แห้งจนทำให้ปริมาณเพสต์ ไม่มากพอแทรกอยู่ตามช่องว่างของมวลรวมได้เต็ม (ACI Comittee 207, 1983)

เนื่องจาก RCC เป็นวัสดุคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำค่อนข้างต่ำ และมีความข้นสูง มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับวัสดุจำพวกดินในขณะที่เป็นคอนกรีตสด และเมื่อแข็งตัวก็จะเหมือนกับคอนกรีตปกติ ดังนั้นขบวนการในการขนส่ง และบดอัดของ RCC ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับงานดินทั่วไปในการก่อสร้างเขื่อน เมื่อพิจารณาในด้านโครงสร้างแล้วไม่จำเป็นจะต้องใช้วัสดุที่มีกำลังสูง เพราะฉะนั้นจึงมีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุผสม RCC อย่างแพร่หลายในงานการก่อสร้างเขื่อน (June and Mass,1980) ซึ่งจะใช้ช่วยลดปริมาณความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของ RCC ให้ดีขึ้นอีกด้วย

2.2 การใช้ RCC ในต่างประเทศ

RCC ได้ถูกคิดค้นพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่าย และลดระยะเวลาในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต "การพัฒนาการก่อสร้างเขื่อนโดยใช้ RCC ได้เริ่มเมื่อปี ค.ศ.1960 ที่เขื่อนเอลป์เกียร์ (Alpe Gere Dam) ในประเทศอิตาลี คอนกรีตถูกเทโดยใช้รถดัน (Dozer) และทำให้แน่นโดยใช้เครื่องสั่นสะเทือนแบบจุ่ม และต่อมาในปีเดียวกันที่เขื่อนแมนิคูแกน 1 (Manicougan I Dam) ในประเทศแคนนาดา แกนกลางของเขื่อนใช้คอนกรีต ซึ่งเทโดยใช้รถดันและทำให้แน่นโดยใช้เครื่องสั่นสะเทือนแบบจุ่ม" ในช่วง ค.ศ.1960 - ค.ศ.1969 RCC ถูกเรียกว่า โรลกรีต (Rollcrete) ซึ่งใช้หินลูกรัง เป็นมวลรวม และได้นำไปใช้ในการก่อสร้างทานบชั่วคราว (Coffer Dam) ของเขื่อนชีเมน (Shimen Dam) ในประเทศไต้หวันในปี ค.ศ.1960 (Lowe และ John, 1962) และใช้ก่อสร้างฐานรากรองรับท่อระบายน้ำออก (Outlet Conduit) ของเขื่อนโคชิติ(Cochiti) ในประเทศแมกซิโกในปี ค.ศ.1960 (Catanach และ McDaniel, 1971)

ในการประชุมทางวิชาการ เรื่องการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตในปี ค.ศ. 1970 ราฟาแอล (Raphael) ได้เสนอบทความเรื่อง The Optimum

บทที่ 2

วรรณคดีวิจารณ์

2.1 คำนำ

สถาบันคอนกรีตแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (ACI)ได้ให้นิยามของคำว่า "Roller Compaction" และ "Roller Compacted Concrete" ไว้ว่า

Roller Compaction คือขบวนการบดคอนกรีตโดยใช้ลูกกลิ้ง (Roller) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหมายถึงรถบดถนนชนิดสั่นสะเทือน (Vibratory Roller)

Roller Compacted Concrete คือ คอนกรีตที่ถูกบดอัดโดยขบวนการบดอัดโดยลูกกลิ้ง และเป็นคอนกรีตที่สามารถรองรับน้ำหนักของเครื่องมือบดอัดได้ ในขณะยังอยู่ในสภาพที่ไม่แข็งตัว (Unhardened State)

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยใช้ Roller Compacted Concrete(RCC) จะมีวิธีการทำงานที่คล้ายคลึงกับวิธีการทำงานของดิน-ซีเมนต์ และใช้เครื่องจักรกลประเภทเดียวกัน เนื่องจากปฏิภาคส่วนผสมของ RCC อยู่ในช่วงที่กว้างมาก ดังนั้นการควบคุมคุณสมบัติของ RCC ให้ได้ตามต้องการขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น คุณภาพของวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสม ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน คุณภาพของวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสม ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน ระดับของการบดอัด (Degree of Compaction) การควบคุมคุณภาพระหว่างการผสมและ การก่อสร้าง

ถ้าเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากับ RCC แล้ว ส่วนผสมของ RCC จะปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า และข้อกำหนดเกี่ยวกับขนาดคละของมวลรวมไม่เข้มงวดเหมือนกับคอนกรีตปกติ เนื่องจากการบดอัด RCC จะใช้เครื่องจักรหนักตัวอย่าง เช่น รถบดอัดล้อเหล็กแบบสั่นสะเทือน เพราะฉะนั้น RCC จำเป็นต้องแห้งเพียงพอที่จะรับน้ำหนักเครื่องจักรเหล่านี้ ในขณะเดียวกันก็จะต้องไม่

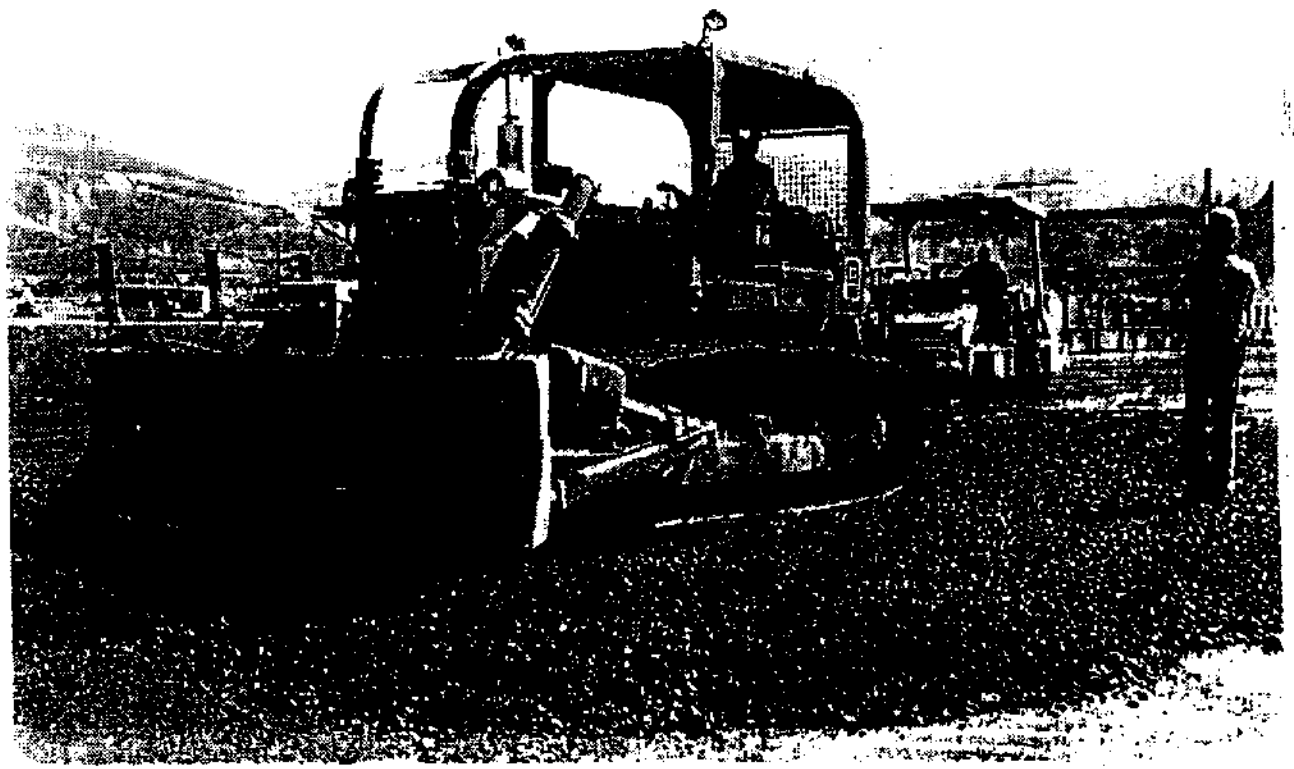
Gravity Dam (Raphael, 1971) ซึ่งได้กล่าวเกี่ยวกับการนำเอกหลักการทำงานของดิน-ซีเมนต์มาประยุกต์ใช้กับการก่อสร้างแกนกลางของเขื่อน "โดยใช้กรวด หรือหินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์ และนำเอาเครื่องจักรกลต่าง ๆ ที่ใช้ในงานดิน-ซีเมนต์มาใช้กับวัสดุดังกล่าว การนำวัสดุซีเมนต์มาใช้เป็นส่วนผสม เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ มีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของเขื่อนมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับเขื่อนดิน นอกจากนี้ยังลดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาลงได้มากเมื่อเปรียบเทียบการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต "

ในปี ค.ศ.1972 Cannon (1972) ได้บรรยายเกี่ยวกับการทดลองใช้คอนกรีตหยาบที่มีการควบคุมขนาดคละของมวลรวม เป็นวัสดุในการก่อสร้างเขื่อนทิมส์ฟอร์ด (Tims Ford Dam) การทำงานใช้รถบรรทุกเทท้ายในการขนส่ง ใช้รถตัก (Front-End-Loader) ในการเกลี่ยคอนกรีต และใช้รถบดถนนชนิดสั่นสะเทือนในการบดอัด ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ,2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ในปี ค.ศ.1972 และ 1973 ได้มีการทดลองใช้ RCC เป็นวัสดุในการก่อสร้างเขื่อนแจคสัน (Jackson Dam) เขื่อนมิสซิซิปปี (Mississippi Dam) (Tynes, 1973) และเขื่อนครีก (Creek Dam) ที่มลรัฐโอเรกอน (Oregon State) ประเทศสหรัฐอเมริกา (Hall และ Houghton, 1974)

ระหว่างต้นปี ค.ศ.1974 จนถึงปี ค.ศ.1982 ได้มีการใช้ RCC ปริมาณ 3.3 ล้านลูกบาศก์หลาในการก่อสร้างเขื่อนทาร์เบลา (Tarbela Dam) ที่ประเทศปากีสถาน เพื่อทดแทนส่วนที่เป็นหินและแกนเขื่อน เนื่องมาจากอุโมงค์ระบายน้ำออก (Outlet Tunnel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 ฟุตอุโมงค์หนึ่งเกิดการพังทลาย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.4 และ 2.5 นอกจากนี้ได้มีการซ่อมแซมส่วนอื่น ๆ เพิ่มเติมอีก ได้แก่ ทางระบายน้ำล้นฉุกเฉิน (Auxiliary Spillway) ทางระบายน้ำล้น (Service Spillway) อ่างน้ำนิ่ง (Stilling Basin) และทำนบชั่วคราว (Coffer dam) RCC ปริมาณ 460,000 ลูกบาศก์หลา ถูกใช้ในการซ่อมแซมอุโมงค์ซึ่งใช้เวลา 42 วัน คิดเป็น RCC ที่ใช้โดยเฉลี่ย 10,950 ลูกบาศก์หลาต่อวัน นอกจากนี้บริเวณที่อยู่ข้างทางระบายน้ำล้น ซึ่งต้องรองรับการไหลของน้ำอย่างรุนแรงได้ก่อสร้างโดยใช้ RCC โดยไม่มีการป้องกันผิวหน้า และไม่พบว่ามีร่องรอยของการ

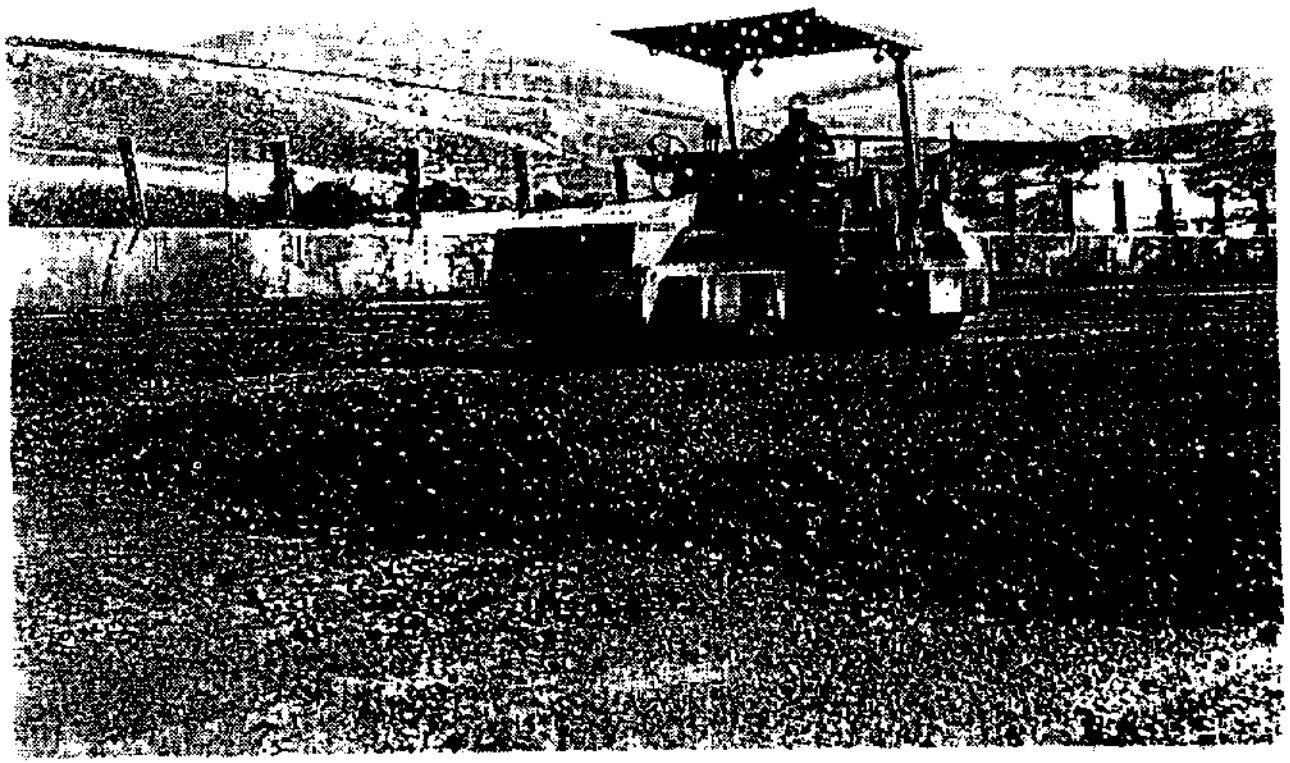
ภาพที่ 2.1 การขนส่ง RCC มาเทที่บริเวณก่อสร้าง โดยใช้รถบรรทุกเทท้าย

(Cannon และ Robert, 1972)



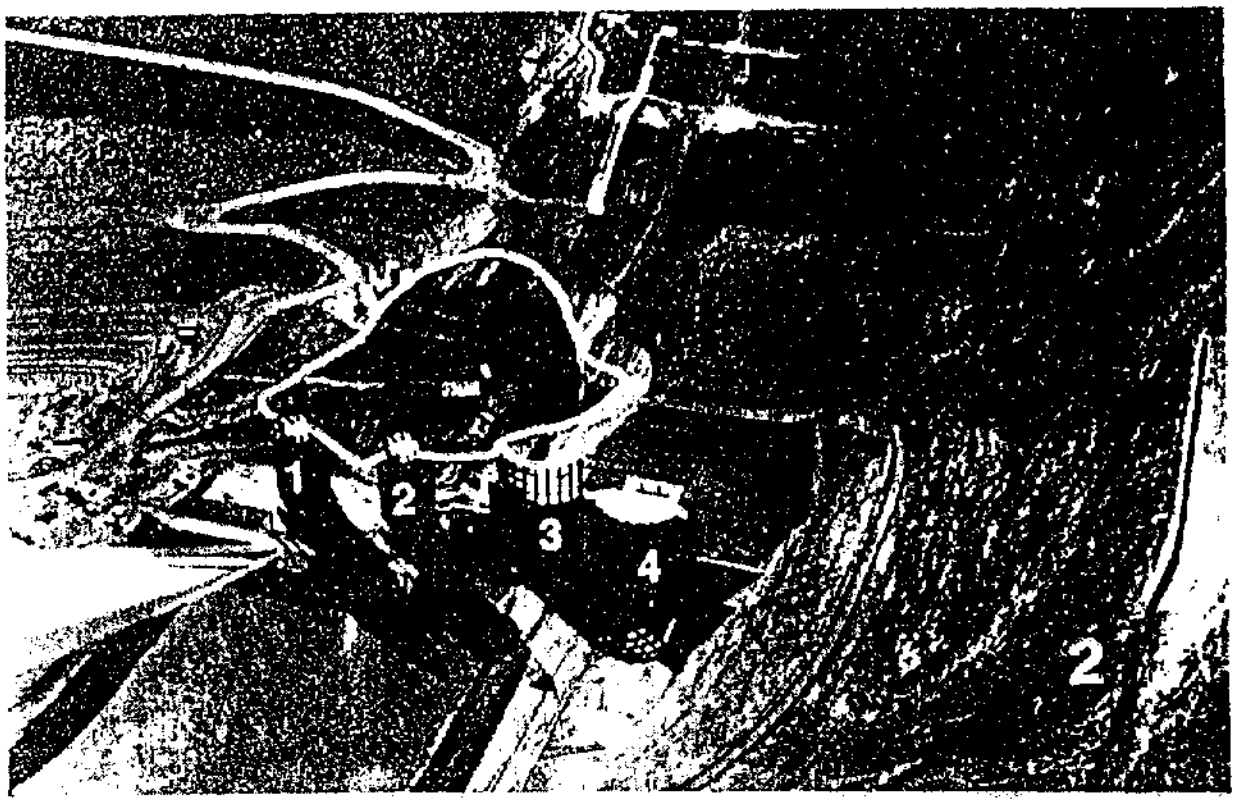
ภาพที่ 2.2 การเกลี่ย RCC โดยใช้รถดันดินตะขาบ

(Cannon และ Robert, 1972)

