่อนตัวของดินต่อโครงสร้างข้างเคียงระหว่างการก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้รับค่อนข้างเป็นที่พอใจ

ผลการศึกษาที่ผ่านมาการปรับปรุงดินฐานรากโดยวิธี Deep Stabilization นั้นนิยมใช้ปูนขาวชนิด Quick Lime และปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นตัวผสม โดย Bergado และคณะ (1992) กล่าวว่า ได้มีการศึกษาปรับปรุงดิน โดยใช้ Quick Lime ที่ Asian Institue of Technology พบว่าอัตราส่วนของ Quick Lime ที่เหมาะสมอยู่ที่ 5 ถึง 10% ซึ่งให้ค่า Unconfined Compressive Strength สูงขึ้นประมาณ 5 เท่า , Preconsolidation เพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า , ค่า Coefficient of Consolidation เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า และเพิ่มค่า Internal Friction Angle ประมาณ 24 ถึง 30

องศา ในการเลือกใช้ Quick Lime หรือ Cement สำหรับผสมนั้น Prof. Broms, 1984 ได้แนะนำว่าในพื้นที่แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้น การใช้ปูนซีเมนต์มีความเหมาะสมกว่า Quick Lime เพราะ

1. ค่าปูนซีเมนต์ราคาถูกกว่า Quick Lime

2. การเก็บรักษาปูน Quick Lime ทำได้ยากเพราะสภาพภูมิอากาศมีความชื้นมาก

3.ปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติสูงขึ้น ดีกว่าการใช้ Quick Lime ที่มีข้อจำกัดกว่า

ทั้งนี้ได้มีการศึกษาโดยใช้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผสมกับปูนซีเมนต์ที่ Asian Institute of Technology พบว่า ที่อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ 10% ค่า Unconfined Compressive Strength สูงขึ้น 10 เท่า, ค่า Preconsolidation Pressure สูงขึ้น 2 ถึง 4 เท่า และค่า Coefficient of Consolidation สูงขึ้น 10 ถึง 40 เท่า

1. **วิธีและเทคนิคการทำ** Cement Column

วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถจำแนกออกตามวิธีการก่อสร้างเป็น 2 แบบ คือ

1. Mechanical Mixing Method
2. Slurry Jet Mixing Method

ซึ่งการก่อสร้างทั้งสองแบบมีลักษณะต่างกันในเครื่องจักรที่ใช้ก่อสร้าง แต่ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยในแต่ละวิธีได้เคยมีการทดลองใช้งานจริงในประเทศไทยมาแล้วทั้งสิ้น

1.1 **วิธี** Mechanical Mixing Method

วิธีนี้สามารถแยกได้ออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะรูปร่างของสารผสมที่ใช้ผสมลงในดิน ดังนี้

ก. แบบ Wet Mixing หรือ Rotary Mixing Low Pressure

วิธีนี้ได้ทดลองใช้กับงานของกรมทางหลวงบนทางหลวงหมายเลข 34 สายบางนา-บางปะกง ตอนที่ 1, 2 และ 3 ก่อสร้างโดยบริษัท อุบลสหธรรมขนส่ง จำกัด วิธีนี้คาดว่าได้พัฒนาใช้ในยุโรป โดย Prof. Broms ประมาณปี 1975 ทำการผสมปูนขาวกับดินเหนียวในประเทศสวีเดนเพื่อทำเป็น Lime Column โดยเป็นเครื่องมือแบบก้านเจาะเดี่ยว (Single Shaft) ซึ่งต่อมาก็ได้มีการพัฒนาโดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาออกแบบเครื่องจักรเป็นแบบ Multi Shafts Mixing Auger เพื่อใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเป็นกำแพงในงานขุดลึกหรือในการป้องกันระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น

ลักษณะของเครื่องจักรที่ใช้ประกอบด้วย รถเจาะพร้อมเครื่องปั่น, ก้านเจาะ ซึ่งตรงปลายมีใบพัดสำหรับผสมดินและรูจ่ายสารผสมในรูป Slurry, ปั๊ม Slurry, ถังผสมพร้อมตวงอัตโนมัติ, ถังเก็บสารผสม, ชุดบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4 วิธีการก่อสร้างจะทำการกดก้านเจาะพร้อมหมุนใบพัดขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการลงไปจนถึงตำแหน่งความลึกที่กำหนด จากนั้นทำการฉีด Slurry ที่มีอัตราส่วนสารผสมต่อน้ำตามที่ออกแบบในห้องทดลอง (แต่ไม่เกิน 1:1.5) ด้วยแรงดันประมาณ 10-20 bars ในดินเหนียวอ่อนตามลักษณะใบพัดหรือชนิดของดิน และทำการบ่มจนครบอายุจะได้ Column ตามอายุที่ออกแบบ

ข. แบบ Dry Mixing

วิธีนี้การก่อสร้างและเครื่องจักรมีลักษณะคล้ายกับวิธี Wet Mixing จะต่างกันในส่วนของการจ่ายปูน ซึ่งจะถูกจ่ายไปตามก้านเจาะด้วยลมแรงดันสูงไปที่ปลายก้านเจาะและ/หรือ ใบกวนดิน วิธีนี้ค่อนข้างจะนิยมในประเทศญี่ปุ่น โดยเรียกว่าวิธี Dry Jet Mixing Method (DJM) หัวเจาะแสดงในภาพที่ 2.5 Bergado et. Al. , 1992 กล่าวว่าวิธีนี้ให้ผลในการปรับปรุงดินดีกว่าการใช้ Cement Slurry โดยเฉพาะการใช้ Quick Lime เป็นสารผสมเนื่องจากปฏิกิริยา Hydration จะให้ความร้อนแก่ดินบริเวณรอบๆ ดินที่ถูกผสม

เกษม , 2541 กล่าวว่า การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์วิธีนี้ปกติควรจะทำใต้ระดับ Water Table และเหมาะสำหรับดินทรายหลวง ที่มีค่า SPT N Value < 10 หรือดินเหนียวที่มีค่า SPT N Value < 5 และมีค่า Sensitivity สูงมาก

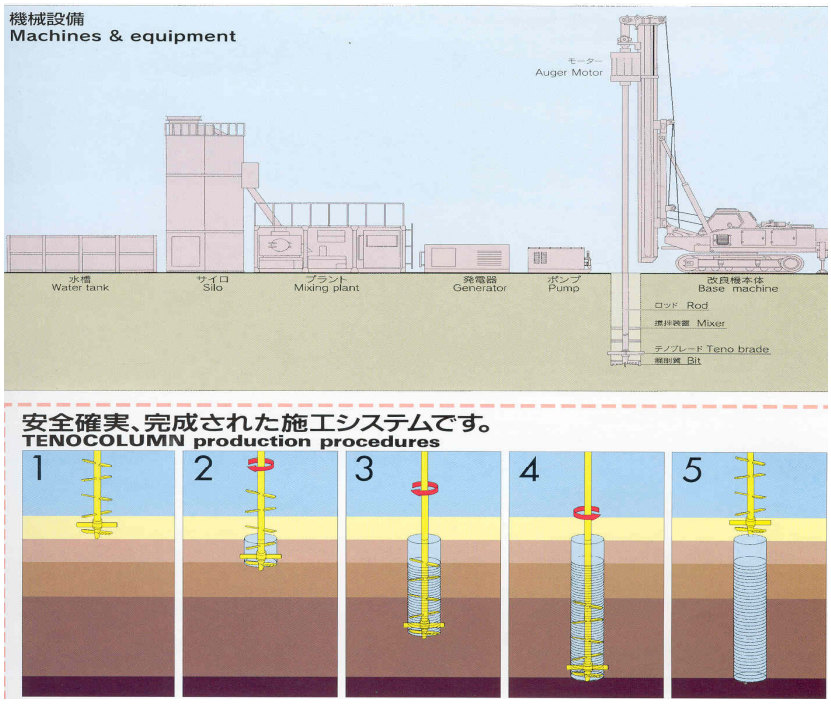
สำหรับกรมทางหลวงได้มีการนำวิธีนี้มาใช้สำหรับงานก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 34 สาย บางนา-บางปะกง ตอน บางวัว-บางปะกง ผลจากการตรวจสอบปรากฏว่าได้ผลงานเป็นที่น่าพอใจ