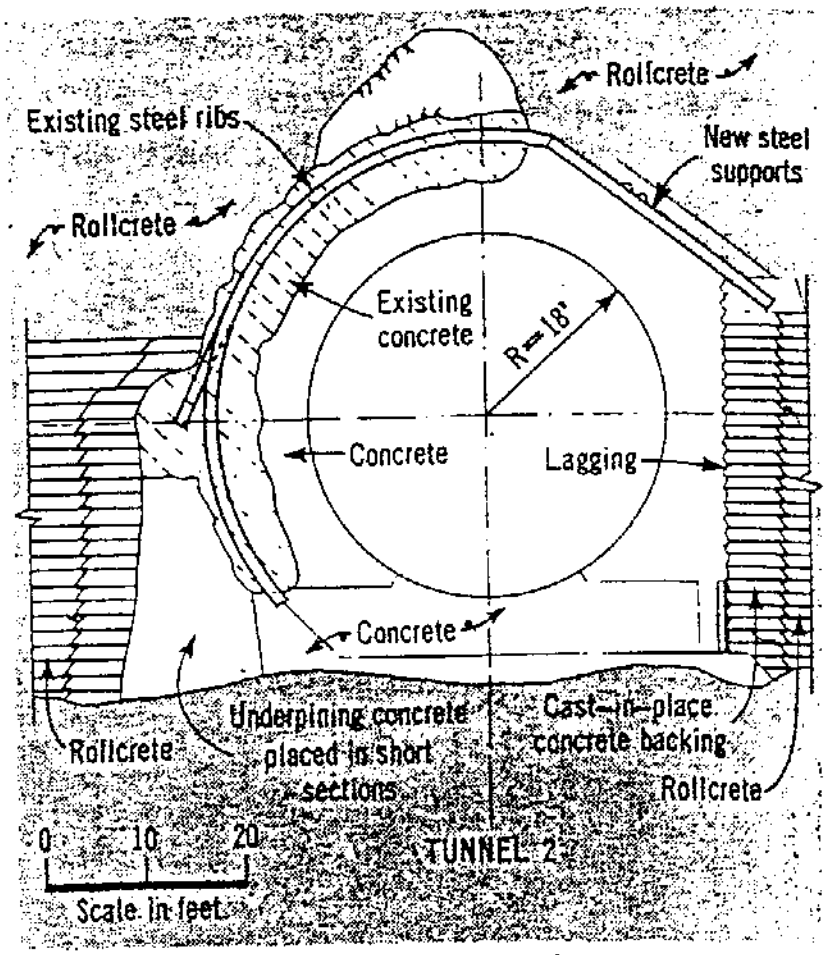


ภาพที่ 2.3 การบดอัด RCC โดยใช้รถบดถนนล้อเหล็กชนิดสั่นสะเทือน

(Cannon และ Robert, 1972)



ภาพที่ 2.4 แสดงบริเวณรอบเขื่อนทาเบลา พื้นที่ภายในเส้นที่วงไว้เป็นบริเวณที่ถูกน้ำเซาะจนทำให้อุโมงค์หมายเลข 2 เกิดการพังทลาย (Chao และ Paul, 1980)



ภาพที่ 2.5 รูปตัดของอุโมงค์หมายเลข 2 ที่ได้รับการซ่อมแซมแล้ว แสดงให้เห็นฐานรากของอุโมงค์ที่ทำจาก RCC (Chao และ Paul, 1980)

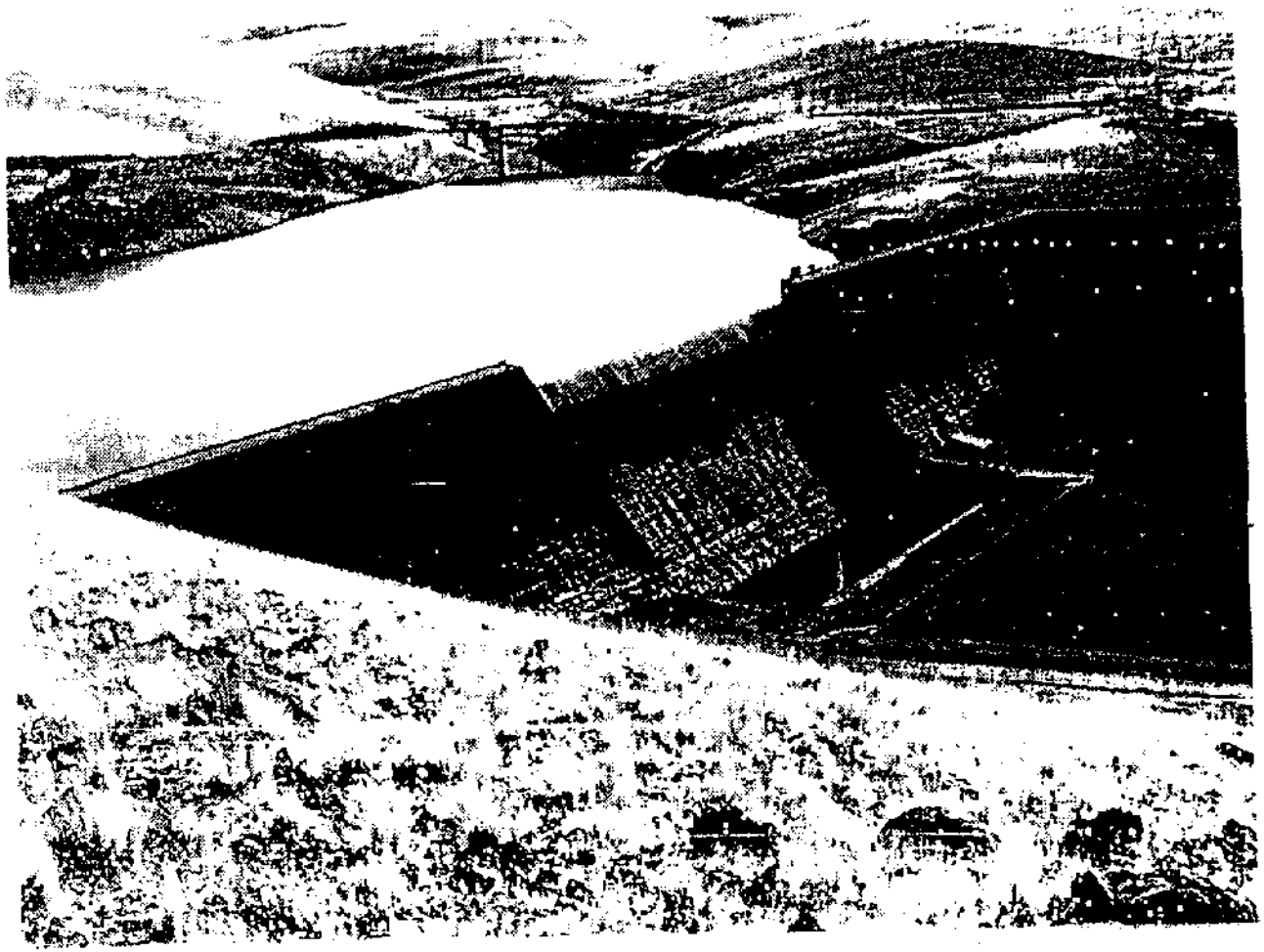
กัดกร่อนเกิดขึ้น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RCC มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี (Chao และ Paul, 1980)

โครงการที่นำเอา RCC มาใช้อย่างมีประสิทธภาพเริ่มในปี ค.ศ.1976 ที่โรงงานพลังงานนิวเคลียร์ ทีวีเอ เบลเลฟอนเต (TVA's Bellefonte Nuclear Plant)ในประเทศสหรัฐอมเมริกา RCC จำนวน 8000 ลูกบาศก์หลา ใช้เพื่อเพิ่มความสูงของฐานรองรับใต้ตึกเทอร์ไบน์ขึ้นอีก 10 ฟุต (Cannon, 1977) ระหว่างปี ค.ศ.1978 - ค.ศ.1980 USCE (U.S.Corps of Engineers) ได้ใช้ RCC ในการก่อสร้างทางน้ำหลาก (Flood Way) ที่ติดต่อกับแม่น้ำทานานา (Tanana River) ในมลรัฐอลาสกา

"จากการศึกษาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ.1974 USBE ได้ออกแบบให้ RCC เป็นทางเลือกทางหนึ่งเพื่อใช้ก่อสร้างเขื่อน ซินเทลแคนยอน (Zintel Canyon Dam) ซึ่งตั้งอยู่ใกล้ ๆ กับเมืองเคนเนวิค (Kennewick) มลรัฐวอชิงตัน (Washington) ในความพยายามที่จะลดค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างเขื่อนซินเทลแคนยอน และพบว่าสามารถที่จะลดขนาดของเขื่อนหินทิ้ง (Rock Fill Dam) โดยเปลี่ยนแปลงบริเวณหน้าเขื่อนจากเดิมที่ลาดลงให้เป็นตั้งตรงเช่นเดียวกับเขื่อนคอนกรีต (Sivley ,1976 และ Schrader,1977) ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาด้านเงินทุน จนไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างเขื่อนซินเทลแคนยอนได้ แต่แนวความคิดต่าง ๆ ที่วางไว้ก็ถูกนำไปใช้กับเขื่อนวิลโลว ครีก (Willow Creek Dam) ในมลรัฐโอเรกอน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.7 และ 2.8 ซึ่งก่อสร้างเสร็จในปี ค.ศ.1982 นับว่าเป็นเขื่อนตัวแรกในโลก ซึ่งใช้ RCC เป็นวัสดุเกือบทั้งหมด เขื่อนวิลโลว ครีก มีความสูง 169 ฟุต ใช้ RCC มากกว่า 430,000 ลูกบาศก์หลา ภายในระยะเวลา 5 เดือน คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 22 ดอลล่าร์ต่อลูกบาศ์หลา"

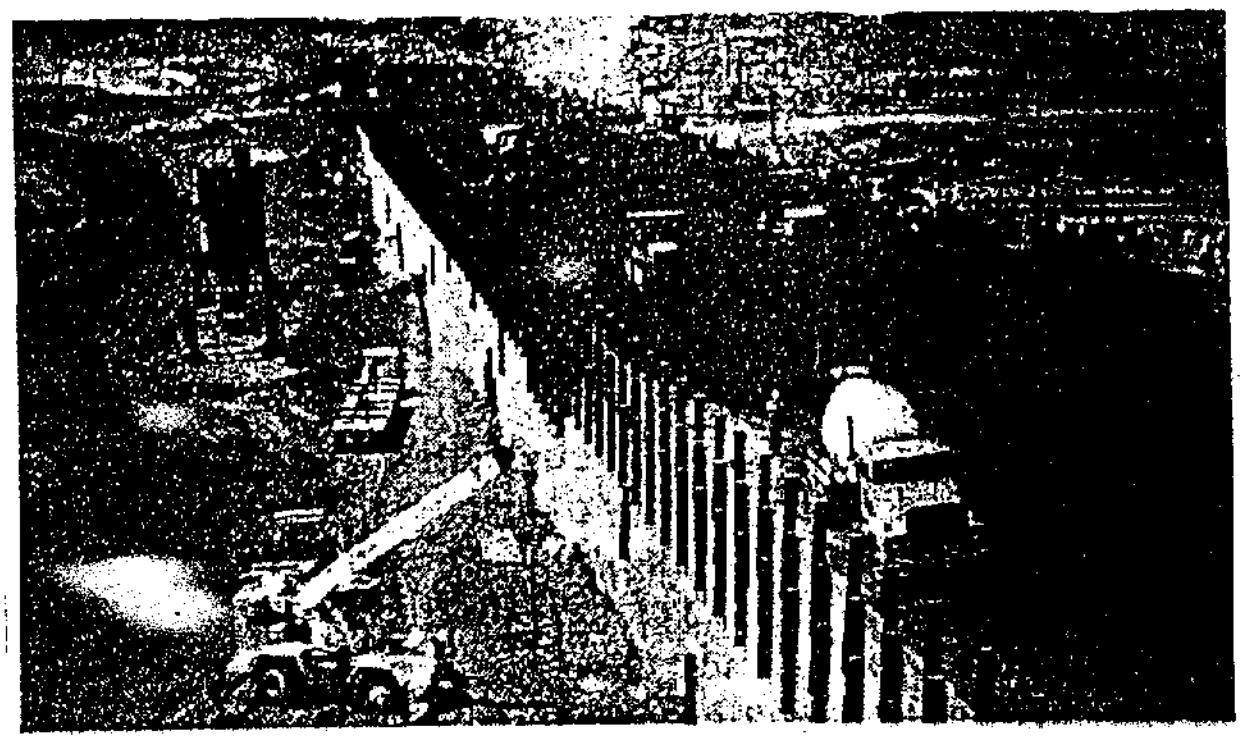
ที่ประเทศอังกฤษ มหาวิทยาลัยนิวคาสเซิลอัพพอนไทน์ (University of Newcastle-upon-Tyne) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ RCC ในช่วงปี ค.ศ. 1971 - ค.ศ.1977 และได้ผลการวิจัยที่น่าสนใจเป็นจำนวนมาก (Price, 1977) ช่วงปลายทศวรรษที่ 1970 มีการก่อตั้งองค์การเซ้าท์เวสต์ วอเตอร์ (Southwest Water Authority) เพื่อทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำเอา

ภาพที่ 2.6 บริเวณข้าง ๆ ทางน้ำล้น ซึ่งก่อสร้างจาก RCC และไม่มีการป้องกันผิวหน้าด้วยวัสดุใด ๆ (Chao และ Paul, 1980)



ภาพที่ 2.7 เขื่อนวิลโลว ครีก ซึ่งเป็นเขื่อน RCC ตัวแรกของโลก

(Schrader, 1984)



ภาพที่ 2.8 เชื่อมวิลรัล ครีก ขณะอยู่ระหว่างการก่อสร้าง

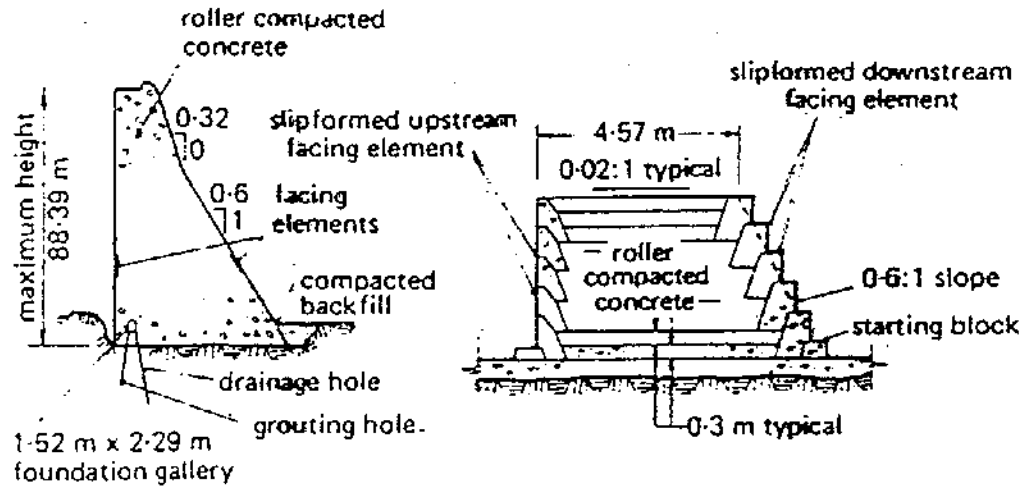
(Schrader, 1984)

ขี้เถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุผสมของRCC ภายใต้การสนับสนุนของสมาคมคอนสตรัคชัน อินดัสทรี รีเสิรช แอน อินฟอร์เมชัน (Construction Industry Research and Information, CIRIA) (Dunstan, 1981) นอกจากการวิจัยในห้องปฏิบัติการแล้ว ได้มีการทดลองสร้างแบบจำลองของเขื่อนที่มีหน้าตัดขนาดต่าง ๆ ที่โรงบำบัดน้ำเสีย (Tamar Treatment Works) เมืองคอร์นวอลล์ (Cornwall) ประเทศอังกฤษในปี ค.ศ.1976 (Dunstan, 1977) และแบบจำลองของเขื่อนที่มีหน้าตัดขนาดเท่าของจริง ที่เขื่อนวิมเบิลบอลล์ (Wimbleball Dam) ประเทศอังกฤษในปี ค.ศ.1979 (Dunstan,1981)

จากผลการวิจัยต่าง ๆ ของ USBR(U.S. Bureau of Reclamation , USBR) ได้นำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบเขื่อนอัปเปอรร์ สติลส์วอเตอร์ (Upper Stillwater Dam) ที่มลรัฐยูทา (Utah) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.9 (Oliverson และ Richardson,1984) ซึ่งเป็นเขื่อนที่มีความสูง 296 ฟุต สร้างเสร็จในปี ค.ศ. 1987 โดยใช้ RCC จำนวน 1.47 ล้านลูกบาศก์หลา

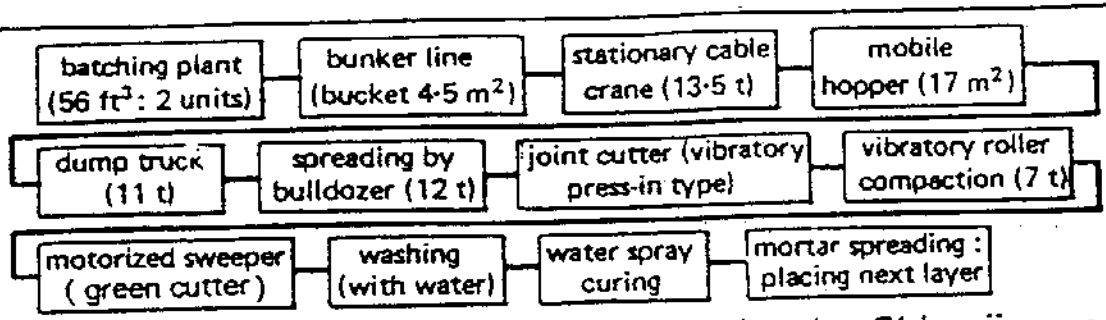
ในประเทศญี่ปุ่น การวิจัยเพื่อนำ RCC ไปใช้กับเขื่อน ได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1974 ประเทศญี่ปุ่นเรียกการก่อสร้างเขื่อนโดยวิธีนี้ว่า Rolled Concrete Dam , RCD (Hirose และ Yanagida , 1984) โดยได้นำไปใช้กับโครงสร้างหลักของเขื่อนชิมาจิกาวา (Shimajigawa Dam) ในปี ค.ศ.1978 และฐานรากของเขื่อนโอกาวา (Ohkawa Dam) ในปี ค.ศ. 1979 การก่อสร้างใช้ RCC หนาชั้นละ 70 ซม. หรือมากกว่า โดยแต่ละชั้นหลักแบ่งออกเป็นชั้นย่อย 3 ถึง 5 ชั้น แต่ละชั้นหลักจะถูกทำให้ยึดติดกัน โดยการพ้นมอร์ตาร์สงบนผิวหน้าของชั้นเดิมก่อนที่จะเริ่มงานในชั้นต่อไป นอกจากนี้ RCC ยังถูกนำไปใช้เพื่อก่อสร้างโครงสร้างหลักของเขื่อนในประเทศญี่ปุ่นอีกหลายเขื่อน ภาพที่ 2.10 และ 2.11 แสดงวิธีการและขั้นตอนของการก่อสร้างเขื่อนชิมาจิกาวา และเขื่อนทามากาวา (Tamagawa Dam)