1.2 วิธี Slurry Jet Mixing Method หรือ Jet Grouting Method

การปรับปรุงดินวิธีนี้จะใช้สารผสมในรูป Slurry ฉีดพ่นด้วยแรงดันสูงประมาณ 200 – 500 bars ผ่านรูเล็กๆ (Nozzles) ที่ปลายหัวเจาะพร้อมกับทำการหมุนก้านเจาะเพื่อให้สารผสมในรูป Slurry ผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับดินรอบๆ ก้านเจาะ เมื่อสารผสมในรูป Slurry ผสมกับดินและทำปฏิกิริยาแล้วจะได้ Column หรือ Wall ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะก้านเจาะว่าเป็นแบบ Single Shaft หรือ Multiple Shafts ขนาดของเสาเข็มหรือกำแพงที่ต้องการ ชนิดของดินและแรงดันที่ใช้ในการฉีดผสม ในเทคนิคการก่อสร้างยังมีการแยกย่อยออกไปอีก เช่น การกดหัวเจาะไปพร้อมการทำ Pre-Cut ดินจนถึงระดับปลายเข็มอาจจะทำได้โดยการใช้น้ำฉีด, อากาศอัด หรือใช้น้ำและอากาศอัดลงไปพร้อมกันเพื่อทำการกวนดินให้เหลวเพื่อง่ายต่อการฉีด Slurry ผสมกับดินขณะดึงก้านเจาะขึ้น ดังในภาพที่ 2.6

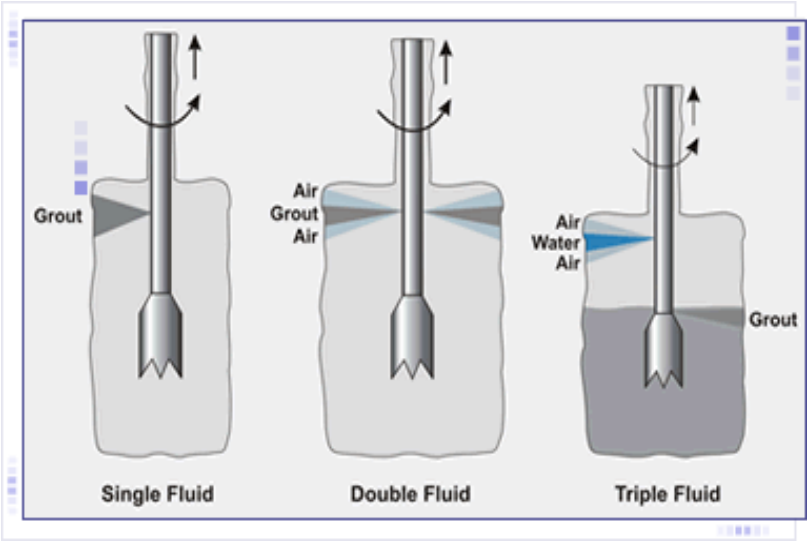
การก่อสร้าง Column วิธีนี้จะมีข้อดีในส่วนของเครื่องจักรที่ค่อนข้างเล็กกว่าวิธีอื่น ขนย้ายสะดวกและสามารถจะก่อสร้าง Column ขนาดใหญ่ๆ ได้ง่ายกว่า แต่มีข้อเสียในด้านการควบคุมคุณภาพ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอาจจะมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับความแข็งของดิน การผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างยากและอาจจะมีผลกระทบต่อดินข้างเคียงขณะอัดด้วยแรงดันสูงๆ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินอ่อนมากๆ

การปรับปรุงดินโดยวิธีที่ใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมนี้ ได้มีการพัฒนาใช้ในประเทศไทยมาก่อนวิธีอื่นๆ เช่น ในโครงการของ Siam Syntech Company ใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดลึก โครงการลดการทรุดตัวและเพิ่มความแข็งแรงของดินบริเวณป้อมพระจุลของกรมอู่ทหารเรือ โครงการเพิ่มกำลังต้านทานของดินก่อสร้าง Molasse Tank ของบริษัท อายิโน๊ะโมะโต๊ะ จ. กำแพงเพชร เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 ชุดเครื่องมือและองค์ประกอบการทำ DMM