จากจุดนี้การใช้ RCC เป็นวัสดุได้เป็นที่นิยมแพร่หลายหลายอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะที่ประเทศ บราซิล เวเนซูเอลา ฝรั่งเศส ออสเตรเลีย อัฟริกาใต้ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา รวมทั้งประเทศไทย RCC ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างต่าง ๆ มากมายโดยมีแนวความคิดการออกแบบ และวิธีการก่อสร้าง

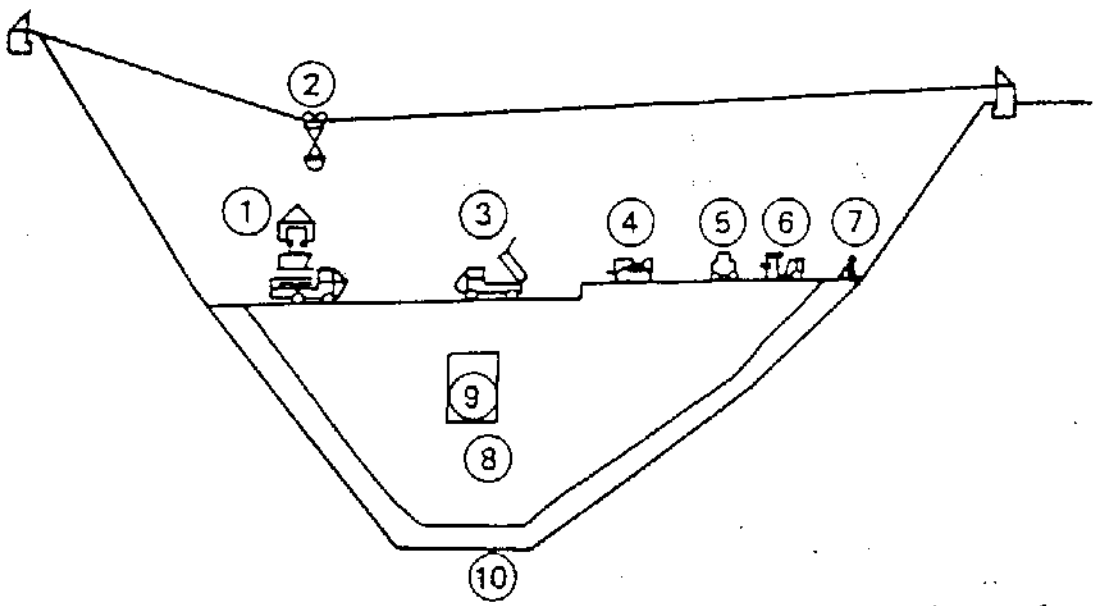


ภาพที่ 2.9 รูปตัดของเขื่อนอัปเปอร์ สติลล์วอเทอร์

(Oliverson และ Richardson, 1984)

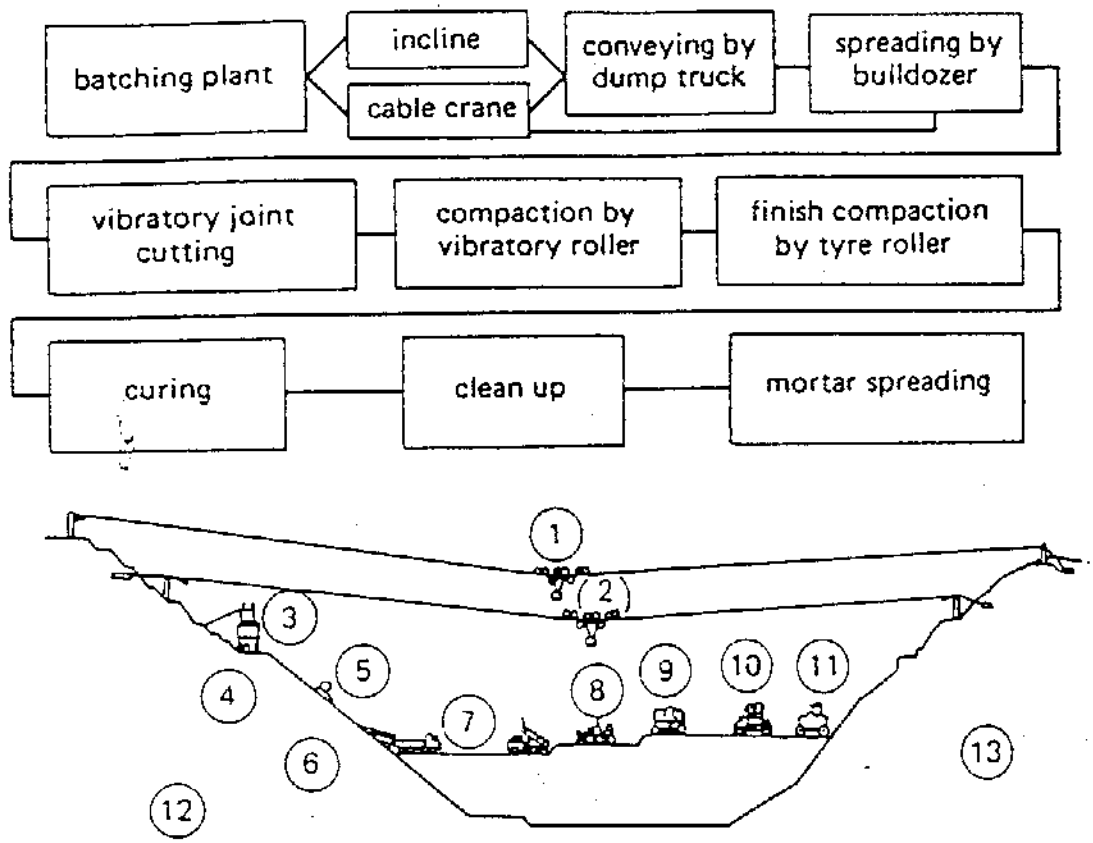


Concrete placement flow chart for the Shimajigawa dam.



Arrangement of concrete placing process, where: 1 = concrete bucket; 2 = stationary cable crane; 3 = dump truck; 4 = bulldozer; 5 = vibratory roller; 6 = vibratory joint cutter; 7 = manual consolidation (by vibrator); 8 = Mix A (upstream and downstream face concretes); 9 = Mix B (internal concrete); 10 = Mix C (concrete around structures); and 11 = Mix D (rock contacting concrete).

ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเขื่อนชิมาจิกาวา ที่ประเทศญี่ปุ่น (Oliverson และ Richardson, 1984)



Sequence of r.c.d. placement, where: 1 = 9.5 t cable crane; 2 = 20 t cable crane; 3 = batching plant; 4 = transfer car; 5 = bucket car; 6 = incline facility; 7 = dump truck; 8 = bulldozer; 9 = vibratory joint cutter; 10 = vibratory roller; 11 = tyred roller; 12 = right abutment; and, 13 = left abutment.

ภาพที่ 2.11 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเขื่อนทามากาวา ที่ประเทศญี่ปุ่น

(Oliverson และ Richardson, 1984)

ที่แตกต่างกันไป

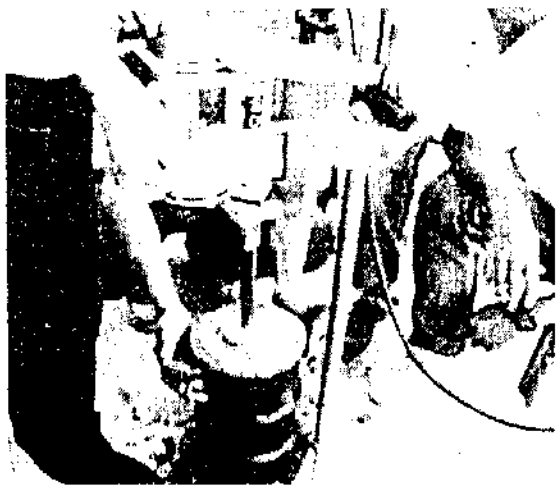
2.3 การใช้ RCC ในประเทศไทย

ในเดือนมีนาคม 2536 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้มีการนำเอาเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะจำนวน 50 ตัน ไปยังโครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนปากมูล อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี ต่อมาได้มีการทดลองในห้องปฏิบัติการสนามในระหว่างเดือน มีนาคม -เมษายน 2536 (ภาพที่ 2.12) โดยทดลองปรับเปลี่ยนส่วนผสมของคอนกรีตบดอัดในห้องปฏิบัติการสนามที่โครงการปากมูล รวม 41 การทดลอง (ตารางที่ 2.1) เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับบดผสม เถ้าลอยลิกไนต์ กับซีเมนต์และกรวดทรายที่จะใช้ในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตด้วยวิธีบดอัด ซึ่งกฟผ.ได้เลือกเป็นวิธีการก่อสร้างที่จะนำมาใช้ทำตัวเขื่อนปิดทางน้ำส่วนสุดท้าย (Closure Dam) ซึ่งมีขนาด 45,000 ลบ.ม. เมื่อได้ส่วนผสมที่เหมาะสมจากห้องปฏิบัติการแล้ว กฟผ.ได้นำส่วนผสมดังกล่าวไปทดลองบดอัดคอนกรีตในแปลงทดลอง 2 แปลงซึ่งมีขนาด 9x20 ตร.ม. และขนาด 9x10 ตร.ม. ที่บริเวณหัวงานก่อสร้างเขื่อนปากมูลในเดือนพฤษภาคม 2536 และเดือนมิถุนายน 2536 (ภาพที่ 2.13) โดยใช้อุปกรณ์ส่วนใหญ่ในงานทดลองบดอัดคอนกรีตเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการบดอัดดินทั่วไป ได้แก่ รถดันดินตะขาบ รถบดแบบสั่นสะเทือน ส่วนผสมที่ทาง กฟผ.ได้เลือกไปใช้ในงานก่อสร้างจริงคือส่วนผสม VN-15/B (สมชัย,2537)

2.3.1 ลำดับขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่โครงการก่อสร้างเขื่อนปากมูล

1. ในขั้นต้นจะคัดเลือกเถ้าลอยที่เหมาะสม โดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย เมื่อควบคุมปริมาณ SO_3 ไม่ให้เกิน 5% โดยน้ำหนัก การตรวจสอบจะกระทำโดยสุ่มเก็บตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์ วันละ 2 ครั้งในช่วงเช้าและช่วงบ่าย ซึ่งผลการทดลองจะทราบได้ภายในเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง เถ้าลอยที่ผ่านเกณฑ์คัดเลือกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 9 และ 10 จะถูกบรรจุลงในถุงขนาดความจุ 800 กก.และขนส่งจากลำปางในปริมาณวันละ

ก. คอนกรีตแห้งเมื่อผสมเสร็จมีลักษณะร่วนซึ่นเหมือนหินคลุกก่อนบดอัด



ข. บดอัดด้วยเครื่องสั่นสะเทือน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นละเท่าๆกัน

ค. สามารถถอดแบบได้ทันทีโดยไม่ชุบตัวเมื่อบดอัดเสร็จ

ภาพที่ 2.12 การทดลองการบดอัดคอนกรีตครั้งแรกในห้องปฏิบัติการที่โครงการปากมูล (24 มี.ค. 2536) (สมชัย, 2536)

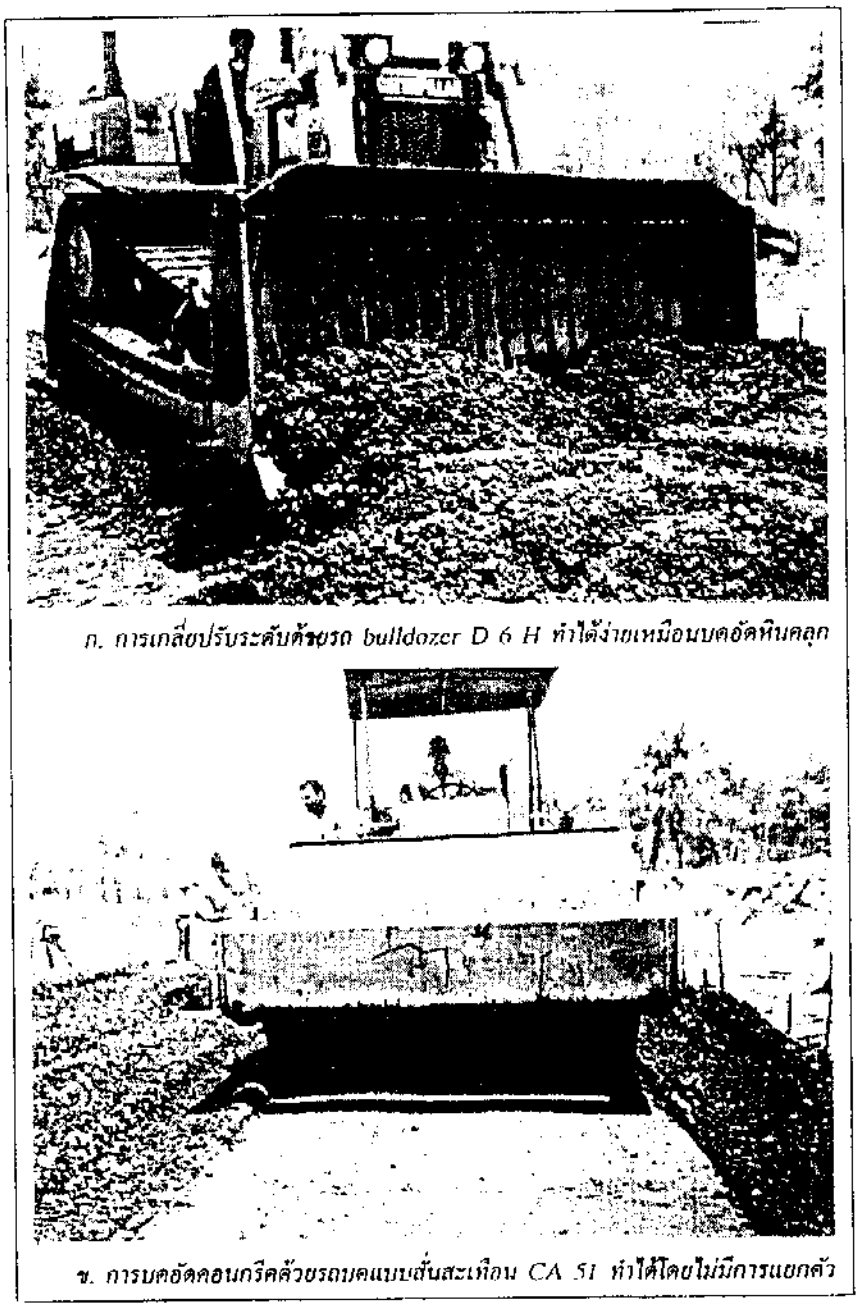
วท
TA
6647
ท 60393

หอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตารางที่ 2.1 ข.2

MIX NO	COAR 50-2 (kg)	UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (KG/SQ.CM.) 7 DAYS	28 DAYS (81)	91 DAYS (102)	182 DAYS	365 DAYS
VN. 11	540	46.9	99.8	168.2	184.4	196.7
VN. 11/A	540	52	103	168	181.4	198.8
VN. 12	535	58.1	121.3	186.5	225.2	227.3
VN. 12/1	535	44	94.8	156	182.4	187.3
VN. 12/2	535	48	103	169	189.5	201.8
VN. 12/A	535	63.2	121	187	204.8	225.3
VN. 13	525	63.5	136.6	182.5	182.4	198.8
VN. 13/A	525	48.9	102	154	168.1	179.4
VN. 14	523	32.5	87.6	138.6	139.6	144.8
VN. 15	528	46	109	173.3	188.5	189.6
VN. 15/A	528	46.9	105	170	187.5	196.7
VN. 15/B	528	36.7	96	169	195.8	197.8
VN. 16	525	49.5	119	198.8	210.9	223.2
VN. 17	545	42.8	109	173.3	188.5	196.7
VN. 17/A	545	34.7	77	139	153.9	179.4
VN. 17/B	545	34.7	79	168	179.3	194.7
VN. 18	530	71.3	153	241.6	250.7	253.8
VN. 18/A	530	66.3	124	222	236.4	250.8
VN. 18/B	530	53	106	208	229.3	238.5
VN. 19	554	87.6	110	119	127.4	128.4
VN. 19/A	554	75	125.4	126	126.4	130.5
VN. 20	556	75.4	101	105	106	105
VN. 20/A	558	68	96.8	99	102.9	109.1
VN. 21	558	69	93.8	95	103.9	108.1
VN. 21/A	558	72	89.7	90	94.8	100.9
VN. 21/B	558	73	90.7	106	109	112.1
VN. 22	560	86	109	111	118.2	118.2
VN. 22/A	580	75	104	110	118.2	133.5
VN. 23	540	32.6	87.6	147	157.9	170.2
VN. 25	533	45.9	110	155	156.9	179.4
VN. 26	531	55	123	189	196.7	210
VN. 27/A	-	67	170	236	260.9	285.4
VN. 28/A	-	91.7	227	293	303.7	317
VN. 29	537	63.2	115	177	186.5	214.1
VN. 29/1	537	58.1	112	162	187.5	202.9
EGAT 1	540	NOT SET	NOT SET	NOT SET	-	-
EGAT 2	540	NOT SET	NOT SET	NOT SET	-	-
EGAT 3	540	NOT SET	NOT SET	NOT SET	-	-
EGAT 4/A	540	-	134	134	-	-
EGAT 5/A	540	31.5	64	64	-	-
EGAT 6/A	540	72	96	96	-	-

/A $ /B INDICATENCE WITH SPECIFICATION



ก. การเกลี่ยปรับระดับด้วยรถ bulldozer D 6 H ทำได้ง่ายเหมือนบดอัดหินคลุก

ข. การบดอัดคอนกรีตด้วยรถบดแบบสั่นสะเทือน CA 51 ทำได้โดยไม่มีการแยกตัว

<u>ภาพที่ 2.13</u> การทดลองบดอัดคอนกรีตด้วยเครื่องจักรก่อสร้างครั้งแรกในประเทศไทย (วันที่ 6 พฤษภาคม 2536) (สมชัย, 2536)