ภาพที่ 2.5 หัวเจาะแบบ Dry Mixing



ภาพที่ 2.6 ระบบ Slurry Jet Grouting

2. องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณภาพทางวิศวกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์

ทวี เกศิสำอาง, 2542 ได้กล่าวถึงการควบคุมคุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้มีมาตรฐานใกล้เคียงกัน ควรจะมีการพิจารณาองค์ประกอบบางประการ ดังต่อไปนี้

- ชนิดของดินที่ทำการปรับปรุง แร่ธาตุองค์ประกอบในดิน ความชื้น และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในการเลือกสารผสม

- ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้จะต้องสัมพันธ์กับระบบชนิดการปรับปรุงดินและชนิดของดินที่กล่าวในข้อแรก ทั้งนี้จะกำหนดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและการทำเสาเข็มทดสอบจริงในสนาม

- ชนิดของใบปั่นในระบบ Mechanical Mixing ต้องเหมาะสมที่จะปั่นดินให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับ Cement Slurry หรือ Cement ผง

- อัตราการหมุนและอัตราการยกขึ้นของหัวเจาะที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของเครื่องจักร ชนิดของดิน และกรรมวิธีการทำ เช่น การทำ Pre-Cut ก่อนการผสมซีเมนต์กับดิน อัตราการหมุนและอัตราการยกขึ้นของหัวเจาะจะได้จากการทดลองทำเสาเข็มทดสอบในสนามจริง

- แรงดันของ Cement Slurry หรือ Cement ผง หรือ น้ำ/อากาศ ใน Pre Cut โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ Slurry Jet Mixing ซึ่งจะมีผลต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มและการผสมให้เนื้อดินมีความสม่ำเสมออย่างมาก

3. การควบคุมคุณภาพและการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์

การดำเนินงานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ให้มีคุณภาพสม่ำเสมอตลอดทุกต้นและทุกความลึกของดินนั้นเป็นเรื่องที่กระทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากปัจจัยของสภาพดินในที่มักจะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบออกแบบเสาเข็มทั้งทางด้านส่วนผสมที่เหมาะสม ความยาวที่ถูกต้องตลอดจนการใช้และควบคุมเครื่องมือให้เหมาะสมกับพื้นที่

H. Ahanberg และคณะ, 1989 กล่าวว่า ในการออกแบบการปรับปรุงดินด้วยวิธี Lime Column จำเป็นต้องมีการควบคุมและทำนายความแข็งแรงและอัตราการเพิ่มกำลังอัดของเสาเข็ม โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Lime Column โดยทั่วไปจะได้มาจากการเก็บตัวอย่างไปทดสอบหาค่า Unconfined Compression Test ในห้องปฏิบัติการ

สำหรับกรมทางหลวงได้มีการร่างข้อกำหนดพิเศษที่ใช้ในการควบคุมสารผสม การทดลองหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม การทดลองทำต้นตัวอย่างและการควบคุมงานในสนามตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.1 สารผสม

สารผสมที่อนุญาตให้ใช้ได้มี 2 ประเภท คือ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก.15

3.1.2 ปูนขาว ประเภท Quick Lime ซึ่งมีปริมาณ Calcium Oxide (CaO) และ Magnesium Oxide (MgO) รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 , ค่า Ignition Loss ไม่มากกว่าร้อยละ 10, และขนาดเม็ดปูนขาวต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.425 mm. (#40) ร้อยละ 100

3.2 ขั้นตอนการเจาะสำรวจและการหาอัตราส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ

ก่อนทำการก่อสร้างต้องมีการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างแบบ Undisturbed Sample ในชั้นดินอ่อน และทดสอบหาค่า SPT-N Value ในชั้นดินแข็งๆ ทุกระยะ 500 m. ตามแนวถนน แล้วนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาค่า Atterberg Limits , Natural Moisture Content , Undrained Shear Strength , Sieve Analysis, Modulus of Elasticity จาก Unconfined Compression Test , Consolidation Test และหาปริมาณเกลือ Sodium Cheoride และ Organic Content แล้วจัดทำรายงานผลการทดสอบในรูป Boring Log รายงานผลการทรุดตัวของดินทั้งจากการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ และไม่มีการปรับปรุง โดยคิดจากข้อกำหนดความสูงคันทางที่กำหนด