100 ตัน โดยใช้รถบรรทุกชนิดมีรถพ่วงเมื่อถึงหัวงานก่อสร้างเขื่อนปากมูลในบริเวณโรงผสมคอนกรีต (Batching Plant) เถ้าลอยจะถูกเก็บรักษาไว้ในโรงเก็บซีเมนต์ ซึ่งมีความจุประมาณ 700 ตัน เถ้าลอยและซีเมนต์ในโรงเก็บจะถูกเป่าส่งแยกกัน ขึ้นไปเก็บไว้บนถังบรรจุ (Silo) ขนาดความจุ 100 ตัน อย่างละถัง นอกจากนั้นยังได้เก็บตัวอย่างเถ้าลอยส่วนนี้เป็นระยะๆ เพื่อส่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีอย่างละเอียด ทั้งที่ห้องทดลองของ กฟผ. ที่ห้องทดลองของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ห้องทดลองของบริษัท LERM ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งผลการทดลองทุกครั้งได้ยืนยันความมั่นใจว่า เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนที่ส่งไปใช้งานในโครงการปากมูล มีคุณสมบัติทางเคมีได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

2. การผสมคอนกรีตสดสำหรับงานคอนกรีตบดอัด จะกระทำที่โรงผสมคอนกรีตที่มีกำลังผลิตประมาณ 80 ลบ.ม./ชม. โดยจะควบคุมให้อุณหภูมิขณะผสมเสร็จไม่เกิน 25 ^{o}C การควบคุมให้อุณหภูมิต่ำทำได้โดยเติมน้ำแข็งลำเลียงผ่านทางสายพานลำเลียงเข้าไปพร้อมกับกรวดทราย เข้าไปในเครื่องผสมคอนกรีตในอัตราประมาณ 30 กก./ลบ.ม.ของคอนกรีต คอนกรีตสดที่จะขนส่งไปใช้งานจะต้องมีคุณสมบัติพอเหมาะที่จะทำงานบดอัดได้ดี ทั้งนี้จะควบคุมความสามารถในการทำงานบดอัดของคอนกรีตสด ก่อนส่งไปใช้งานด้วยการตรวจสอบค่า Loaded Vebe Time ของคอนกรีตสดให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตลอดเวลาดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

<u>ตารางที่ 2.2</u> ตารางแสดงค่า Loaded Vebe Time

ช่วงเวลาทำงาน	ค่าที่พึงประสงค์ (วินาที)	ค่าที่ยอมรับได้แต่ต้องปรับปรุง (วินาที)
กลางคืน	19 $\pm$ 2	19 $\pm$ 4
กลางวัน	17.5 $\pm$ 2.5	18 $\pm$ 4

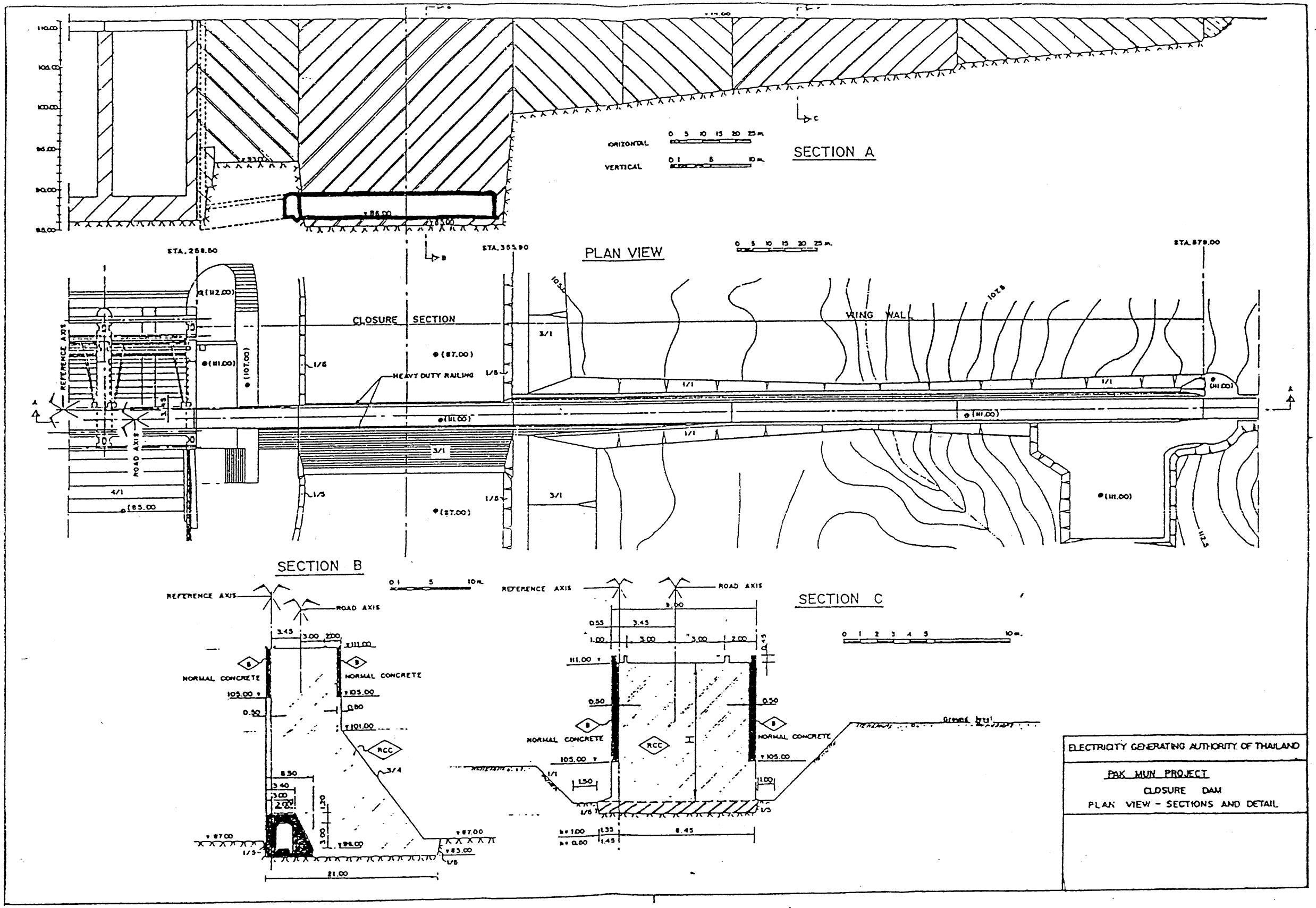
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะที่ส่งไปใช้ที่เขื่อนบากมูล (สมชัย, 2536)

CHEMICAL COMPOSITION	SAMPLING AT MAE MOH BEFORE TRANSPORTATION TEST BY EGAT. LAB						SAMPLING FROM PAK MUN STORAGE				ASTM C818-84 REQUIRMENTS FOR FLY SAH CLASS C
	18/10/93		19/10/93		20/10/93		JAN94, TESTED BY LERM,FRANCE		MAR 94,TESTED BY CU LAB THAILAND		
SiO2	36.2	SUM	43.8	SUM	51.0	SUM	41.8	SUM	63.8	SUM	MIN.SUM=50
Al2O3	14.7	66.5	16.4	77.3	23.4	88.8	21.8	73.8	14.1	84.7	
Fe2O3	15.6		17.1		14.4		10.2		6.8		
CaO	13.6		7.3		2.1		16.5		10.1		
MgO	4.9		4.1		2.4		2.1		0.7		MAX. = 50
Na2O	2.5		2.5		1.6		0.9		1.0		MAX. = 1.5
K2O	2.0		2.2		2.1		2.3		1.6		
SO3	1.4		1.5		2.2		3.5		2.0		MAX. = 5.0
LOSS ON IGNITION							0.4		0.2		MAX. = 6.0
FREE LIME							0.0				

3. การเตรียมผิวฐานก่อนการเริ่มงานคอนกรีตบดอัด จะทำความสะอาดผิวรากซึ่งเป็นหินทราย ต่อจากนั้นจะเทคอนกรีตอุดช่องว่างในเนื้อหิน เพื่อปรับแต่งรูปทรงผิวฐานรากในส่วนที่สัมผัสกับหินให้เรียบ และได้ระดับตามต้องการ เทคอนกรีตบดอัดต่อไปได้อย่างสะดวกและทั่วถึง

4. คอนกรีตผสมเสร็จจากโรงผสมคอนกรีต จะถูกลำเลียงโดยรถโม่ผสมคอนกรีต (Agitator Truck) ขนาด 6 ลบ.ม. ไปยังบริเวณก่อสร้างตัวเขื่อนปิดช่องผันน้ำ และถูกเกลี่ยวส่านดันป้อนให้ไหลขึ้นไปตามสายพาน ซึ่งปรับขยายความยาวได้ประมาณ 40 ม. ในช่วงสุดท้ายคอนกรีตสดจะไหลผ่านท่อส่ง ซึ่งอยู่ในส่วนปลายของสายพานลงไปกองในตำแหน่งที่ต้องการในลานบดอัด ซึ่งได้เริ่มงานคอนกรีตบดอัดในส่วนที่ออกแบบเป็นกำแพงคอนกรีตยาวประมาณ 190 ม. ทางปีกฝั่งซ้ายของตัวเขื่อน (Wing Wall) ซึ่งได้แสดงแผนผังของตัวเขื่อนพร้อมรูปตัดไว้ในภาพที่ 2.14

5. ใช้รถดันตีนตะขาบ ไถเกลี่ย RCC ให้ได้ชั้นความหนาก่อนการบดอัดประมาณ 35 ซม. (ภาพที่ 2.15) แล้วใช้รถบดอัดล้อเหล็กชนิดมีความสั่นสะเทือนขนาดหนัก 10 ตัน บดอัดประมาณ 6 เที่ยว โดยไม่ใช้ความสั่นสะเทือนเฉพาะเที่ยวแรก (ภาพที่ 2.16) แต่การบดอัดในบริเวณที่แคบ ๆ จะใช้รถบดอัดสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Pedestrial Roller) หนัก 1.5 ตัน บดอัดประมาณ 12 เที่ยวแทน สำหรับส่วนที่ประชิดกับผนังกั้นแบบ หรือผนังหินที่ตัดตั้งฉาก ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องจักรบดอัดจนประชิดผนังได้ ภายหลังจากที่บดอัดคอนกรีตในแต่ละชั้นจนมาหยุดอยู่ใกล้กับบริเวณผนัง ซึ่งไม่สามารถบดอัดต่อไปด้วยเครื่องจักรได้อีกแล้ว จะเว้นเป็นร่องประชิดกับผนังดังกล่าวเป็นแถบกว้างประมาณ 0.8-1.0 ม. และใช้วิธีเทคอนกรีตเหลวตามวิธีการเทคอนกรีตปกติ เพื่อเชื่อมต่อเนื้อคอนกรีตปกติกับเนื้อคอนกรีตบดอัดเข้าด้วยกัน คอนกรีตเหลวที่ใช้ในงานลักษณะนี้เป็นคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป โดยมีส่วนผสมของซีเมนต์ 250-300 กก./ลบ.ม.ของคอนกรีต และต้องมีกำลังต้านรับแรงกดแกนเดี่ยวของแท่งตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 250 กก./ตร.ซม.



ภาพที่ 2.14 ผังและภาคตัดขวางของตัวเชื่อนปากมูลในส่วนที่ปิดช่องผันน้ำ ซึ่งก่อสร้างด้วยวิธีคอนกรีตบดอัด (สมชัย, 2537)

ภาพที่ 2.15 ขณะเริ่มงานคอนกรีตบดอัดที่ Wing Wall ริมตลิ่งบนฝั่งซ้ายของเขื่อนปากมูลใช้รถ Bull Dozer ไถเกลี่ยปรับระดับชั้นคอนกรีตแห้งให้ได้ความหนาก่อนการบดอัดประมาณ 35 ซม.(สมชัย, 2537)

ภาพที่ 2.16 ใช้รถบดล้อเหล็กแบบมีความสั่นสะเทือนหนักประมาณ 10 ตัน บดอัดคอนกรีตจนใกล้จะประชิดผนังกั้นแบบของ Wing Wall ในส่วนติดกับลานน้ำมูล (สมชัย, 2537)

6. การบดอัดจะกระทำต่อเนื่องกันไปเป็นชั้น ๆ โดยแต่ละชั้นจะมีความหนาหลังการบดอัดประมาณ 30 ซม. หลังจากนั้นจะฉีดน้ำบ่มชั้นในบริเวณที่บดอัดแล้วเสร็จในขณะรอเวลาก่อนบดอัดชั้นต่อไป ระยะเวลาเมื่อเริ่มผสมคอนกรีตจนกระทั่งบดอัดแล้วเสร็จได้ควบคุมไว้ไม่ให้เกิน 1 ชั่วโมง 30นาที งานบดอัดจะดำเนินต่อเนื่องกันไปจนถึงส่วนสูงสุดของตัวเขื่อนที่ระดับประมาณ +111 ม. ปีกตัวเขื่อนทางฝั่งซ้ายซึ่งยาวประมาณ 190 ม.สูงประมาณ 10 ม. สามารถก่อสร้างได้แล้วเสร็จภายในเวลาประมาณ 1 เดือน ด้วยเครื่องจักรบดอัดหลักเพียง 1 เครื่องเท่านั้น (ภาพที่ 2.17)

7. การปฏิบัติต่อผิวรอยต่อเชื่อมแนวนอน (Horizontal Joint) ระหว่างชั้นของการบดอัดคอนกรีต จะกระทำได้หลายวิธีตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 ลักษณะการปฏิบัติต่อรอยต่อเชื่อมแนวนอนในงานคอนกรีตบดอัด

ประเภทรอยต่อเชื่อม	เวลาที่เริ่มนับจากการผสมคอนกรีตเสร็จ	ลักษณะการปฏิบัติกับรอยต่อเชื่อมแนวนอนของงานคอนกรีตบดอัด ในโครงการก่อสร้างเขื่อนปากมูล
Fresh Prepared Cold	น้อยกว่า 24 ชม.	เก็บเศษกรวดและซับน้ำออก
	ระหว่าง 24-48 ชม.	ล้างผิวหน้าโดยการฉีดน้ำความดันต่ำจนเห็นกรวด
	มากกว่า 48 ชม.	ล้างผิวหน้าโดยการฉีดน้ำความดันต่ำจนเห็นกรวดหลังจากนั้นเทคอนกรีตซึ่งมีหินใหญ่ไม่เกิน 12.5 มม. หนา 2 ซม. ลงไปบนรอยต่อเชื่อมก่อนเทคอนกรีตสด RCC ปูแผ่ลงไป

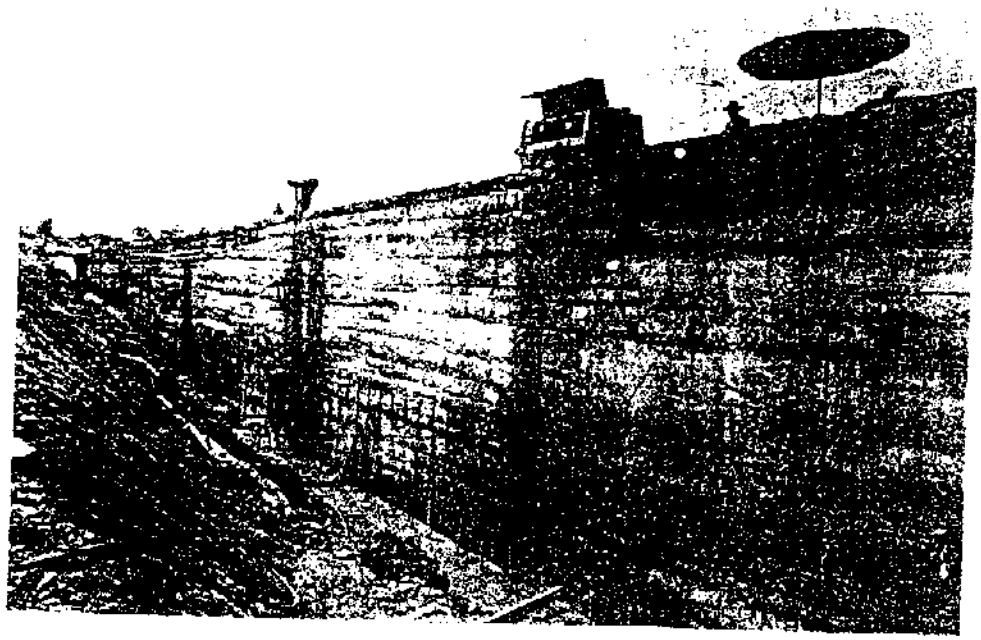
8. การสร้างรอยต่อเผื่อการหดตัวของคอนกรีตตามแนวตัดขวางตัวเขื่อน (Transverse Joint) จะสร้างทุกระยะห่างกันประมาณ 50 ม. โดยมีแผ่นยางกั้นน้ำ (Rubber Water Stop) กั้นยาวในแนวดิ่งลอดรอยต่อใกล้ผิวหน้าเขื่อนด้านเหนือน้ำ และฝังแผ่นเหล็กขนาด 120x20 ซม. หนา 1 มม. แทรกในเนื้อคอนกรีตถึงกันชั้นที่บดอัดเสร็จทุกชั้น (ภาพที่ 2.18) โดยเว้นระยะระหว่างขอบแผ่นเหล็กในแนวตัดขวางตัวเขื่อนแต่ละชั้นประมาณ 20 ซม. จะฝังแผ่นเหล็กในลักษณะเช่นนี้กระจายทั่วทั้งระนาบดิ่งที่เตรียมไว้เป็นรอยต่อเผื่อการหดตัว เพื่อนำร่องให้เกิดรอยแยกขึ้นในเนื้อคอนกรีตบดอัด (Crack Inducers) อย่างเป็นระเบียบและอยู่ในระนาบเดียวกัน

เทคโนโลยีการก่อสร้าง RCC โดยการใช้เถ้าลอยผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นทางเลือกที่น่าสนใจยิ่งในอนาคต สำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นแผ่นกว้าง เช่น สนามบิน ลานกองพัสดุ หรือถนน เพราะในลักษณะงานที่เหมาะสมเช่นนี้ จะทำให้สามารถประยุกต์ใช้คุณลักษณะเด่นของงานคอนกรีตผสมเทเหลวตามปกติได้อย่างเต็มที่ ทั้งในด้านประหยัดปริมาณซีเมนต์ และประหยัดเวลาในการก่อสร้าง เทคโนโลยีนี้จะส่งผลให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายโดยส่วนรวมของประเทศได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากปัจจัยพื้นฐานต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับงานคอนกรีตบดอัดก็มีอยู่อย่างอุดมสมบูรณ์ในประเทศไทยแล้วทั้งสิ้น