ตัวอย่างดินที่เก็บได้ส่วนหนึ่งจะนำไปออกแบบหาอัตราส่วนผสมของซีเมนต์หรือปูนขาวกับดินเดิม โดยทำการทดลองผสมดินเดิมกับสารผสมดังส่วนผสมแนะนำดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6

อัตราส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ

สารผสม	ปริมาณสารผสมที่ใช้ (kg./m^3.ดินเดิม)				
	วิธีผสมเปียก				วิธีผสมแห้ง
ปูนขาว	75	100	150	200	150 – 250
ปูนซีเมนต์	125	150	200	250	200 – 300
ปูนขาวและปูนซีเมนต์	125	150	200	250	200 - 300

การผสมจะต้องทำไม่น้อยกว่า 15 ตัวอย่าง ต่อ 1 ชุดตัวอย่าง และนำมาทดสอบหาค่า Unconfined Compression Test, Modulus of Elasticity และ Unit Weight เมื่อบ่มตัวอย่างไว้ 1 วัน 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน ครั้งละไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง

สำหรับการเตรียมตัวอย่างนี้ วิธีการผสมของสารผสมต้องเป็นลักษณะเดียวกันกับการผสมที่จะใช้จริงในสนาม ถ้าวิธีการก่อสร้างเป็นแบบ Wet Mixing สารผสมจะต้องผสมกับน้ำตามอัตราส่วนที่ใช้จริงในสนามมาผสมกับดินเดิม หากเป็นแบบ Dry Mixing จะนำสารผสมมาผสมกับ

ดินเดิมโดยตรง และแบบในการเก็บตัวอย่างจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 30 mm. สูงไม่น้อยกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

การรายงานผลการทดสอบการผสมทดลองจะต้องแสดงถึง Natural Water Content ของดินก่อนผสมและหลังผสม, ค่า Undrained Shear Strength, Modulus of Elasticity , Unit Weight , ปริมาณของน้ำต่อ Cement ในกรณีผสมแบบ Wet Mixing , รูปแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณสารผสมกับค่า Undrained Shear Strength , ค่า Undrained Shear Strength กับระยะเวลาในการบ่ม เป็นต้น โดยการผสมทดลองทั้งหมดจะทำการทดสอบที่ระดับความลึกดินที่กำหนด ปกติมักจะทำประมาณ 3 ระดับความลึกตลอดความยาวของเสาเข็ม

3.3 การอนุมัติและทดสอบเครื่องจักร

ก่อนทำการก่อสร้างจะต้องมีการเสนอลักษณะของเครื่องจักรที่จะทำการก่อสร้างให้ตรวจสอบก่อน โดยเครื่องมือควรจะประกอบด้วยชุดเครื่องเจาะผสม, เครื่องจ่ายสารผสมและ Computer ควบคุมการทำงานซึ่งต้องมีรายงานการทำ Column แต่ละต้นให้ทราบทันทีที่ทำเสาเข็ม และจะต้องแสดงถึงความยาวหรือความลึกของ Column, ปริมาณสารผสมที่ถูกใช้ไปที่ความลึกต่างๆ, ระยะเวลาในการผสม เครื่องจักรที่กำหนดโดยทั่วไปควรมีคุณลักษณะดังนี้

3.3.1 เครื่องจักรแบบ Wet Mixing เครื่องจักรจะประกอบด้วย ถังเก็บสารผสม , ถังเก็บน้ำ , ปั๊มน้ำ เครื่องผสมและเครื่องกวนสารผสมกับน้ำให้เป็น Slurry , ท่อเหล็กในการลำเลียง Slurry เครื่องเจาะฉีดและกวนผสม Slurry ให้เข้ากับดิน รวมถึงอุปกรณ์ควบคุมและบันทึก ปริมาณสารผสมที่ใช้ , วัดแรงดันของ Slurry , วัดความเร็วของการหมุนกวนและการยกขึ้นลงของก้านเจาะ โดยก้านเจาะและท่อลำเลียง Slurry จะต้องเป็นท่อนเดียวยาวไม่น้อยกว่าความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่กำหนด ลักษณะของใบกวนผสม , อัตราความเร็วในการผสม , การฉีด Slurry และการยกขึ้นของก้านเจาะ จะต้องเหมาะสมที่จะกวนดินให้เป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอโดยการทดลองก่อสร้างจริงในสนาม ความข้นเหลวของ Slurry ที่ใช้ต้องกวนโดยเครื่องกวนสม่ำเสมอตามอัตราส่วนที่ได้ทำการผสมทดลองมา แต่ปริมาณสารผสมต่อน้ำต้องไม่เหลวเกินกว่า 1 : 1.5 และ Slurry ที่ผสมแล้วต้องใช้ให้หมดภายในสองชั่วโมง ยกเว้นจะใช้สารผสมเพิ่มที่ได้รับอนุมัติแล้ว ปั๊มน้ำสำหรับฉีด Slurry ลงไปผสมกับดินจะต้องเป็นปั๊มที่ฉีด Slurry ได้อย่างต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 100 ลิตรต่อนาที

3.3.2 เครื่องจักรแบบ Dry Mixing เครื่องจักรประกอบด้วย ถังสำหรับเก็บสารผสม , ปั๊มลม , เครื่องเจาะ และเครื่องกวนผสมที่มีใบผสมที่ปลายก้านเจาะ , อุปกรณ์วัดปริมาณสารผสมที่ใช้อุปกรณ์วัดความดันลม , อุปกรณ์ควบคุมและวัดความเร็วการหมุน การยกขึ้น-ลงของใบผสมแบบอัตโนมัติ โดยความเร็วในการหมุนเจาะผสมจะต้องไม่น้อยกว่า 140 รอบต่อนาที,

ลักษณะของใบผสม, อัตราเร็วในการเจาะผสม , อัตราเร็วในการยกก้านเจาะ และแรงดันของอากาศกับสารผสมจะต้องเหมาะสมที่จะกวนผสมดินให้เข้ากันสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว โดยต้องทำการทดลองก่อสร้างจริงในสนาม

4. การทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

หลังจากที่ได้รับอนุมัติให้ใช้เครื่องมือแล้ว จะต้องทำการทดสอบเครื่องจักรผสมจริงในสนามไม่น้อยกว่า 4 ต้น โดยมีการตรวจสอบหาขนาด, ความยาว, ความสม่ำเสมอในการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน, รูปร่างสม่ำเสมอตลอดความยาวและรับน้ำหนักได้ตามที่ออกแบบไว้ แต่ทั้งนี้ในการทำต้นตัวอย่างทดสอบมักจะทำมากกว่า 4 ต้น (1 ชุด ตัวอย่าง) โดยมักจะปรับเปลี่ยนปริมาณสารผสมต่อปริมาตรดิน หรือปรับอัตราความเร็วและอัตราการจ่ายสารผสมเพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

4.1 การทดสอบเสาเข็มทดลอง

เมื่อก่อสร้างเสาเข็มทดลองเสร็จแล้วจะทำการทดสอบต่างๆ ใน Column ทดลองที่ได้ทำในสนามดังนี้

4.1.1 การทดสอบหาขนาดของ Column การทดสอบเพื่อหาขนาดตลอดทั้งต้นของ Column สามารถทำได้ทั้งโดยการ Coring เก็บตัวอย่างตลอดความลึกจำนวนไม่น้อยกว่า 4 จุดใน Column ต้นทดลองหรือการดึง Column ขึ้นมาทั้งต้นเพื่อตรวจสอบการใช้ Non-Destructive Test เช่น Sonic Pulse เพื่อหาขนาดของ Column เป็นต้น ทั้งนี้อาจจะใช้วิธีการอื่นที่น่าเชื่อถือมาใช้ก็ได้