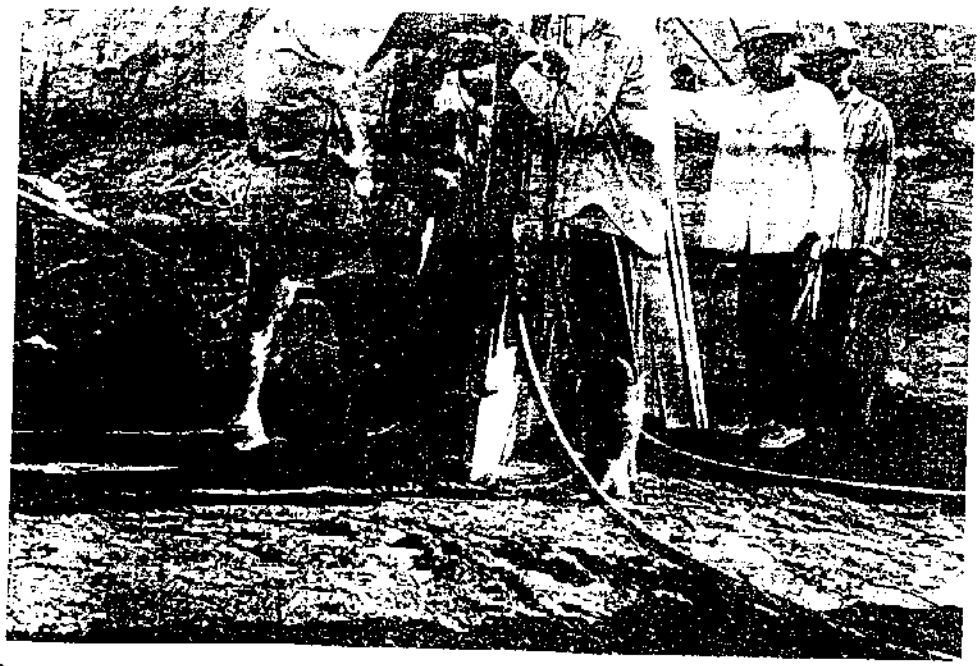
2.3.2 <u>การควบคุมตรวจสอบสภาพคอนกรีตบดอัด</u>

1. เมื่อผสมคอนกรีตจากโรงงานผสมคอนกรีตเสร็จ ก่อนขนส่งคอนกรีตสดไปบดอัดในสนามต้องตรวจสอบคุณภาพด้วยการวัดค่า Loded VeBe Time ก่อนว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่

2. เมื่อบดอัดเสร็จแล้ว จะทดสอบค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่บดอัด โดยใช้เครื่อง Nuclear Densiometer อ่านค่าความหนาแน่นทุก ๆ ปริมาณคอนกรีตบดอัด 100 ลบ.ม. ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ควบคุมคือต้องวัดความหนาแน่นในสนามขั้นต่ำได้สูงกว่า 2195 กก./ลบ.ม. ได้



ภาพที่ 2.17 ตัวเชื่อนคอนกรีตส่วนที่เรียก Wing Wall ยาว 190 ม. สูง 10 เมตร ก่อสร้างด้วย RCC ในเวลา 1 เดือน ด้วยเครื่องจักรบดอัดหลักเพียง 1 ชุด (สมชัย, 2537)



ภาพที่ 2.18 ใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนช่วยกดฝังแผ่นเหล็กขนาด 120x20x0.1 ซม. ลงไปถึงระดับความลึกประมาณ 30 ซม. ซึ่งเป็นส่วนล่างของชั้นคอนกรีตที่บดอัดเสร็จใหม่ (สมชัย, 2537)

3. วัดอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีต โดยจะเทียบกับเวลาที่ผ่านไปหลังการก่อสร้าง โดยติดตั้ง 2 แนวในระนาบตั้งคือ ในตัวเขื่อนส่วนปีกฝั่งซ้าย 1 แนว และในตัวเขื่อนส่วนที่ปิดช่องผันน้ำอีก 1แนว แต่ละแนวจะติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ 4 ระดับ

4. การเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต (Coring) และการทดสอบค่าความซึมได้ของน้ำในหลุมเจาะ (Permeability) จะกระทำทุก ๆ ปริมาณคอนกรีต 5,000 ลบ.ม. หลังการบดอัดคอนกรีตประมาณ 7 วัน เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีต และคุณสมบัติในชั้นบดอัดต่าง ๆ รวมทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของการบดอัด เพื่อทราบว่าจะมีความแข็งแรงและมีความทึบน้ำได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่

การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ RCC ได้เริ่มมีมากขึ้นในประเทศไทย Somjai และ Stewart (1992) ได้ศึกษาคุณสมบัติของ RCC โดยผสมขี้เถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผลิต RCC โดยใช้ขี้เถ้าแกลบผสมเพื่อแทนที่ปริมาณซีเมนต์ใน RCC ในปริมาณ 0,30,50,70 และ100เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) โดยทำการทดสอบหาค่าส่วนผสมของน้ำที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 28 วัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อ RCC ที่มีผสมของขี้เถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันลดลง และเมื่อผสมขี้เถ้าแกลบใน RCC สูงถึง 50 % แล้วจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วงมาตรฐานที่ยอมรับได้ประมาณ 45 MPa นอกจากนี้ยังพบว่าแรงอัดก็มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเช่นกัน โดยทำการเปรียบเทียบคอนกรีต 2 ชนิด ที่มีองค์ประกอบของส่วนผสมของปริมาณขี้เถ้าแกลบและซีเมนต์เหมือนกัน คอนกรีตที่หล่อโดยอาศัยแรงอัด(คอนกรีตชนิด RCC) จะมีความแข็งแรงมากกว่าคอนกรีตที่หล่อโดยวิธีธรรมดา

เกษม (2537)ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของ RCC ผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะและศึกษาการนำหลักการการบดอัดดิน โดยวิธีโมดิฟายด์ พรอคเตอร์มาใช้กับ RCC เพื่อหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย

ที่มีส่วนผสมของ ปูนซิเมนต์บอร์ตแลนด์:ขี้เถ้าลอยแม่เมาะ เท่ากับ 100:0:, 80:20 และ 60:40 จากการศึกษาพบว่า RCC ทั้ง 3 ส่วนผสมมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมประมาณ 7 % ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่หาได้จากการบดอัด ไม่ใช่ค่าปริมาณน้ำที่ทำให้ RCC มีกำลังอัดสูงสุด จากการทดสอบพบว่าค่าปริมาณน้ำที่ทำให้ RCC มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีค่าประมาณ 6 % กำลังรับแรงอัดระยะต้นของ RCC ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซิเมนต์บอร์ตแลนด์ และกำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อปูนซิเมนต์บอร์ตแลนด์ถูกแทนที่ด้วยขี้เถ้าลอย แต่ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้กำลังรับแรงอัดที่มีอายุมากขึ้นของส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอยมีค่าสูงขึ้น สำหรับ RCC ที่ทำจากปูนซิเมนต์บอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยในสัดส่วนที่พอเหมาะ คือใช้ขี้เถ้าลอยประมาณ 20 % ของสารซีเมนต์จะสามารถให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ล้วน

2.4 วัสดุ (ACI Committee 207, 1983)

2.4.1 ทั่วไป

ข้อแตกต่างที่สำคัญของ RCC เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่ว ๆ ไปก็คือ RCC จะต้องมีความข้นเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักเครื่องมือที่ใช้ในการบดอัดได้ มีขนาดคละของมวลรวม และปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสมต่อการบดอัดจากภายนอกเช่น บดอัดโดยการใช้รถล้อเหล็กบดถนน

จุดประสงค์ของการออกแบบปฏิภาคส่วยผสมของ RCC ก็เพื่อให้คอนกรีตที่สามารถบดอัดได้ดีมีความสามารถบดอัดได้ (Compactibility) และเพื่อให้มีกำลัง ความคงทน การซึมผ่าน เป็นไปตามที่ต้องการ วิธีการในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมได้ถูกคิดค้นขึ้นมาหลายวิธี เนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาใช้ เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าไม่มีวิธีใดที่เหมาะสมกับทุกสภาพการนำไปใช้งาน

การคัดเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของ RCC จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ วิธีในการออกแบบปฏิบัติภาคส่วนผสม วัสดุที่นำมาใช้ และการวางแผนการทำงาน สำหรับเขื่อนที่มีความข้นมากโดยทั่วไปจะ

ต้องการคอนกรีตที่มีกำลังและคุณภาพสูงกว่าเขื่อนทั่ว ๆ ไปในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมก็จะต้องให้ได้กำลัง ความคงทน ความทึบน้ำเป็นไปตามที่ต้องการ ทั้งในแง่ของความมั่นคงของโครงสร้างและสภาพการใช้งานของตัวเขื่อน

หลักเกณฑ์ที่สำคัญในการออกแบบปฏิบัติภาคส่วนผสมของคอนกรีตหลาก็คือ ให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมมากที่สุด และในขณะเดียวกันก็ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุด โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเพื่อให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด

เนื่องจากการบดอัด RCC จะใช้วิธีบดอัดจากภายนอก ส่วนผสมของ RCC จึงต้องเหมาะสมเพื่อที่จะสามารถรองรับน้ำหนักเครื่องมือที่ใช้บดอัดและการทำงานอื่น ๆ บนตัวของมันเอง ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่งต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบปฏิบัติภาคส่วนผสม RCC ก็คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างแต่ละชั้นของ RCC การใช้ RCC ที่มีความข้นเหลวต่ำมาก ๆ และใช้มวลขนาดใหญ่กว่า 35 มม. จะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น RCC ที่แข็งตัวแล้ว RCC ชั้นใหม่ ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของ RCC ที่ไม่เพียงพอ ควรมีการกำหนดช่วงเวลาในการเทของแต่ละชั้น การเพิ่มมอร์ตาร์ระหว่างชั้นของ RCC หรือโดยการเพิ่มปริมาณเพสต์ในส่วนผสม ส่วนผสมที่มีปริมาณเพสต์ต่ำเกินไปจะมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นลดลงได้

2.4.2 <u>ความข้นเหลว</u>

การบดอัด RCC เพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดจะต้องใช้พลังงานจำนวนมากซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีการยุบตัว พลังงานที่ใช้จะมากกว่าเป็นจำนวนมาก การบดอัดจากภายนอกโดยวิธีใด ๆ ก็ตามสามารถนำมาใช้ได้ทั้งสิ้น ถ้าสามารถบดอัด RCC มีความหนาแน่นเพียงพอตามต้องการ

การหาค่าความข้นเหลวที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในสนามสามารถหาได้โดยใช้เครื่องมือวีบี (Vebe Apparatus) ซึ่งประกอบด้วยโต๊ะเขย่า (Vibrating Table) ภาชนะบรรจุตัวอย่าง กรวยสำหรับหาค่าการยุบตัว แผ่นเหล็ก และน้ำหนักที่ใช้กดลงบนแต่ละชั้นของตัวอย่าง ตามข้อกำหนด USBR ให้ใช้น้ำหนักกด 50 ปอนด์ ส่วนข้อกำหนดของ USCE ให้ใช้น้ำหนักกด

27 ปอนด์ ปริมาณน้ำที่ทำให้เพสต์เกิดการเยิ้มซึมรอบบริเวณขอบของแผ่นน้ำหนักเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาการเขย่าที่กำหนดไว้ คือปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการก่อสร้าง (Dunstan, 1981 และ Schrader,1987)

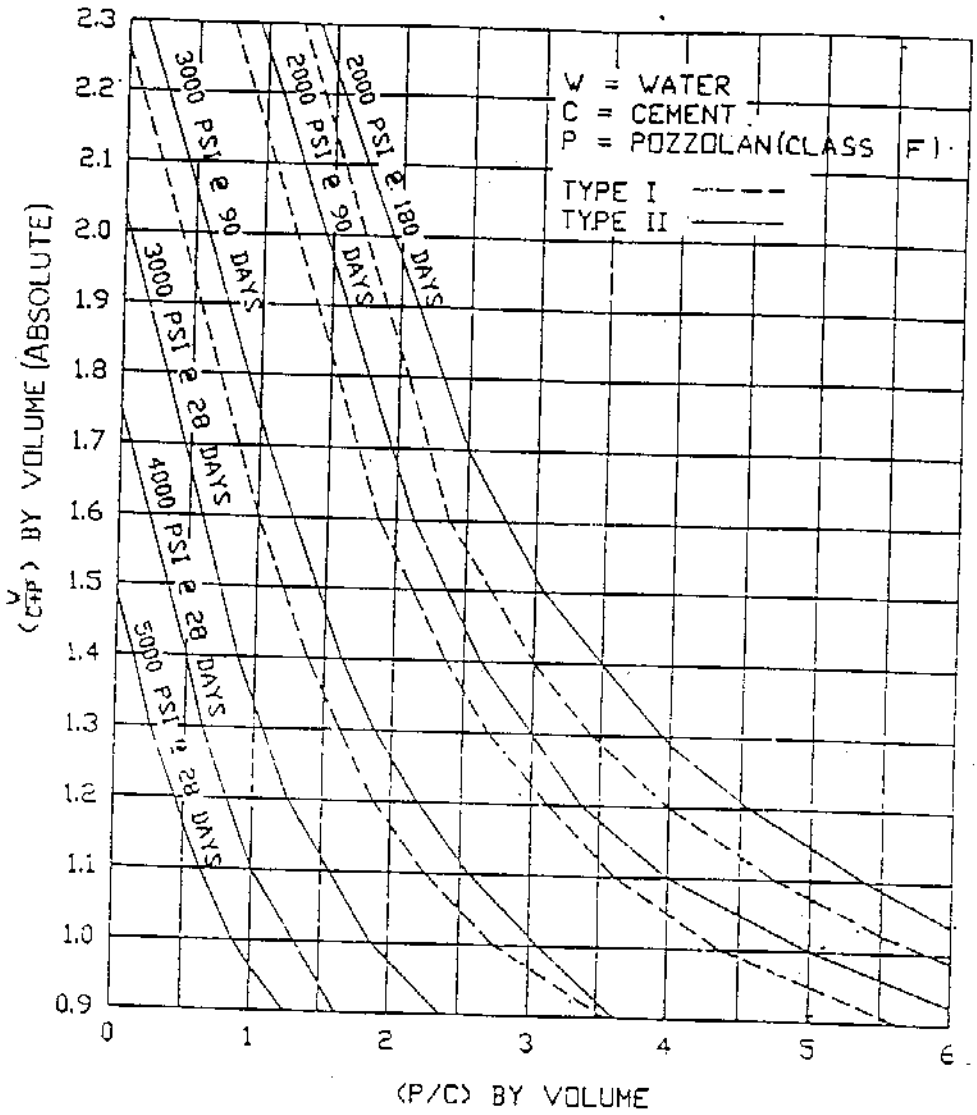
ขนาด รูปร่าง ขนาดคละของมวลรวม และ ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ค่าความข้นเหลวที่น้อยสุดสำหรับ RCC ที่เลือกใช้ ควรจะเป็นค่าที่ RCC สามารถรองรับน้ำหนักเครื่องจักรกลที่ทำงานบนชั้น RCC ได้

สำหรับคอนกรีตที่ค่อนข้างข้น (Stiff) ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต สามารถหาได้โดยการใช้วิธีของดิน-ซีเมนต์ คือ ณ จุดที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดปริมาณน้ำที่จุดนี้สามารถเพิ่ม หรือลด ได้ในช่วง $\pm$ 5.93 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เพื่อให้ค่าการยุบตัวใกล้เคลียงกัน หลักการเช่นนี้ก็สามารถนำมาเพื่อใช้ควบคุมความข้นเหลว ของ RCC ได้เช่นกัน ปฏิภาคส่วนผสมของ RCC จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมที่จะนำมาใช้ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองจะถูกนำมาเป็นหลักเกณฑ์ในการผลิต RCC ในช่วงแรก แต่อย่างไรก็ตามก็จำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้เหมาะสมสำหรับการทำงานจริงในสนามต่อไป (Schrader, 1987)

2.4.3 วัสดุเชื่อมประสาน

RCC สามารถผลิตได้จากซีเมนต์ทั่วไปหรืออาจจะได้จากการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์และสารปอซโซลาน กำลังของ RCC จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของมวล ระดับการบดอัด สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอซโซลานและน้ำ ชนิดของวัสดุเชื่อมประสานจะมีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดไฮเดรชัน และอัตราของ RCC ที่ให้กำลังเท่ากัน โดยการเปลี่ยนสัดส่วนของปูนซีเมนต์ และสารปอซโซลานต่าง ๆ กัน (ACI 318, 1986 และ 201.2R, 1980)

สำหรับปูนซิเมนต์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 2 ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C150 สามารถใช้ภาพที่ 2.19 เพื่อเป็นแนวทางในการหาปฏิภาคส่วนผสมของ RCC ที่ให้กำลังเท่ากัน โดยการเปลี่ยนสัดส่วนของปูนซิเมนต์ และสารปอซโซลานต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 2.19 กราฟสำหรับหาปริมาตรส่วนผสมของ RCC

(ACI Committtee 207, 1983)

สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมก็ คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในงาน RCC ซึ่งสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ โดยใช้ปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำ ปูนซีเมนต์เหล่านี้ในช่วงแรกจะให้กำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ในระยะยาวจะสามาระรับกำลังได้มากขึ้น

นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารปอซโซลานผสมในการลดความร้อนของส่วนผสม การเลือกชนิดของปอซโซลานที่เหมาะสมต่อการนำไปเป็นส่วนผสมของ RCC ควรจะเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานASTM C618 หรือข้อกำหนดของสถาบันอื่นที่เป็นที่ยอมรับ ส่วนใหญ่โครงการที่มีการให้ RCC ผสมสารปอซโซลานมักจะใช้ขี้เถ้าลอยชั้น F (Class F) เนื่องจากมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมทำให้ความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น (Cannon, 1982)

จุดประสงค์ของการนำขี้เถ้าลอยชั้น F มาใช้เป็นส่วนผสมของ RCC มี 3 ข้อ คือ

- นำมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น
- เพื่อลดค่าใช้จ่าย
- เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้

การหาปฏิภาคส่วนผสมเพื่อให้ได้ปริมาณของเพสต์น้อยที่สุด มีหลักอยู่ว่าให้ใช้สารปอซโซลาน หรือวัสดุละเอียดที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์หรือน้ำ การที่นำเขาไปแทรกตามช่องว่างของเนื้อคอนกรีตจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง จากการค้นคว้าขององค์การ TVA, USCE และ USBR พบว่าปูนขาวอิสระที่ถูกปล่อยออกมาจากปูนซีเมนต์ถึงแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อย ก็เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับสารปอซโซลานปริมาณมาก ๆ และเมื่อเวลาผ่านไปหลายปี ปฏิกิริยาปอซโซลานจะสามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่าง ซึ่งมีผลให้กำลังเพิ่มขึ้นในระยะยาว การใช้สารปอซโซลาน จำนวนมากเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ก็สามารถกระทำได้กับ RCC ที่ไม่ต้องการกำลังสูงในระยะแรก (Mather, 1974)

2.4.4 มวลรวม

การเลือกใช้มวลรวม และควบคุมขนาดคละของมวลรวมเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ ของ RCC การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของมวลรวมระหว่างการก่อสร้างมีผลต่อปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้ และยังมีผลต่อกำลังอีกด้วย ความต้องการในด้านกำลังรับแรงกด และแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างการก่อสร้าง เป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของมวลรวมที่นำมาใช้ ในงานที่ต้องการคอนกรีตคุณภาพควรจะมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการควบคุมคุณและขนาดคละของมวลรวม สำหรับงานที่ไม่ต้องการคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงมาก การผลิต RCC สามารถนำมวลรวมจากหลาย ๆ แหล่งมาใช้และไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM และ ACI ตราบใดที่คุณภาพของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้(ACI Committee 207,1983)

สำหรับสารที่เป็นอันตราย (Deleterious Substances) ต่อ RCC ควรจะกำหนดค่าสูงสุดของสารเหล่านี้ ว่ายอมให้มีได้ไม่เกินเท่าไร สารที่เป็นอันตรายบางชนิด เช่น สารที่มีความละเอียดมากกว่าแร่งเบอร์ 200 และ สารที่มีลักษณะเปื่อยยุ่ย ถ้ามีปริมาณเกินกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C33 อาจจะมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่ใช้กับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป รวมไปถึงกำลัง

ใน RCC ที่ต้องการความข้นสูง การเติมสารที่เป็นอันตรายลงในส่วนผสมเพื่อลดปริมาณความต้องการน้ำของ RCC ควรจะมีการกำหนดปริมาณสารเจือปนสูงสุดที่ยอมได้ ที่จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในแง่ลบต่อ RCC สำหรับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C33 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

สำหรับมวลหยาบ RCC ที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่กว่า 75 มม. จะไม่ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในการผสมและการป้องกันการแยกของมวลรวม ซึ่งจะเกิดกับมวลที่มีขนาดใหญ่

ขนาดของมวลรวมจมีอิทธิพลต่อการบดอัด RCC อย่างไรก็ตามขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมที่ใช้ (Maximum Size Aggregate. MSA) จะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย เมื่อกำหนดให้ความหนาการเทแต่ละชั้นมีค่ามากกว่า 3 เท่าของ MSA และการใช้รถบดถนนแบบสั่นสะเทือนขนาดใหญ่จะช่วยขจัด

ตารางที่ 2.5 ปริมาณสูงสุดของวัสดุละเอียดกว่าแร่งเบอร์200 ที่ยอมให้เจือปนอยู่ในส่วนผสมของRCC ตามมาตรฐาน ASTM C30 (ACI Committee 207, 1983)

Liquid limit	Plastic index	Maximum percent passing No. 200
0-25	0-5	10
0-25	5-10	9
0-25	10-15	4
0-25	15-20	3
0-25	20-25	1.5
25-35	0-5	9
25-35	5-10	8
25-35	10-15	6.5
25-35	15-20	5
25-35	20-25	1.5
35-45	0-5	8.5
35-45	5-10	5.5
35-45	10-15	4
35-45	15-20	2
35-45	20-25	1.5
45-55	0-5	5.5
45-55	5-10	5
45-55	10-15	3.5
45-55	15-20	3
45-55	20-25	1.5

Note: The maximum permissible amount passing the No. 200 sieve is dependent upon the plasticity (ASTM D 4318) of all of the fine (Washed sample) passing the NO. 40 or NO.50 sieve. Experience has shown that results are similar for either sieve. The size can be based on convenience of testing.

ปัญหาเกี่ยวกับการแยกแยะของมวลรวมอีกด้วย ในกรณีที่ราคาเป็นปัจจัยกำหนดการเลือกขนาดของ MSA ก็ควรจะพิจารณาดูว่าควบคู่ไปกับค่าใช้จ่ายเพื่อป้องกันการแยกตัวของมวลรวมด้วย

สัดส่วนผสมของมวลรวมที่แตกต่างกัน จะมีผลกำหนดโดยตรงต่อคุณสมบัติของ RCC การทำให้มวลรวมสัดส่วนผสมอย่างสม่ำเสมอทำได้โดยการแยกมวลรวมออกเป็นกองขนาดต่างๆ และเมื่อต้องการใช้งานจึงนำมาผสมกันใหม่ตามสัดส่วน

สำหรับมวลรวมละเอียด สัดส่วนผสมของมวลรวมละเอียดมีผลอย่างมากต่อปริมาณน้ำที่ต้องการ และความสามารถในการบดอัดได้ของ RCC สัดส่วนผสมของมวลรวมนอกจะมีผลต่อความสามารถในการบดอัดได้แล้ว ยังมีผลต่อปริมาณน้ำกับวัสดุเชื่อมประสานที่ต้องการเพื่อที่จะสามารถแทรกในช่องว่างและเคลือบผิวของมวลได้อย่างทั่วถึง

2.4.5 สารผสมเพิ่ม (Admixture)

ได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ และหน่วงเวลาการแข็งตัว RCC ในงานก่อสร้างเขื่อนเอลก์ครีก (Elk Creek Dam) และเขื่อนวิโลว ครีก และพบว่าไม่มีผลเสียแต่อย่างไร

2.5 กำลังของ RCC

2.5.1 กำลังรับแรงอัดของ RCC

กำลังรับแรงอัดของ RCC ซึ่งมีปริมาณเพสต์มากเกินกว่าช่องว่างระหว่างมวลรวมจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ เช่นเดียวกับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป แต่สำหรับ RCC ที่มีความสามารถในการทำงานได้ต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์จะแตกต่างกับคอนกรีตทั่วๆไปมาก ตารางที่ 2.6 และ 2.7 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลเกี่ยวกับกำลังของ RCC ที่มีส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งได้จากการหล่อแท่งตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และแท่งตัวอย่างที่เจาะจากโครงสร้างจริง (ACI Committee 207, 1983)

ข้อมูลที่ได้จากเขื่อนวิลรัลวดรีก ซึ่งใช้ RCC ที่มีปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานต่ำ และใช้มวลรวมขนาดใหญ่ แสดงให้เห็นว่ากำลังของแท่งตัวอย่างที่ได้จากห้องปฏิบัติการ และที่เจาะจากโครงสร้างจริง ไม่สามารถบ่งบอกความสัมพันธ์ใด ๆ ได้เลย ส่วนข้อมูลของเขื่อนอื่น ๆ ที่มีปริมาณเพสต์มากกว่าพบว่า ความสัมพันธ์ของแท่งตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ เพราะฉะนั้นเพื่อให้กำลังของแท่งตัวอย่างที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับสภาพจริง จำเป็นต้องเลือกแบบหล่อและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.8 และ 2.9 แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างทรงกระบอก RCC ที่ใช้ส่วนผสมต่าง ๆ ภาพที่ 2.20 และ 2.21 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังแรงอัดของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ที่ใช้มวลรวม 2 ชนิดที่มีคุณภาพต่างกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์และขนาดคละของมวลรวมที่เหมือนกัน จะเห็นได้ว่าคุณภาพของมวลรวมมีผลต่อกำลังของ RCC เมื่อมวลรวมขนาดเหมือนกันและปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกัน

2.5.2 กำลังรับแรงดึงของ RCC

กำลังรับแรงดึง สำหรับ RCC ที่มีความสามารถในการทำงานได้ต่ำ กำลังรับแรงดึงเมื่อคิดเป็นเปอร์เซนต์ของกำลังรับแรงอัดจะมีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบระหว่างกำลังของแท่งตัวอย่างRCC ที่หล่อในห้องปฏิบัติการกับแท่งตัวอย่างที่เจาะจากโครงสร้างจริง(ACI Committee 207,1983)

				Core :			Average laboratory cylinder strength, : & psi				
Project *	MSA, in. !	Cement,lb	Pozzolan, lb	Approximate age	Approximate size, in.	Average strength, psi	28 day	56 day	90 day	180 day	356 day
Willow	1 1/2	318	135	75 day	8 x 12	3948	3408		4469		
Willow	3	80	135	1 yr	8 x 12	2300					2623
Willow	3	80	135	1 yr	8 x 12	2300					2210 !!
Willow	3	80	135	1 yr	8 x 12	2200					2623
Willow	3	175	135	1 yr	8 x 12	2150					3779
Willow	3	175	135	1 yr	8 x 12	2150					2931 !!
Willow	3	175	135	1 yr	8 x 12	2080					3779
Willow	3	175	135	1 yr	8 x 12	3220					4146
Willow	3	175	135	1 yr	8 x 12	3220					3526 !!
Willow	2	175	135	1 yr	6 x 12	2260					4146
Copperfield	2	185	135	28 day	6 x 12	950	667				
Copperfield	2	185	135	56 day	6 x 12	1400	667			1040	
Copperfield	2	185	135	170 day	6 x 12	1682				1040	
Copperfield	2	135	135	170 day	6 x 12	1260	590			871	
Middle Ford	3	112	135	42 day	6 x 12	2016	1447			2067	
Galesville	3	89	135	1 yr	6 x 12	2170					1561
Galesville	3	89	135	1 yr	6 x 12	2020					1561
Galesville	3	115	135	1 yr	6 x 12	2000					1881
U.Stillwater *	1 1/2	182	135	28 day	6 x 12	1660	2130 ::				
U.Stillwater *	1 1/2	182	135	90 day	6 x 12	2400		3150 ::			
U.Stillwater *	1 1/2	182	135	180 day	6 x 12	2750				4720 ::	
U.Stillwater *	1 1/2	182	135	1 yr	6 x 12	2910					5220 ::
U.Stillwater *	1 1/2	121	135	28 day	6 x 12	1960	1220 ::				
U.Stillwater *	1 1/2	121	135	180 day	6 x 12	2690			2150 ::		
U.Stillwater *	1 1/2	121	135	1 yr	6 x 12	2920				3240 ::	
U.Stillwater *	1 1/2	121	135	28 day	6 x 12	3080					4780 ::
U.Stillwater *	1 1/2	129	135	180 day	6 x 12	2690	1640 ::				
U.Stillwater *	1 1/2	129	135	1 yr	6 x 12	3080			2770 ::		
U.Stillwater *	1 1/2	129	135	28 day	6 x 12	3330				4020 ::	
U.Stillwater *	1 1/2	129	135	180 day	6 x 12	3640					4960 ::
TVA TF-2 *	1 1/2	127	135	34 day	6 x 12	3070	2870 ::(34 day)				
TVA TF-2 *	1 1/2	127	135	90 day	6 x 12	3640			3880 ::		
TVA TF-2 *	1 1/2	75	135	90 day	6 x 12	2620			2580 ::		
TVA TF-2 *	1 1/2	132	135	90 day	6 x 12	3680			3750 ::		
TVA TF-2 *	1 1/2	172	135	90 day	6 x 12	3640			2980 ::		
WES-1 *	4 1/2	235	135	71 day	6 x 12	3150			2690(84 day)		
WES-1 *	4 1/2	235	135	73 day	6 x 12	3720		5250 (65 day)			
WES-1 *	3	235	135	66 day	6 x 12	3980		4280 (65 day)			

* Projects that were demonstrations, tests, fills trials, or had relatively low volume (less than about 35,00 yd^3) are noted *. Date for orther project (not noted *) represent the average for an entere dam or orther large mass

! Maximum-size aggregate in the full mass mix

: Where cubes wrer use the strength had been converted to the apprpximate equivalent core or cylinder value by applying a reduction factor of 20 percent

& Except as noted by the following indicators, all cylinders are 6 x 12 in. with the plus 1 1/2 or 2 in. material removed by wet screening and compaction was pneumatic tamp : !! - 9 x 18 inch cylinders ; :: - modified vebe compaction

** These cores included lift joint. All orther cores generally did not include joint.

ตารางที่ 2.7 ปฏิภาคส่วนผสมและกำลังรับแรงเฉือนของ RCC ที่ใช้ส่วนผสมต่าง ๆ (ACI Committee 207,1983)

Project	MSA, in.	Cement lb/yd^3	Pozzolan lb/yd^3	Approximate water, lb/yd^3	Approximate water, lb/yd^3	RCC mass Cohesion psi	RCC mass Friction deg F	Layer-to-layer joi Cohesion psi	Layer-to-layer joi Friction deg F	Apprpximate joint maturity F-hrs	Remarks
Willow	3	80	32	180	28	175	-	-	-	-	Unconfined, lab compacted cylinder
					90	320	-	-	-	-	
					180	390	-	-	-	-	
Willow	3	175	0	185	28	375	-	-	-	-	Unconfined, lab compacted cylinder
					90	505	-	-	-	-	
					180	690	-	-	-	-	
Willow	3	175	80	185	28	445	-	-	-	-	Unconfined, lab compacted cylinder
					90	645	-	-	-	-	
					180	785	-	-	-	-	
Elk	3	94	38	170	28	165	-	-	-	-	Unconfined
					90	245	-	-	-	-	
Lost Creek	3	70	132	140	300	450	-	-	-	-	Unconfined, large roller, field placed
						-	69	-	-	-	Confined at 75 psi, large roller, field placed
Lost Creek	3	235	0	140	300	870	-	-	-	-	Unconfined, large roller, field placed
						-	34	-	-	-	Confined at 75 psi, large roller, field placed
						-	49	-	-	-	Confined at 150psi, large roller, field placed
TVA - BLN	1.5	75	300	142	90	265	-	-			Unconfined, large roller, field placed
TVA - # 1	3	94	130	130	138	640	-	-			Unconfined, large roller, field placed
Willow	3	80	32	180	200	-	-	115	62	200	Large roller, field placed
		175	0	185		-	-	100	65		
		175	80	185		-	-	180	63		
Willow	3	80	32	180	35	-	-	110	40	1600	Lab roller, large block, full mix
		175	0	185	35	-	-	170	53		
		80	32	180	90	-	-	130	45		
		175	80	185	90	-	-	200	52		
Willow	3	80	32	180	35	-	-	110	48	2000	Lab roller, large block, full mix
		175	80	185	35	-	-	145	42		
		80	32	180	90	-	-	155	44		
		175	80	185	90	-	-	215	37		

ตารางที่ 2.7 ปฏิภาคส่วนผสมและกำลังรับแรงเฉือนของ RCC ที่ใช้ส่วนผสมต่าง ๆ (ACI Committee 207,1983) (ต่อ)

Project	MSA, in.	Cement lb/yd ^ 3	Pozzolan lb/yd^3	Approximate water, lb/yd^3	Approximate age lb/yd^3	RCC mass Cohesion psi	RCC mass Friction deg F	Layer-to-layer jo Cohesion psi	Layer-to-layer jo Friction deg F	Apprpximate joint maturity F-hrs	Remarks
Willow	3	80	32	180	35	-	-	100	44	120	Lab roller, large block, full mix
		175	80	185	35	-	-	115	60		
		80	32	180	90	-	-	135	55		
		175	80	180	90	-	-	190	50		
Lost creek	3	235	0	140	300	-	-	315	65	Fresh joint	Field placement, large roller
		235	0			-	-	295	40	Hard joint	
		235	0			-	-	115	35	Fresh joint	
		70	132			-	-	170	50	Hard joint	
Galesville	3	74	51	190	90	-	-	64	47	500 (50F)	Lab Vebe cylinders, low quality aggregate
						-	-	100	40	500 (73F)	
Elk Creek	3	94	38	200	90	-	-	110	55	112	Large roller, poor quality aggregate
						-	-	150	51	112	
						-	-	90	55	318	
						-	-	110	47	318	
						-	-	100	46	3168	
						-	-	120	42	3168	
Upper Stillwater	2	121	269	175	28	-	-	136	47	-	Lab Vebe cylinders, quartzite and sandstone
					90	-	-	241	58	-	
					180	-	-	350	55	-	
					365	-	-	354	71	-	
Upper Stillwater	2	129	286	200	200	-	-	319	58	70 (EST)	Large roller, field placement, admixture
		129	286	272	272	-	-	190	53	4600 (EST)	
		121	269	365	365	-	-	254	35	1300 (EST)	
		182	210	481	481	-	-	74	65	230 (EST)	
Upper Stillwater	2	129	286	180	28	-	-	235	42	1750	Lab Vebe cylinders, quartzite and sandstone
					90	-	-	280	59	1750	
					180	-	-	310	64	1750	
					365	-	-	575	46	1750	

ตารางที่ 2.8 กำลังและคุณสมบัติความยืดหยุ่นของ RCC ที่ใช้ส่วนผสมต่าง ๆ (ACI Committee 207,1983)

Project	Cement, lb/yd^3	Pozzolan, lb/yd^3	Water lb/yd^3	W/(C+P) (BY WT)	Age days	Compression psi	Direct tensile psi	Modulus of elasticity psi x 10^6	Poisson's ratio
Willow	80	32	180	1.61	3	419	-	-	-
					7	577	-	1.20	-
					28	1172	90	1.59	0.14
					90	1731	165	1.91	0.17
					365	2623	-	-	-
Willow	175	0	185	1.06	3	656	-	-	-
					7	997	-	2.20	-
					28	1845	225	2.67	0.19
					90	2647	270	2.78	0.18
					365	3779	-	-	-
Willow	175	80	185	1.06	3	789	-	-	-
					7	1147	-	2.40	-
					28	2056	255	2.91	0.21
					90	3961	340	3.25	0.21
					365	4146	-	-	-
Willow	315	135	200	0.44	3	1372	-	-	-
					7	2027	-	-	-
					28	3408	-	-	-
					90	4469	-	-	-
					365	5790	-	-	-
Zintel	50	0	200	4.00	3	120	-	-	-
					7	160	-	-	-
					28	350	-	-	-
					90	530	-	-	-
					365	740	-	-	-
Zintel	100	0	200	2.00	3	190	-	0.31	-
					7	280	-	0.68	-
					28	630	90	1.54	
					90	1090	165	2.15	0.21
					365	1550	-	2.57	-
Zintel	150	0	200	1.33	3	410	-	-	-
					7	620	-	-	-
					28	1100	-	-	-
					90	1550	-	-	-
					365	2530	-	-	-
Zintel	200	0	200	1.00	3	680	-	1.35	-
					7	990		1.54	-
					28	1620	200	2.39	-
					90	2130	225	2.47	0.20
					365	3100	-	3.28	-
Elk	94	38	170	1.29	3	210	-	-	-
					7	270	-	-	-
					28	410	60	-	-
					90	820	115	1.69	0.19
					365	-	-	-	-