Seah, 2541 ได้ใช้วิธีการ Coring ในการตรวจสอบในโครงการวงแหวนรอบนอก (OBRR) บริเวณถนนสุขาภิบาล 3 ซึ่งใช้หัวเจาะทำจากประเทศญี่ปุ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 cm. โดยการเจาะทดสอบแนะนำให้ทำการเจาะที่บริเวณ 15 cm. จากจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม และในการเจาะควรระวังที่ไม่ให้มีการหนีศูนย์กลางมากนักเนื่องจากอาจจะทะลุออกไปด้านข้างของเสาเข็ม และการที่ไม่เจาะตรงศูนย์กลางเสาเพราะวัสดุที่กึ่งกลางเสาเป็นตำแหน่งเดียวกับก้านเจาะระหว่างทำการก่อสร้าง ซึ่งอาจจะไม่สามารถเป็นตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนได้

4.1.2 การทดสอบหาค่า Undrained Shear Strength ในการหา Undrained Shear Strength นั้นอาจจะทำได้โดยการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างจากเสาเข็มต้นทดลองขึ้นมาทำ Unconfined Compression Test ตามวิธีการ Coring การใช้แผ่นโลหะเพื่อเฉือน Column ให้ขาดตามแนวยาวของ Column , การหา Undrained Shear Strength แบบ Non-Destructive Test

เช่น การใช้ Sonic Pulse เพื่อตรวจสอบความแข็งแรง ซึ่งจำเป็นต้องมี Correlation ระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องมือกับค่า Undrained Shear Strength เป็นต้น

การทดสอบหาค่า Undrained Shear Strength จะต้องทำการทดสอบทุกระยะไม่มากกว่า 1.00 m. ตามความลึกของ Column โดยทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 3 วัน , 14 วัน หรือ 28 วัน โดยค่า Undrained Shear Strength ของ Column จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 150 kPa, 200 kPa และ 300 kPa ที่ 3 วัน , 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ (กรณีใดกรณีหนึ่ง) ให้ถือว่าใช้ได้ แต่ค่า Undrained Shear Strength ที่ 28 วัน จะต้องไม่น้อยกว่า 300 kPa จึงถือว่าใช้ได้ เป็นต้น

4.1.3 การทดสอบ Pile Load Test เป็นการทดสอบเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกของ Column ที่สามารถบรรทุกได้และเป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของเนื้อเสาเข็มด้วย ซึ่งถ้าหากเนื้อเสาเข็มไม่สม่ำเสมอ การทรุดตัวก็อาจจะเกิดมากกว่าปกติ โดยน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบจะขึ้นกับหน้าตัดเสาเข็มและการออกแบบเสาตามสภาพชั้นดิน เช่น ทางสายกรุงเทพฯ – ชลบุรี ใช้หน้าตัดเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 cm. ได้กำหนดให้ทดสอบการรับน้ำหนักที่ 20 T. เมื่อการทรุดตัวที่หัว Column เท่ากับ 10% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง Column กำหนดให้ทดสอบจำนวน 1 ต้นตัวอย่างเสาเข็มทดลอง เป็นต้น

- การตรวจสอบความสม่ำเสมอของเสาเข็มดินซีเมนต์ การตรวจสอบเพื่อทดสอบความสม่ำเสมอในการผสม , ขนาดและรูปร่างของ Column ทดลองที่ได้ก่อสร้างไว้ ทดสอบโดยการดึง Column ต้นทดลองเมื่ออายุครบกำหนดขึ้นมาทั้งต้น โดยจะต้องไม่ทำให้ Column ต้นทดสอบแตกหักเสียหาย และเมื่อดึงขึ้นมาแล้วให้ตัด Column ออกเป็นชิ้นๆ ตามขวางยาวไม่เกินชิ้นละ 50 cm. เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอในการผสมตลอดความยาวของ Column และให้ทำการตรวจสอบขนาดรูปร่างของ Column ตลอดทั้งต้น การดึงต้นตัวอย่างอาจจะทำได้โดยการขุดรอบๆ Column เพื่อลงไปดูขนาด , รูปร่าง และตัดขึ้นมาเป็นชิ้นๆ หรือวิธีใดก็ได้ที่ได้รับการอนุมัติ