ตารางที่ 2.8 กำลังและคุณสมบัติความยืดหยุ่นของ RCC ที่ใช้ส่วนผสมต่าง ๆ (ACI Committe 207, 1983) (ต่อ)

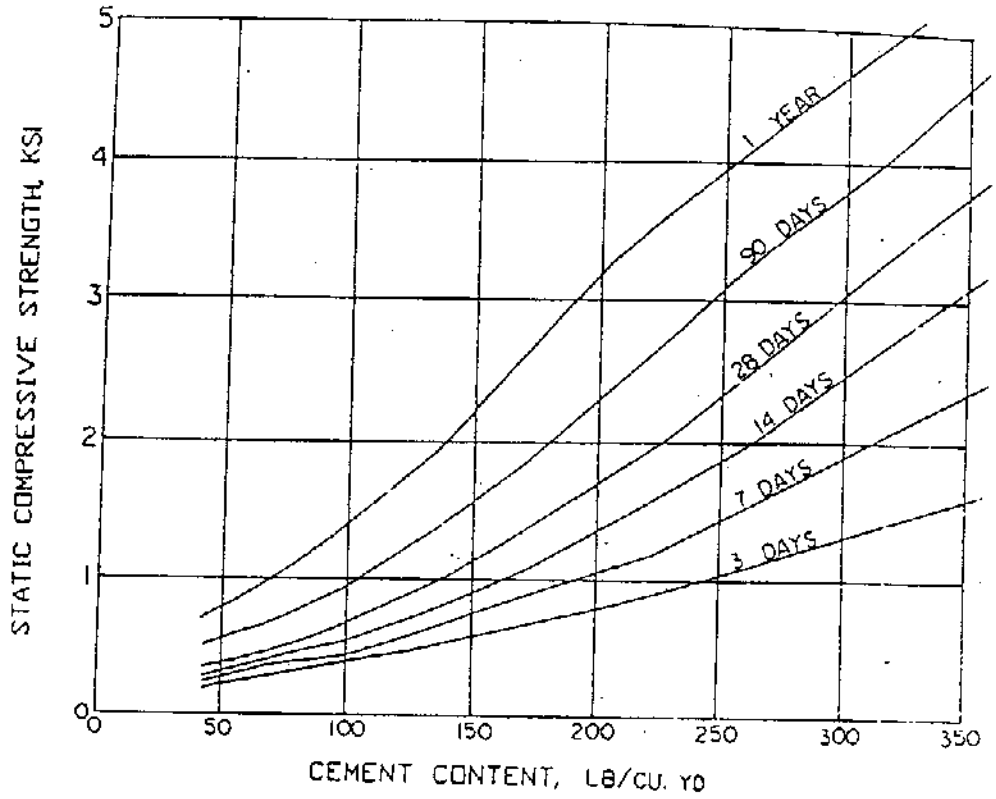
Project	Cement, lb/yd^3	Pozzolan, lb/yd^3	Water lb/yd^3	W/(C+P) (BY WT)	Age days	Compression psi	Direct tensile psi	Modulus of elasticity psi x 10^6	Poisson's ratio
Tarbela (1982) with silt	200	0	-	-	3	-	-	-	-
					7	1110	-	-	-
					28	1490	-	-	-
					90	1980	-	-	-
					(2 yr)	2760	-	-	-
Tarbela (pre-1982) no silt	235	0	-	-	3	547	-	-	-
					7	662	-	-	-
					28	951	-	-	-
					90	-	-	-	-
					365	-	-	-	-
Middle Ford	100	0	135	1.35	3	490	-	-	-
					7	540	-	-	-
					28	868	-	-	-
					90	1290	-	-	-
					365	-	-	-	-
Middle Ford	120	0	135	1.33	3	565	-	-	-
					7	797	-	-	-
					28	1655	-	-	-
					90	2000	-	-	-
					365	-	-	-	-
Monksvill	105	0	205	1.95	3	487	37	-	-
					7	650	64	0.35	-
					28	745	95	0.90	-
					90	-	-	-	-
					365	-	-	-	-
Upper Stillwater	182	210	183	0.47	3	-	-	-	
					7	1360	-	-	
					28	2130	110	1.03	0.13
					90	3510	150	1.32	0.14
					365	4780	205	1.71	0.17
Upper Stillwater	121	269	175	0.45	3	-	-	-	-
					7	770	50	-	-
					28	1220	80	0.82	0.13
					90	2150	130	-	-
					365	4780	200	1.59	0.20
Upper Stillwater	129	236	180	0.43	3	-	-	-	-
					7	1110	55	-	-
					28	1620	110	0.92	0.13
					90	2770	130	-	-
					365	4960	220	1.76	0.18

Note: Strength are for 6x12 in. cylinders with 1 1/2 in. aggregate removed. The data is from laboratory mix design studies a / or field cylinder during condtruction. Actual water contents used during construction may very due to field condition. The water content is based on saturated surface dry aggregate.

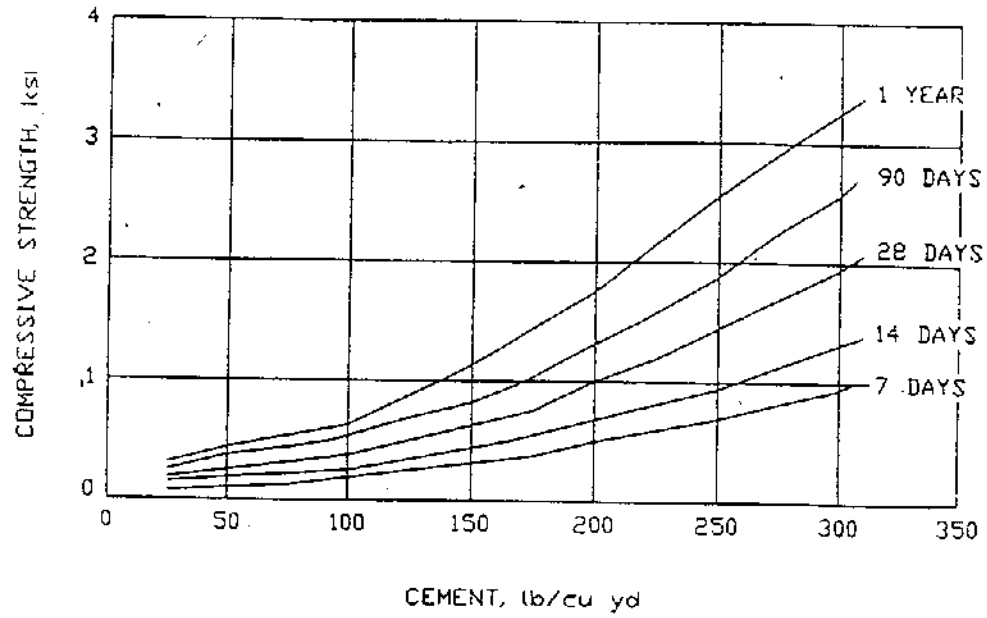
ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมของ RCC และคอนกรีตของเขื่อนเรเวลสโตก (Revelstoke Dam) โดยใช้มวลรวมชนิดเดียวกัน (ACI Committee 207,1983)

Mix	Cement, lb/yd^3	W/C by weight	Age, * days	Compressive strength, psi		Modulus of elasticity, psi x 10^6	
				6x12-in. cylinder	9x18-in. cylinder	6x12-in. cylinder	9x18-in. cylinder
Conv-L	250	0.68	7	1560	1120	2.5	2.4
			28	2150	1675	3.1	3.0
			90	2030	1780	3.2	3.1
			360	2330	1920	3.4	3.3
Conv-M	350	0.56	7	2410	1790	2.8	2.8
			28	3290	2400	3.5	3.6
			90	3190	2410	3.6	3.7
			360	3510	2610	3.9	3.6
Conv-R	500	0.39	7	4460	3180	3.1	3.1
			28	5870	4490	3.6	3.7
			90	6190	4320	4.6	4.3
			360	7400	4480	4.3	3.3
RCC-L	262	0.58	7	2410	1920	3.1 (8) *	3.0 (8) *
			28	3010	2420	3.2 (48)*	3.1 (48) *
			90	2930	2600	3.5	3.6
			360	4100	3290	4.0	3.6
RCC-M	335	0.52	7	2690	2790	3.4	3.4
			28	3810	3620	3.7 (41) *	3.3 (41) *
			90	4610	3290	3.8	3.4
			360	5310	4110	4.0	4.3
RCC-R	393	0.42	7	4740	3820	-	-
			28	5500	3945	3.7 (33) *	3.7 (33) *
			90	5600	4590	4.0	3.8
			360	6790	5390	4.6	4.5

* Numbers in parentheses indicate the actual age when it differs from the nominal age.



ภาพที่ 2.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณปูนซิเมนต์และกำลังรับแรงอัดของ RCC ที่อายุต่าง ๆ เมื่อมวลรวมที่ใช้มีคุณภาพสูง (ACI Committtee 207, 1983)



ภาพที่ 2.21 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณปูนซิเมนต์และกำลังรับแรงอัดของ RCC ที่อายุต่าง ๆ เมื่อมวลรวมที่ใช้มีคุณภาพต่ำ (ACI Committtee 207, 1983)

คอนกรีตทั่วไป ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังดึงต่อกำลังรับแรงอัดของ RCC จะอยู่ในช่วงประมาณ 7-13 % ทั้งนี้ขึ้นกับคุณภาพของมวลรวม อายุ ปริมาณปูนซีเมนต์ และกำลัง

2.5.3 กำลังรับแรงเฉือนของ RCC

กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงเฉือนของ RCC ขึ้นอยู่กับค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และมุมของความเสียดทานภายใน(Angle of Internal Friction) จุดที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำจะเกิดขึ้นที่รอยต่อของการก่อสร้าง และตามผิวสัมผัสระหว่างชั้นของ RCC ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

2.6 ข้อดี และ ข้อเสียของ RCC

2.6.1 ข้อดี

ก. ความรวดเร็วในการก่อสร้าง นับว่าเป็นจุดเด่นของ RCC เลยที่เดียว เมื่อเปรียบเทียบกับการก่อสร้างเขื่อนโดยวิธีอื่น ๆ เช่นเขื่อนสเตจโคช (Stage Coach Dam) มีความสูง 46 ม. และใช้ RCC ปริมาณ 34,000 ลบ.ม.ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพียง 37 วัน เขื่อนกรายสโตนแคนยอน มีความสูง 42 ม. และใช้ RCC ปริมาณ 96,000 ลบ.ม. ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพียง 8 สัปดาห์ เขื่อนกาเลสวิลล์ มีความสูง 51 ม. และใช้ RCCปริมาณ 161,000 ลบ.ม. ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพียง 10 สัปดาห์ เขื่อนบากมูล ใช้ RCC 45,000 ลบ.ม. ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพียง 4 เดือน

ข. ความประหยัด เมื่อเปรียบเทียบการก่อสร้างเขื่อน RCC กับการก่อสร้างเขื่อนประเภทอื่น ๆแล้ว พบว่าเขื่อน RCC จะสามารถช่วยลดต้นทุนในด้านต่างๆได้ จึงมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเขื่อนประเภทอื่น ๆ โดยเฉพาะในงานผันน้ำ (Diversion Work) เนื่องจากการก่อสร้างเขื่อน RCC สามารถดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ในบางกรณีสามารถทำการก่อสร้างให้แล้วเสร็จก่อนที่ฤดูฝนจะมาถึง ดังนั้นจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในงานต้นน้ำลงได้ถึง

80 % เมื่อเปรียบเทียบกับการก่อสร้างเขื่อนโดยวิธีอื่น ๆ

ค. การรักษาสภาพแวดล้อม มีการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ เช่นขี้เถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปทิ้งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำเอาขี้เถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิต RCC สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ และเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

2.6.2 <u>ข้อเสีย</u>

ก. การควบคุมคุณภาพ ต้องการการควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด เนื่องจากการก่อสร้างเขื่อน RCC ดำเนินไปอย่างรวดเร็วมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถรอผลการทดสอบจากการเก็บตัวอย่างได้ เพราะกว่าที่จะทราบผลการทดสอบ RCC ชั้นนั้น ๆ จะถูกเททับด้วย RCC ชั้นต่อ ๆไปแล้ว ทำให้ไม่สามารถทำการแก้ไขได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการควบคุมคุณภาพของ RCC ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทันที การควบคุมคุณภาพต้องดีพอเพื่อให้สามารถแน่ใจได้ว่า RCC ที่ส่งมาจากโรงผสมมีคุณสมบัติตามต้องการ ได้รับการผสมโดยมีปฏิภาคส่วนผสมที่ถูกต้อง มีวิธีการผสมที่ถูกต้องมีการขนส่ง การเท และ การเกลี่ยโดยไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของมวลรวม และ มีวิธีการบดอัดจนได้ความหนาแน่นเป็นที่พอใจ

ข. การก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง คุณภาพของรอยต่อระหว่างชั้นของ RCC ขึ้นอยู่กับการออกแบบ RCC ความสะอาดของรอยต่อและช่วงห่างของเวลาการเทแต่ละชั้น ถ้าการเท RCC แต่ละชั้นมีช่วงห่างของเวลามากเกินไป จะต้องปรับปรุงคุณภาพของรอยต่อระหว่างชั้น ซึ่งทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่การก่อสร้างได้เริ่มขึ้น การทำงานควรจะต้องดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุด จนกว่าการก่อสร้างจะแล้วเสร็จ การวางแผนการที่ดีจึงจะทำให้มีการชะงักของงานเกิดขึ้นน้อยที่สุด เครื่องจักรและบุคคลากรจะต้องมีความพร้อมตลอด 24 ชั่วโมงในการทำงาน

ค. การขนส่งวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากการก่อสร้างเขื่อน RCC ต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุเชื่อมประสานจะต้องถูกส่งมายัง

หน่วยงานอย่างสม่ำเสมอ และถ้ามีปัญหาเกี่ยวกับระบบการขนส่งก็จะต้องกองเก็บวัสดุเชื่อมประสานไว้มาก ๆ โดยปกติแล้วมักจะเผื่อเอาไว้ให้พอใช้ประมาณ 7 วัน

2.7 ขี้เถ้าแกลบ

2.7.1 บทนำ

ขี้เถ้าแกลบได้จากการนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิพอเหมาะแล้วบดให้ละเอียด สารประกอบหลักของขี้เถ้าแกลบคือซิลิกา การเผาที่อุณหภูมิพอเหมาะจะได้ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous) ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา การเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป ซิลิกาจะกลายเป็นผลึก (Crystal)ที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา

สารประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบที่สำคัญคือ ซิลิกาซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90% เมื่อผสมขี้เถาแกลบในปูนซีเมนต์ สารประกอบของขี้เถ้าแกลบจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ (Free Calcium Hydroxide)ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ แล้วได้เป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีการก่อตัวและแข็งตัวเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ การผสมขี้เถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งกับปูนซีเมนต์ นอกจากทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติใช้งานได้ดีแล้ว ยังทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีราคาถูกขึ้น

2.7.2 คุณสมบัติของแกลบเผา

ได้มีผู้ทำการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติของแกลบเผาซึ่งแต่ละบุคคลต่างก็ให้เหตุผลและได้ผลทดลองที่แตกต่างกัน พอจะจำแนกได้ดังต่อไปนี้

ก. Ashmon process โดยการนำเอาแกลบเผาที่ได้จากการเผา ที่ไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิซึ่งอาจได้จากแกลบที่นำไปเป็นเชื้อเพลิงไปผสมกับปูนขาวก็จะได้ Hydraulic cement ตามต้องการปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่ความละเอียดของแกลบเผา และปูนขาวอย่างไรก็ตามกำลังของปูนซีเมนต์ โดยวิธีการนี้มีค่าต่ำมาก (Kapur, 1979)

ข. CBRI process โดยการนำ lime sludge ที่ได้จากโรงงานน้ำตาลไปผสมกับแกลบปั้นเป็นก้อนกลม ๆ นำไปตากแห้งแล้วเผาในเตาเผา จากนั้นจึงนำไปบด ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์แบบนี้จะประกอบด้วยซิลิกา และคัลเซี่ยมออกไซด์อย่างละเท่ากัน และมีอลูมิเนียมออกไซด์ประมาณ 3% ปูนซีเมนต์ที่ได้โดยวิธีการนี้จะให้กำลังต่ำ(Cook, 1979)

ค. การเผาไหม้แกลบโดยการควบคุมขบวนการเผาไหม้

Metha (1979) ได้กล่าวว่าขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ธรรมดาจะได้ซิลิกาอยู่ในรูปของผลึก ซึ่งเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีไม่เหมาะที่จะนำมาทำปูนซีเมนต์ การเผาแกลบโดยไม่ได้ควบคุมขบวนการเผาไหม้ จะเป็นการทำลายโครงสร้างของเซลล์ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างที่อยู่ในรูปอสัณฐาน เป็นโครงสร้างที่อยู่ในรูปของผลึก จะเห็นได้ว่าเป็นการสูญเสียผลประโยชน์ในการที่จะนำซิลิกาที่เร็วต่อปฏิกิริยาเคมีไปผลิตเป็นปูนซีเมนต์ Yeoh และคณะ (1979) มีความเชื่อว่าขี้เถ้าแกลบที่อยู่ในรูปของอสัณฐาน ได้จากการเผาโดยการควบคุมขบวนการเผาไหม้ (Controlled burning) ซึ่งแกลบเผาที่อยู่ในรูปอสัณฐานเป็นตัวประกอบที่สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์