Seah, 2541 กล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในโครงการวงแหวนรอบนอกด้านตะวันออก (OBRR) บริเวณถนนสุขาภิบาล 3 ว่าได้ทำการดึงต้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 m. โดยการกด Casing ขนาด 0.80 m. (ของโครงการถนน กรุงเทพฯ – ชลบุรี (สายใหม่) ตอน 1B ใช้ขนาด 0.90 m.) ที่ปลายมีบานเปิด – ปิด ไปจนถึงระดับปลาย Casing ต่ำกว่าปลาย Column ที่ต้องการยกประมาณ 1.0 m. จากนั้นกดหัวเจาะลงไปข้าง Casing พร้อมฉีดน้ำจนถึงปลาย Casing เพื่อให้ดินหลวม ทำการดึงลวดเพื่อปิดบาน เปิด – ปิด ที่ปลาย Casing และทำการยก Casing ที่มีเสาเข็มอยู่ภายในขึ้นมาจากดิน และทำการดันตัวอย่าง Column ออกมาจาก Casing แล้วล้างดินข้างๆ ออกแล้วทำการตรวจสอบตามข้อกำหนด

นอกจากนี้ การดึงต้นตัวอย่างขึ้นมาในโครงการบางแห่งได้ใช้เหล็ก H-Beam ฝังลงไปใน Column หลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จ เมื่อ Column ได้อายุที่ต้องการแล้วจึงทำการดึงขึ้น โดยอาจใช้หัวเจาะลงไปฉีดน้ำรอบๆ เสาเข็มก่อนแล้วจึงทำการดึงเสาเข็มทดลองขึ้น ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำง่าย , สะดวก และค่าใช้จ่ายน้อย แต่อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่เสาเข็มต้นทดลองขณะดึงขึ้นได้ และเมื่อนำต้นตัวอย่างขึ้นมาไม่สามารถตัดเป็นชิ้นๆ ตามขวางได้ การตรวจสอบ Column ระหว่างการก่อสร้าง การตรวจสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ระหว่างการก่อสร้างเพื่อการควบคุมคุณภาพของ Column ให้สม่ำเสมอ โดยในระหว่างการทำงานผู้ควบคุมงานจำเป็นต้องตรวจสอบถึงปริมาณสารผสมที่ใช้ผสมจริงในเสาเข็มแต่ละต้น, ระยะเวลาในการผสม, อัตราการหมุนและแรงดันที่ใช้ เป็นต้น ทั้งนี้จะตรวจสอบจาก Computer Printout ซึ่งจำเป็นจะต้องติดตั้งไว้ทุกชุดเครื่องมือเจาะ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะบอกถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมือ เช่น เครื่องเจาะเสียหรือหัวจ่ายปูนอุดตัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องมีการทดสอบแบบสุ่มตัวอย่างสำหรับ Column ที่ทำการก่อสร้างโดย

- ทดสอบหาค่า Undrained Shear Strength ของ Column จำนวน 1 ต้นต่อ Column ทุกๆ สามพันต้น

- ทดสอบหาขนาดของ Column จำนวน 1 ต้นต่อ Column ทุกๆ สามพันต้น

ทั้งนี้หากการทำ Routine Test มีปัญหา เช่น ขนาดของ Column หรือค่า Undrained Shear Strength ไม่ได้ตามที่กำหนด อาจจะให้มีการทดสอบ Pile Load Test หรือ ดึงต้นตัวอย่างขึ้นมาทดสอบได้ โดยความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในโครงการก่อสร้างสายบางนา-บางปะกง ที่กรมทางหลวงกำหนด เป็นต้น

- เส้นผ่านศูนย์กลางของ Column ต้องไม่น้อยกว่า 95% ของที่ได้ออกแบบไว้

- Undrained Shear Strength ไม่น้อยกว่าที่กำหนด หรือเมื่อทดสอบ Pile Load Test แล้วได้ Pile Load ไม่น้อยกว่า 200 kN เมื่อเกิดการทรุดตัวที่หัว Column เท่ากับ 10% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง Column

- ความเบี่ยงเบนจากแนวดิ่งของ Column ต้องไม่มากกว่า 1%

- ตำแหน่งและระยะห่างระหว่าง Column เบี่ยงเบนไปจากแบบที่กำหนดไม่เกิน 100 mm. ในทิศทางหนึ่งๆ