การนำแกลบไปเผาจะได้ขี้เถ้าแกลบเหลืออยู่ประมาณ 20 % ของน้ำหนักเดิม จากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าขี้เถ้าแกลบมมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงเกือบ 90% คุณสมบัติของขี้เถ้าแกลบจะแตกต่างกันตามอุณหภูมิและระยะการเผา (Cook ,1983) ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำจะมีสารอินทรีย์ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดเหลืออยู่มาก แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะได้ซิลิกาในรูปของผลึก (Crystal) ซึ่งบดละเอียดได้ยากและเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา การเผาแกลบในอุณหภูมิช่วง600-800 ° ซ ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิพอเหมาะจะทำให้แกลบที่เผาได้เป็นขี้เถ้าแกลบได้เป็นขี้เถ้าแกลบที่มีซิลิกาอยู่ในรูปอสันฐาน ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (บริญญา ,2529) นอกจากนี้ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของขี้เถ้าแกลบ ยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของขี้เถ้าแกลบ (Chindaprasirt, 1983)

ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 600-800 °ซ จะเป็นสีเทาขาว และขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีจะมีสีดำ (บริญญา, 2529) Chindaprasirt และ Hovichitr (1987) พบว่าขี้เถ้าแกลบเทาขาว และขี้เถ้าแกลบดำมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบเทาขาว และ ขี้เถ้าแกลบดำ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.10 Chindaprasirt และ Hovichitr (1987) แนะนำให้ใช้ขี้เถ้าแกลบดำในการแทนที่ปูนซิเมนต์เพราะขี้เถ้าแกลบดำไม่ต้องซื้อ จึงทำให้ต้นทุนมีเพียงค่าขนส่งและค่าบด ส่วนขี้เถ้าแกลบเทาขาวนอกจากค่าขนส่งและค่าบดแล้วยังต้องจ่ายเงินในการซื้อแกลบและค่าเผาเองทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซิเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ เทาขาว และ ขี้เถ้าแกลบดำ (บริญญา, 2529)

ส่วนประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี (%)		
	ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์	ขี้เถ้าแกลบเทาขาว	ขี้เถ้าแกลบดำ
CaO	60-67	0.5	0.5
Sio_2	17-25	88.3	89.9
Al_2O_3	3-8	0.5	0.5
Fe_2O_3	0.5-0.6	3.4	1.9
MgO	0.1-5.0	0.3	0.2
SO_3	1-3	0.1	1.5
Na_2	0.5-1.3	0.2	0.1
K_2O	0.5-1.3	2.8	1.5
การสูญเสียเนื่องจากการเผา	2.0	3.7	4.7

ง. ความละเอียดของแกลบเผา

ความละเอียดของขี้เถ้าแกลบ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่กำหนดคุณสมบัติของขี้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงกว่า ย่อมมีความสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าโดยทั่วไปความละเอียดสามารถกำหนดได้จาก

- พื้นที่ผิวจำเพาะที่หาค่าได้จากการทดสอบด้วย แอร์เพอร์มีอะบิลิตี (Air Permeability Test) หรือเทอร์บิดิมิเตอร์ (Turbidimeter Test) วัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นตารางเซนติเมตรต่อขี้เถ้าแกลบ 1 กรัม

- ร้อยละที่ผ่านตะแกรง (Sieve) เบอร์ 325

- เวลาที่ใช้ในการบดอัด

Farooq-e- Azam (1982) ; Lakho (1980) ; ปริญญา (2526)และพิชัย (2526) พบว่าขี้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น จะทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น ความต้องการน้ำของส่วนผสมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

จ. อิทธิพลของคาร์บอนในแกลบเผา

Cook และ Suwanvitaya (1981) ได้กล่าวไว้ว่าการเผาไหม้แกลบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส คาร์บอนที่เกิดขึ้นในแกลบเผาจะไปรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชัน การเผาไหม้แกลบที่อุณหภูมิ 600-650 องศาเซลเซียส จะได้คาร์บอน 6-14% ซึ่งเป็นปริมาณที่สามารถนำไปใช้งานได้

2.8 คุณสมบัติของขี้เถ้าลอย

2.8.1 บทนำ

การใช้ถ่านหินในการผลิตไฟฟ้า ทำให้เกิดขี้เถ้าเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก จึงได้มีความคิดที่จะนำเอาขี้เถ้าที่เป็นผงละเอียด ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีต งานทดลองค้นคว้าที่กระทำกันส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับขี้เถ้าลอยจากถ่านหินคุณภาพดี ซึ่งมีคุณสมบัติต่างไปจากขี้เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์ ส่วนของทฤษฎีตอนนี้จะกล่าวถึงขี้เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์

2.8.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของขี้เถ้าลอย

วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่สามารถทำปฏิกริยากับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ และก่อตัวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติซีเมนต์ ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยจะมี SiO_2,Al_2O_3,Fe_2O_3 และ CaO อยู่ในช่วง 41-58, 21-27, 4-17 และ4-6 เปอร์เซนต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 และ Si_2O_3 ซึ่งเมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง SiO_2 และ Al_3O_3 จะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเกิดขึ้น ดังสมการต่อไปนี้

$$2(3CaO.SiO_2)+6H_2O\text{----}> 3\ CaO.2SiO_2.3H_2O+3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O\text{----}> 3\ CaO.2SiO_2.3H_2O+3Ca(OH)_2$$

คัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ สามารถทำปฏิกริยากับซิลิกา (SiO) และอลูมินา (Al_2O_3) แล้วก่อตัวเป็นคัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท และคัลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรท ดังสมการ

$$3Ca(OH)_2+4SiO_2 \text{----}> 3\ CaO.2SiO_2.3H_2O$$

$$3(Ca(OH)_2+4Al_2O_3 \text{----}> 3\ CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

ได้มีการค้นพบเพิ่มเติมว่า รูปแบบของไฮเดรชันของปฏิกิริยาปอซโซลานในขี้เถ้าลอย มีลักษณะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่มีอัตราการเกิดปฏิกริยาช้ากว่า โดยทั่วไปปฏิกิริยาปอซโซลานของขี้เถ้าลอยจะสิ้นสุดลงเมื่ออายุประมาณ 3 เดือน และอาจล่าช้าไปถึง 1 ปี ซึ่งปฏิกิริยาขึ้นกับชนิดของปูนซีเมนต์และขี้เถ้าลอย

2.8.3 สิ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติปอซโซลานของขี้เถ้าลอย

ก. ส่วนประกอบทางเคมี

กำลังของคอนกรีตและมอร์ตาร์ เนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะลดลงเมื่อขี้เถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณคาร์บอน (Carbon) สูง ดรรชนีความเป็นปอซโซลานจะลดลงเมื่อปริมาณคาร์บอนในขี้เถ้าลอยมีค่ามากขึ้น เหตุที่

ปริมาณคาร์บอนในขี้เถ้าลอย มีผลทำให้กำลังของมอร์ตาร์ต่ำลงคือคาร์บอนจะเป็นตัวที่ทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำมากขึ้น และปริมาณคาร์บอนในขี้เถ้าลอยจะมีผลทำให้สารอื่น ๆ ที่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีปริมาณลดลง

ข. ความละเอียด

ความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีความเป็นปอซโซลาน จะเป็นแบบเชิงเส้นตรงกับพื้นที่ผิวของขี้เถ้าลอย ถ้าวัดโดยวิธีร่อนผ่านแร่งเบอร์ 325 พบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ในช่วงกลางที่ขี้เถ้าลอยไม่ละเอียด หรือหยาบเกินไปความสัมพันธ์ที่พบคือ ค่าดรรชนีความเป็นปอซโซลานเพิ่มขึ้น เมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น

ค. เฟสของขี้เถ้าลอย

เฟสที่สำคัญของขี้เถ้าลอยคือ ควอรทซ์ (Quartz), มูลไลต์ (Mullite) และแก้ว (Glass) ซึ่งซิลิกาอยู่ในรูปของควอรทซ์และแก้ว ส่วน Al_2O_3 อยู่ในรูปของมูลไลต์ และออกไซด์ที่เหลืออื่น ๆ จะอยู่ในรูปของแก้ว

2.8.4 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์

สมชัย (2536) ได้สรุปการศึกษาขี้เถ้าลอยลิกไนต์ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิกระแสไฟฟ้าที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

ก. ถ่านหินแม่เมาะ

ถ่านหินแม่เมาะเป็นถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ยุค Tertiary คือเมื่อประมาณ 10-70 ล้านปีก่อน ปัจจุบันพบว่ามันมีการสะสมตัวอยู่ภายในของหุบเขา โดยได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป การเคลื่อนไหวของผิวโลก แรงอัดที่ทำให้ผิวโลกเปลี่ยนแปลงไปทำให้การสะสมที่เกิดขึ้นจมไปอยู่ข้างล่าง จากอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ บนผิวโลกและการสะสมตัวในแต่ละสภาพแวดล้อมของสถานที่แต่ละแห่ง ทำให้คุณภาพของถ่านหิน ความหนาของชั้นหินขนาดหรือปริมาณของถ่านหินแตกต่างกันไป

ถ่านหินแม่เมาะเป็นการสะสมตัวของสิ่งต่าง ๆ ที่มีอยู่เดิมในแม่น้ำ ทะเลสาบ ห้วย หนอง จึงทำให้พบร่องรอยของซากสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวกับลำน้ำอยู่ในถ่านหินด้วย เมื่อมีการเคลื่อนตัวของพื้นโลกเกิดขึ้นทำให้แอ่งถ่านหินถูก

เลื่อนให้เคลื่อนที่แยกออกจากกัน

ข. การผสมและการลำเลียงถ่านลิกไนต์

เนื่องจากถ่านลิกไนต์ที่มีอยู่ในแอ่งแม่เมาะจะมีคุณภาพต่างกันไป จึงต้องมีการนำถ่านลิกไนต์ในบริเวณต่าง ๆ ผสมกัน เพื่อให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานของโรงไฟฟ้า โดยที่ไม่ต้องทิ้งถ่านหินลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนดให้เสียไปโดยเปล่าประโยชน์

ก่อนที่จะทำการผสมถ่านลิกไนต์ให้ได้คุณภาพตามต้องการ จะต้องมีการสุ่มตัวอย่างของถ่านหินที่จะใช้ในแต่ละบริเวณมาวิเคราะห์คุณภาพ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณหาสัดส่วนที่ต้องใช้ผสมกัน เมื่อทราบว่าต้องใช้ถ่านหินลิกไนต์บริเวณไหน จำนวนเท่าไรแล้ว ก็ตักถ่านหินลิกไนต์ในแต่ละบริเวณนั้นใส่รถบรรทุกขนาด 50 ตัน เพื่อขนส่งไปยัง Primary Crusher House แล้วเทถ่านหินลิกไนต์ในแต่ละคันรถจากแต่ละบริเวณสลับกันลงไปบดให้ได้ขนาดน้อยกว่า 30 ซม. จากนั้นลำเลียงตามสายพานไปยังลานกองถ่าน (Stock Pile) ซึ่งจะโปรยถ่านลงมากองเป็นชั้น ๆ เมื่อต้องการใช้งานก็จะใช้เครื่องตัก ตักเอาถ่านหินลิกไนต์ในแต่ละส่วนสลับการลำเลียงไปตามสายพานเข้าสู่ Distribution Bunker แล้วลำเลียงถ่านหินลิกไนต์ผ่านเครื่องคัดแยกเหล็ก (Iron Seperator) ลำเลียงต่อไปยัง Secondary Crusher House เพื่อบดถ่านหินลิกไนต์ให้มีขนาดเล็กกว่า 3 ซม. แล้วจึงลำเลียงตามสายพานเข้าสู่โรงไฟฟ้า ซึ่งโรงไฟฟ้าแต่ละโรงจะมีเครื่องบดละเอียด (Pulverizer) บดถ่านหินลิกไนต์ก่อนส่งเข้าเตาเผาต่อไป

ค. เถ้าลิกไนต์

ถ่านลิกไนต์เมื่อถูกบดให้ละเอียด และ ส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ที่มีอากาศเพียงพอ การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้ เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ในรูปของออกไซด์ของโลหะหลายชนิดที่ซับซ้อน เช่น หินโคลน(Shale) ดินเหนียว (Clay) สารประกอบกำมะถัน, สารประกอบคาร์บอเนต โดยสรุปเถ้าลิกไนต์ที่ได้จะมี 2 สภาพคือ

1. เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควันและถูกจับไว้ที่ Electrostatic Precipitator แล้วถูกรวบรวมไว้ใน Ash Hopper คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

2. เถ้าหนัก (Bottom Ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป (Combustion Zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกันเป็นเม็ด หรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา บางส่วนของเถ้าจะปะทะกับผนังเตา และหลอมติดกันรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่า Slag เมื่อน้ำหนักรวมตัวกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นตกลงสู่ก้นเตา

ค. <u>องค์ประกอบเถ้าลิกไนต์</u>

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเถ้าลิกไนต์นั้นเป็นการยากมากที่จะแยกธาตุแต่ละชนิดให้ออกมาเป็นปริมาณหรือธาตุเดี่ยว ๆ โดยอาศัยวิธีทางกายภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาธาตุโดยอาศัยวิธีทางเคมีในรูปของร้อยละของออกไซด์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.11

2.9 <u>กำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย</u>

2.9.1 <u>กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์</u>

Damer (1976) พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีขี้เถ้าแกลบร้อยละ 0-50 จะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28-90 วันจะสูงกว่าปูนซีเมนต์ล้วน อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ของส่วนผสม จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นและมีค่าตั้งแต่ 0.30-0.65

Mehta (1979) พบว่าสำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์คงที่ สามารถใช้ขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ได้มากถึงร้อยละ 70 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่าเดิม และมอร์ตาร์ที่มีค่าการไหลคงที่สามารถใช้ขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 40 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28-90 วันเท่าเดิม (Lea, อ้างถึงโดย Cook และ Suwanvitaya, 1981; Damer, 1976 และ Chindaprasirt, 1983)

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติทางเคมีของขี้เถ้าลอยในรูปของร้อยละของออกไซด์ (สมชัย, 2536)

MONTH	COMPOSITION (%)								Total		Slagging Index	Fouling Index
	SiO2	AL2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	SO3	Acid	Base		
JAN	46.96	26.40	12.04	7.79	2.08	1.83	0.64	2.25	73.36	24.38	1.05	0.212
FEB	50.70	24.54	12.11	0.87	1.01	1.97	0.34	2.26	75.24	22.30	0.99	0.106
MAR	44.40	22.61	14.27	9.91	1.49	2.01	0.52	3.80	67.01	28.20	1.49	0.220
APR	42.87	22.88	16.12	9.80	1.72	2.06	0.50	3.54	65.75	30.20	2.01	0.227
MAY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JUN	40.35	22.94	14.34	12.41	2.63	2.47	1.07	3.52	63.29	22.92	1.95	0.557
JUL	40.63	23.70	16.20	11.10	2.60	2.34	0.83	3.60	64.33	33.07	1.90	0.415
AUG	39.56	20.47	14.65	15.01	3.09	2.14	1.14	3.94	60.03	36.03	2.16	0.685
SEP	38.22	21.23	15.15	14.24	3.16	2.13	1.37	4.85	59.45	36.05	2.25	0.828
OCT	37.77	22.30	14.38	14.34	3.27	2.42	1.09	4.43	60.07	35.50	1.51	0.645
NOV	41.80	22.04	12.61	13.46	3.05	2.32	0.92	3.80	63.84	32.36	1.87	0.464
DEC	43.98	24.95	13.71	9.37	2.34	2.66	0.73	2.26	68.93	28.81	1.79	0.305
AVG	42.48	23.10	14.14	11.30	2.40	2.21	0.83	3.84	65.57	30.89	1.72	0.424

จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย Brink และ Halstead (1956) พบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยได้มากถึงร้อยละ 50 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 365 วัน มีค่าเท่าเดิม Pinnarat (1984) ก็พบว่าสามารถผสมขี้เถ้าลอยร้อยละ 40 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 180 วัน ต่ำกว่าปูนซิเมนต์เพียงเล็กน้อย

จากการศึกษาของบริญญาและอินทรชัย (2530) พบว่ามอร์ต้าที่ทำจากปูนซิเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ และขี้เถ้าลอยในอัตราส่วนที่พอเหมาะจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าที่ทำจากปูนซิเมนต์บอร์ตแลนด์ ผสมขี้เถ้าแกลบหรือขี้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียว โดยที่ปริมาณปูนซิเมนต์บอร์ตแลนด์เท่ากัน

2.9.2 <u>กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต</u>

Farooq-e-Azam (1982) พบว่าเมื่อความละเอียดของขี้เถ้าแกลบเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าแกลบเพิ่มขึ้น การศึกษาได้ใช้ขี้เถ้าแกลบที่ผ่านแร่งเบอร์ 325 จำนวนร้อยละ 75, 85, 90 และ 95 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.72 และ 0.81 การศึกษาของ Damer (1976) พบว่าขี้เถ้าแกลบสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้มากถึงร้อยละ 20 โดยไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมากนัก

Berry และ Malhotra (1980) พบว่าคอนกรีตที่ใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ที่อายุ 1 ปีกำลังรับแรงจะสูงกว่า Lane และ Best (1982) ใช้ขี้เถ้าลอยแทนมวลละเอียดและพบว่าคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ จะมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ถ้าใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตรา 2 - 3 เท่าโดยน้ำหนัก และ มวลละเอียดลดลงตามสัดส่วนที่ขี้เถ้าลอยเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ28 วันมีค่าเท่ากับคอนกรีตธรรมดาโดยปริมาณแต่ที่อายุ 90 วันกำลังจะสูงกว่า

2.9.3 กำลังรับแรงดึง

จากการศึกษากำลังรับแรงดึงแยก (Splitting Tensile Strength) ของคอนกรีตผสมขี้เถ้าแกลบ Damer (1976) พบว่ากำลังรับแรงดึงแยก จะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของขี้เถ้าแกลบ และอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ การศึกษาของ Columna (อ้างถึงใน Damer, 1976) ก็เป็นผลเช่นเดียวกันนอกจากนี้ Farooq-e-Azam ยังพบว่าการเพิ่มความละเอียดของขี้เถ้าแกลบจะเพิ่มกำลังรับแรงดึง การทดลองคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยของ Haque และ คณะ (1984) ก็ได้ผลเช่นเดียวกับคอนกรีตผสมขี้เถ้าแกลบ และการทดสอบโดยวิธีหาค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture) ก็ได้ผลในลักษณะเดียวกัน จากการศึกษาของ ปริญญาและอินทรชัย (2530) พบว่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าที่มีอัตราส่วน ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ :ขี้เถ้าลอย เป็น 20:40:40 , 40:40:20 และ 60:20:20 ที่อายุ 56 วันมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าที่ทำจากปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน