# บทที่ 3
# การทดสอบและการหาสัดส่วนผสม

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติและขนาดคละของมวลรวม

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาข้อมูลตัวอย่างมวลรวมที่ใช้อยู่จริงในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในปัจจุบัน ซึ่งตัวอย่างทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ ที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อย ๆ ตกตะกอน สะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ และใช้เรือดูดทรายขึ้นมา ผ่านตะแกรงและทำความสะอาดก่อนนำมาใช้งาน จากแหล่งทราย จังหวัดกาญจนบุรี ส่วนหินที่ใช้เป็นหินปูน ที่ได้จากการโม่หิน ในโรงงานผลิตจากแหล่งหิน จังหวัดสระบุรีและราชบุรี ซึ่งได้จากการระเบิดภูเขาหินปูน และนำหินที่ได้จากการระเบิดเข้าสู่เครื่องโม่ในขั้นตอนแรก ( Jaw Crusher ) เพื่อย่อยหินให้มีขนาดเล็กลง และผ่านตะแกรงคัดขนาด แล้วนำหินที่ใหญ่กว่าขนาดที่ต้องการ ลำเลียงเข้าสู่เครื่องโม่ในขั้นตอนที่ 2 ( Cone Crusher ) เพื่อโม่หินให้มีขนาดตามที่ต้องการ เกือบทั้งหมด และนำหินผ่านยังตะแกรงร่อนเพื่อคัดขนาดที่ต้องการไว้ สำหรับนำไปใช้ในงานต่อไป

มวลรวมที่ใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จในปัจจุบันโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นทรายที่ใช้ในการผสมคอนกรีตซึ่งโดยทั่วไปมักไม่แยกขนาดของทราย การนำมาใช้มักควบคุมให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดขนาดคละมาตรฐานและมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Finess Modulus) อยู่ในช่วงที่กำหนดคือ 2.25-3.25 ส่วนมวลรวมหยาบหรือหินย่อยที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตจะแบ่งกลุ่มออกตามขนาดใหญ่สุดของหิน (Maximum Size of Aggregate ) ตั้งแต่ 1 1/2", 1", 3/4", 1/2" และ3/8" ซึ่งขนาดหินที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตคุณภาพสูงควรมีขนาดตั้งแต่ 3/4" ลงไป ในการใช้งานคอนกรีตสำหรับโครงสร้างทั่วไปมักจะใช้หินขนาด 3/4" เป็นหลักและควบคุมให้มีขนาดคละเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน

การเก็บข้อมูลขนาดคละของมวลรวมในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136 โดยเก็บตัวอย่างจากกองวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีการหมุนเวียนตัวอย่างเข้ามาทดแทนวัสดุเดิมทุกวัน โดยนำตัวอย่างนั้นมาผ่านตะแกรงร่อนเพื่อวิเคราะห์หาค่าขนาดคละของมวลรวม และเปอร์เซนต์ผ่านที่ตะแกรงเบอร์ต่างๆ แล้วนำมาเก็บรวบรวมเป็นข้อมูลในเชิงสถิติของเปอร์เซนต์ผ่านแต่ละตะแกรงและหาค่าเฉลี่ย,ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความแปรปรวนของกลุ่มข้อมูล

3.1.1 การทดสอบหาค่าขนาดคละของมวลรวม ( Sieve Analysis Test ) เป็นการทดสอบหาการกระจายขนาดและส่วนคละของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM 136 ( Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates ) อุปกรณ์ประกอบด้วย ตะแกรงมาตรฐาน ช่องเปิดสี่เหลี่ยมจตุรัส , เครื่องร่อนตะแกรง ( Sieve Shaker ) , เตาอบ , เครื่องชั่งน้ำหนัก วิธีการทดสอบทำได้โดย นำตัวอย่างตามปริมาณที่กำหนดตามมาตรฐาน มาชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบจนมีน้ำหนักคงที่ตามกำหนด จากนั้นนำมาใส่ใน

ตะแกรงที่จัดตามขนาดไว้แล้วในเครื่องร่อนตะแกรงแล้วทำการร่อน จากนั้นนำมวลรวมที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรง แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงขนาดคละของมวลรวม

3.1.2 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวม ( Unit Weigth and Voids of Aggregate ) เป็นการทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนัก และปริมาณช่องว่างของวัสดุผสมตามมาตรฐาน ASTM C29 ( Test Method for Unit Weigth and Voids in Aggregate ) อุปกรณ์ประกอบด้วย ถังตวงวัสดุ รูปทรงกระบอกโลหะ , เหล็กกระทุ้งปลายมน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 60 ซม. , เครื่องชั่งน้ำหนัก วิธีการทดสอบกระทำได้โดยนำวัสดุมวลรวมจากการสุ่มตัวอย่างมาอบแห้งจนมีน้ำหนักคงที่ ทำการหาขนาดความจุของถังตวงโดยใช้น้ำเติมเต็มแล้วชั่งน้ำหนัก หารด้วยหน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิขณะนั้น นำมวลรวมใส่ลงในถังตวงเปล่า แบ่งเป็นสามชั้น ในแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง ชั้นสุดท้ายปาดหน้าให้เรียบ จากนั้นจึงหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมในถังตวงจากน้ำหนักของมวลรวมหารด้วยปริมาตรของถังตวง

จากสมการ $\gamma_t = w/v$

เมื่อ $\gamma_t$ = หน่วยน้ำหนักของมวลรวม , กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

w = น้ำหนักของมวลรวม , กิโลกรัม

v = ปริมาตรของมวลรวม , ลูกบาศก์เมตร

และสามารถหาปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมได้จากสมการ

$$\text{Void } \% = ( G\gamma_w - \gamma_t)*100/G\gamma_w$$

เมื่อ G = ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมในสภาพแห้ง

$\gamma_w$ = หน่วยน้ำหนักของน้ำ , กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.1.3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึม เป็นการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127 , ASTM C128 ( Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse and Fine Aggregate ) อุปกรณ์ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก , ตะกร้าลวดตาข่าย , ถังน้ำขนาดใหญ่ , ตู้อบ วิธีการทดสอบกระทำได้โดย นำตัวอย่างที่ทดสอบล้างและอบจนน้ำหนักคงที่ แล้วแช่น้ำไว้ 24 ชม. จากนั้นนำมาเช็ดให้แห้ง ทำการชั่งน้ำหนัก แล้วนำมวลรวมใส่ในตะกร้าลวดทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ ต่อจากนั้นนำตัวอย่างไปอบ แล้วจึงชั่งน้ำหนักแห้งสนิทอีกครั้งหนึ่ง ค่าความถ่วงจำเพาะสามารถหาได้ดังนี้

| | |
|---|---|
| ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแห้ง ( Oven Dry ) | = A/(B-C) |
| ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิ่มตัวผิวแห้ง ( Saturated Surface Dry ) | = B/(B-C) |
| ความถ่วงจำเพาะ ที่ปรากฏ ( Apparant ) | = A/(A-C) |
| ค่าการดูดซึมน้ำ (Percent Absorption ) | = (B-A)*100 /A |

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้งชั่งในอากาศ , กรัม
B = น้ำหนักของตัวอย่างที่จุดอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ , กรัม
C = น้ำหนักของตัวอย่างชั่งในน้ำ , กรัม

สำหรับการทดสอบของมวลรวมละเอียด อุปกรณ์ประกอบด้วย ขวดหา ถ.พ. ( Volumetric Flask ) ขนาด 500 มิลลิลิตร , เครื่องชั่ง , แบบหล่อโลหะรูปกรวยหัวตัด วิธีการทดสอบกระทำได้โดย นำตัวอย่างทรายในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง จำนวน 500 กรัม เทใส่ลงในขวด Volumetric Flask 500 มิลลิลิตร แล้วนำน้ำสะอาดเติมใส่ลงไป ทำการไล่ฟองอากาศจากตัวอย่างทราย เติมน้ำให้พอดีขีด 500 มิลลิลิตร แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างทรายออกไปอบจนมีน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก โดยค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดสามารถหาได้ดังนี้

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแห้ง ( Oven Dry ) = A/(D+B-C)
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิ่มตัวผิวแห้ง ( Saturated Surface Dry ) = B/(D+B-C)
ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ ( Apparent ) = A/(D+A-C)

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง , กรัม
B = น้ำหนักตัวอย่างที่จุดอิ่มตัวผิวแห้ง , กรัม
C = น้ำหนักขวดหา ถ.พ. รวมทั้งน้ำและทรายในขวด , กรัม
D = น้ำหนักขวดหา ถ.พ. รวมทั้งน้ำ , กรัม

ค่าการดูดซึมน้ำ ( Percent Absorption ) = (B-A)*100/A

3.1.4 การทดสอบหาค่าความทนทานต่อการขัดสี เป็นการทดสอบเพื่อหาความทนทานของวัสดุมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C131 ( Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in The Los Angeles Machine ) โดยอุปกรณ์ การทดสอบประกอบด้วย เครื่องทดสอบ Los Angeles Machine , ลูกเหล็กสำหรับการขัดสี , เครื่องชั่งน้ำหนัก ตะแกรงมาตรฐาน ( Sieve ) วิธีการทดสอบกระทำได้โดย นำตัวอย่างไปล้างแล้วอบแห้ง จากนั้นจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเพื่อจัดขนาดคละที่ถูกต้องและหาน้ำหนักที่ใช้ทดสอบตามข้อกำหนด เมื่อชั่งน้ำหนักรวมของตัวอย่างแล้งใส่ตัวอย่างพร้อมลูกเหล็กลงในเครื่องทดสอบ แล้วปล่อยให้หมุนไปตามจำนวนรอบ หลังจากนั้นนำวัสดุมวลรวมออกมาร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 แล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงไปล้างและอบแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าเปอร์เซนต์การสึกกร่อน สามารถหาได้ดังนี้

เปอร์เซนต์การสึกกร่อน ( Percentage of Wear ) = (A-B)*100/A

เมื่อ A = น้ำหนักของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบทั้ง หมด , กรัม
B = น้ำหนักของมวลรวมหยาบที่ค้างบนตะแกรงร่อนเบอร์ 12 , กรัม

3.2 การหาขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวม

จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมพบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลมีแนวโน้มของขนาดคละของมวลรวมค่อนข้างหยาบ โดยมีค่าเฉลี่ย โมดูลัสความละเอียด ( Finess Modulus ) เท่ากับ 3.10 และ 6.82 สำหรับมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบตามลำดับ โดยทรายมีค่าเฉลี่ยของข้อมูลอยู่ในช่วงขอบเขตกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C33 ส่วนหิน 3/4" มีค่าเฉลี่ยของข้อมูลอยู่ในช่วงขอบเขตล่างของมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในกราฟซึ่งพบว่าขนาดคละของหิน 3/4" ที่ใช้งานอยู่จริงมีลักษณะหยาบ ซึ่งไม่เหมาะสมนักสำหรับใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตคุณภาพสูงซึ่งต้องการขนาดคละที่เหมาะสม ดังนั้นอาจพิจารณาปรับปรุงขนาดคละของหิน 3/4" ให้เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C33 ได้โดยใช้วิธีการผสมหิน 3/8" เพิ่มในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นเดียวกันกับในกรณีที่พบว่าทรายหยาบมากเกินไปก็อาจใช้การผสมทรายละเอียดเพิ่มในอัตราส่วนที่เหมาะสมเช่นกัน

3.2.1 การรวมขนาดคละ ( Combined Gradation ) ของมวลรวมเพื่อปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมหยาบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 สามารถทำได้โดยใช้หิน 3/4" ผสมกับหินกลุ่มอื่นที่มีขายในท้องตลาด

ตารางที่ 3.1 แสดงการรวมขนาดคละของมวลรวมหยาบ

| Sieve no. | Percent Passing by weigth | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | MSA 3/8" 40% | MSA 3/4" 60% | Agg(40/60) | Specification ASTM C 33 | |
| | | | | Max | Min |
| 3/4" | 99.90 | 97.77 | 98.62 | 90 | 100 |
| 3/8" | 94.32 | 16.79 | 47.80 | 20 | 55 |
| 4 | 5.99 | 1.07 | 3.04 | 0 | 10 |
| 8 | 0.82 | 0.61 | 0.69 | 0 | 5 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | | |
| 30 | 0 | 0 | 0 | | |
| 50 | 0 | 0 | 0 | | |
| 100 | 0 | 0 | 0 | | |
| 200 | 0 | 0 | 0 | | |

เช่นหิน 1/2" และหิน 3/8" ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงส่วนผสมของมวลรวมหยาบโดยใช้หิน 3/4" ผสมกับหิน 3/8" ในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 ( 3/4" = 60 % , 3/8" = 40 % ) ซึ่งค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลขนาด

คละของหิน 3/8" แสดงอยู่ในตารางภาคผนวกโดยเมื่อทำการรวมขนาดคละแล้ว จะได้ขนาดคละของหินเป็นไปตามขนาดคละที่กำหนด

เมื่อทำการปรับปรุงขนาดคละ ( Gradation ) ของมวลหยาบ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่อ้างอิงได้แล้ว การพิจารณาปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมหินทราย ให้เป็นไปตามขอบเขตขนาดคละแนะนำตามมาตรฐานดังที่กล่าวในตอนต้นในบทที่ 2 ก็สามารถพิจารณาได้ในลักษณะเปอร์เซนต์ของทรายที่ผสม (Percentage of Sand) หรืออาจเรียกโดยทั่วไปว่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (Sand by Aggregate Ratio) โดยสัดส่วนของทรายต่อหินที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงขนาดคละ พบว่าควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.40-0.50 เนื่องจากจะทำให้ขนาดคละของมวลรวมหินทรายมีการไล่เรียงขนาดคละให้อยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานข้างต้น รวมทั้งลดปริมาณช่องว่างในส่วนผสม ( Minimum Voids Content ) ซึ่งการรวมขนาดคละของมวลรวมหินทรายแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2 โดยเมื่อทำการพล๊อตกราฟขนาดคละของมวลรวมหินทรายที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวมต่าง ๆ กัน จะพบว่า ขนาดคละที่ได้จะยังคงอยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนดไว้ในตอนต้น

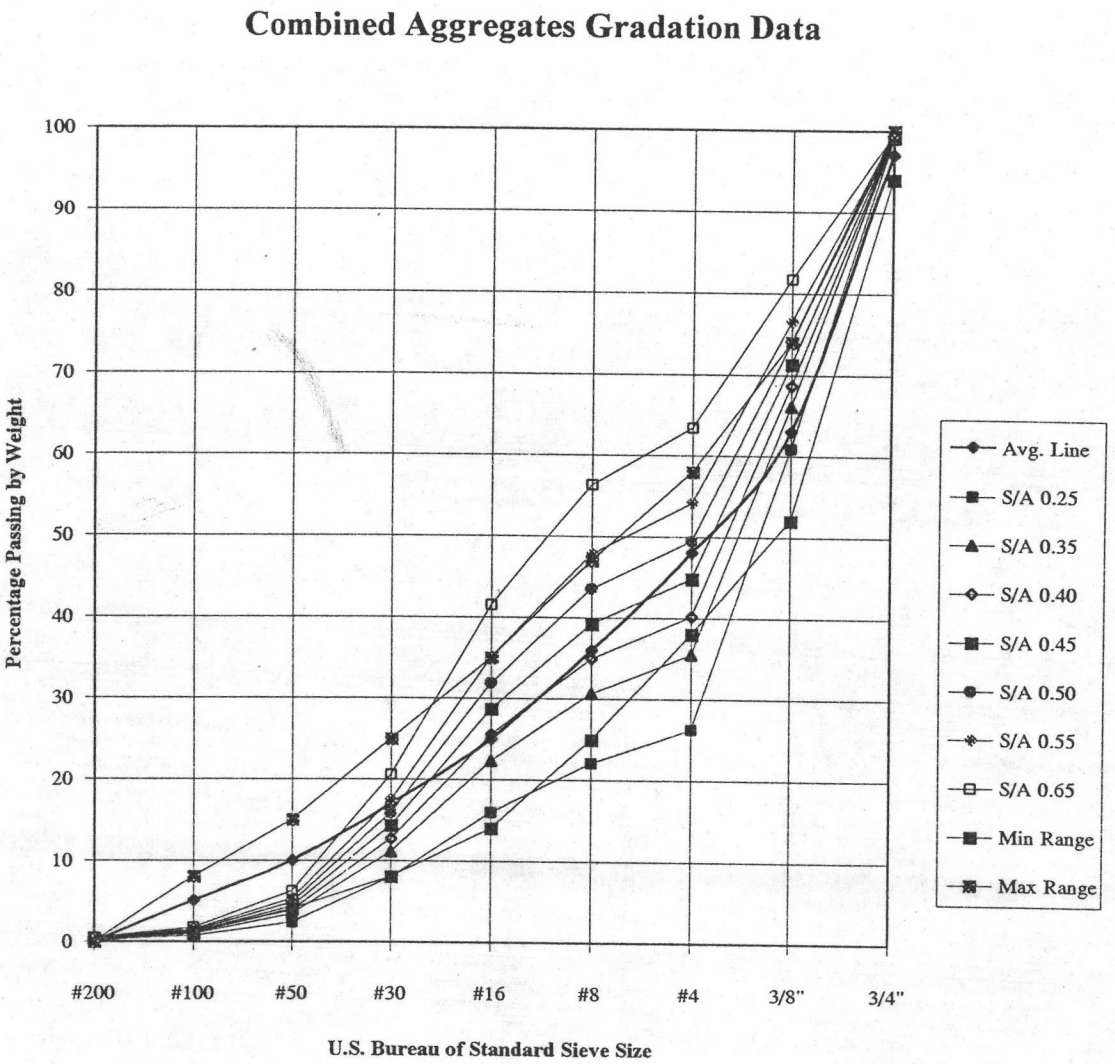
ตารางที่ 3.2 แสดงการรวมขนาดคละของมวลรวมหินทราย

| Sieve no. | Percent Passing by weight | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Avg. Data Sand 35% | Combine Coarse Agg. 65% | Combine S/A | Req. |
| 3/4" | 100 | 98.62 | 99.10 | 100 |
| 3/8" | 100 | 47.80 | 66.07 | 68 |
| 4 | 95.87 | 3.04 | 35.53 | 48 |
| 8 | 86.31 | 0.69 | 30.66 | 37 |
| 16 | 63.81 | 0 | 22.33 | 26 |
| 30 | 31.68 | 0 | 11.09 | 16 |
| 50 | 9.54 | 0 | 3.34 | 8 |
| 100 | 2.69 | 0 | 0.94 | 3 |
| 200 | 0.68 | 0 | 0.24 | 0 |

| Sieve no. | Percent Passing by weight | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Avg. Data Sand 55% | Combine Coarse Agg. 45% | Combine S/A | Req. |
| 3/4" | 100 | 98.62 | 99.38 | 100 |
| 3/8" | 100 | 47.80 | 76.51 | 68 |
| 4 | 95.87 | 3.04 | 54.10 | 48 |
| 8 | 86.31 | 0.69 | 47.78 | 37 |
| 16 | 63.81 | 0 | 35.10 | 26 |
| 30 | 31.68 | 0 | 17.42 | 16 |
| 50 | 9.54 | 0 | 5.25 | 8 |
| 100 | 2.69 | 0 | 1.48 | 3 |
| 200 | 0.68 | 0 | 0.37 | 0 |

| Sieve no. | Percent Passing by weight | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Avg. Data Sand 45% | Combine Coarse Agg. 55% | Combine S/A | Req. |
| 3/4" | 100 | 98.62 | 99.24 | 100 |
| 3/8" | 100 | 47.80 | 71.29 | 68 |
| 4 | 95.87 | 3.04 | 44.81 | 48 |
| 8 | 86.31 | 0.69 | 39.22 | 37 |
| 16 | 63.81 | 0 | 28.71 | 26 |
| 30 | 31.68 | 0 | 14.26 | 16 |
| 50 | 9.54 | 0 | 4.29 | 8 |
| 100 | 2.69 | 0 | 1.21 | 3 |
| 200 | 0.68 | 0 | 0.31 | 0 |

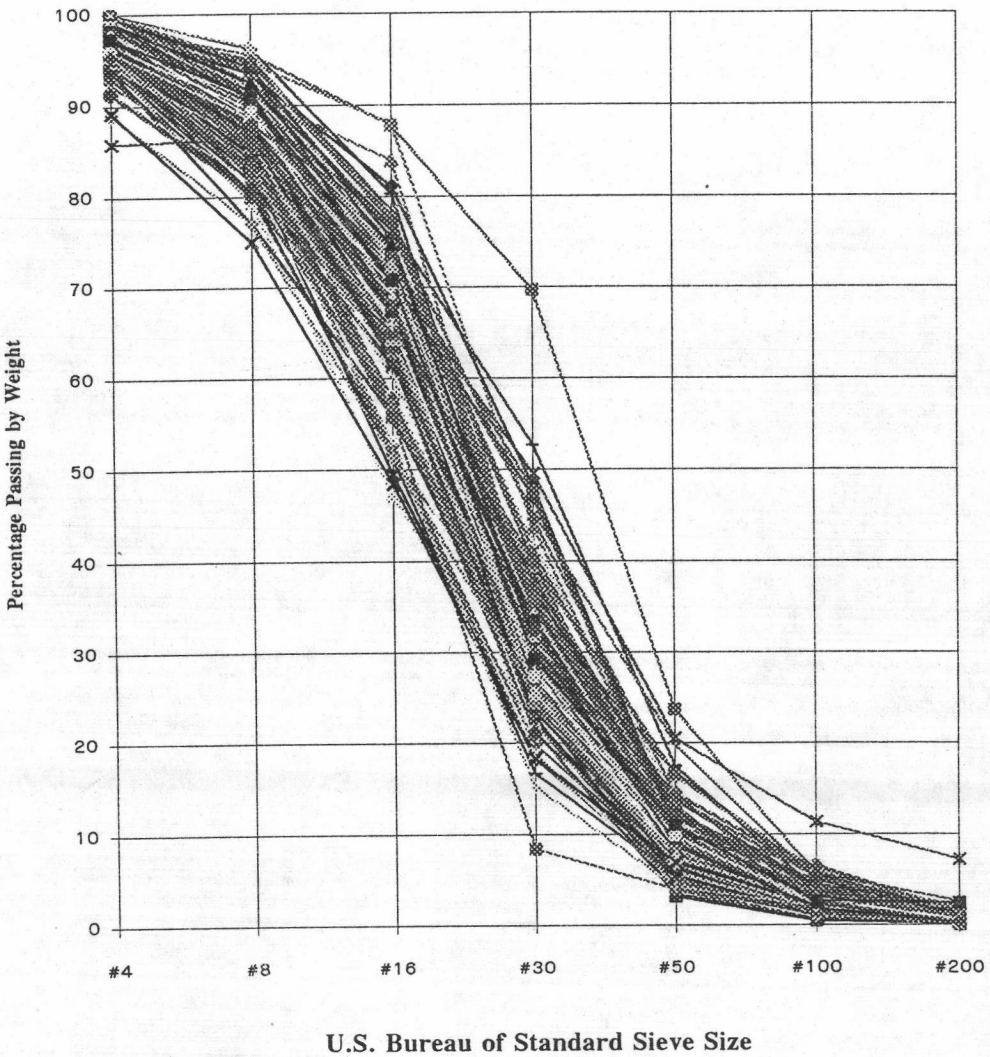
| Sieve no. | Percent Passing by weight | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Avg. Data Sand 65% | Combine Coarse Agg. 35% | Combine S/A | Req. |
| 3/4" | 100 | 98.62 | 99.52 | 100 |
| 3/8" | 100 | 47.80 | 81.73 | 68 |
| 4 | 95.87 | 3.04 | 63.38 | 48 |
| 8 | 86.31 | 0.69 | 56.34 | 37 |
| 16 | 63.81 | 0 | 41.48 | 26 |
| 30 | 31.68 | 0 | 20.59 | 16 |
| 50 | 9.54 | 0 | 6.20 | 8 |
| 100 | 2.69 | 0 | 1.75 | 3 |
| 200 | 0.68 | 0 | 0.44 | 0 |




รูปที่ 3.1 แสดงขนาดคละของมวลรวมหินทรายที่ S/A Ratio ต่างกัน

ตารางที่ 3.3 การเก็บข้อมูลขนาดคละของมวลรวมละเอียด

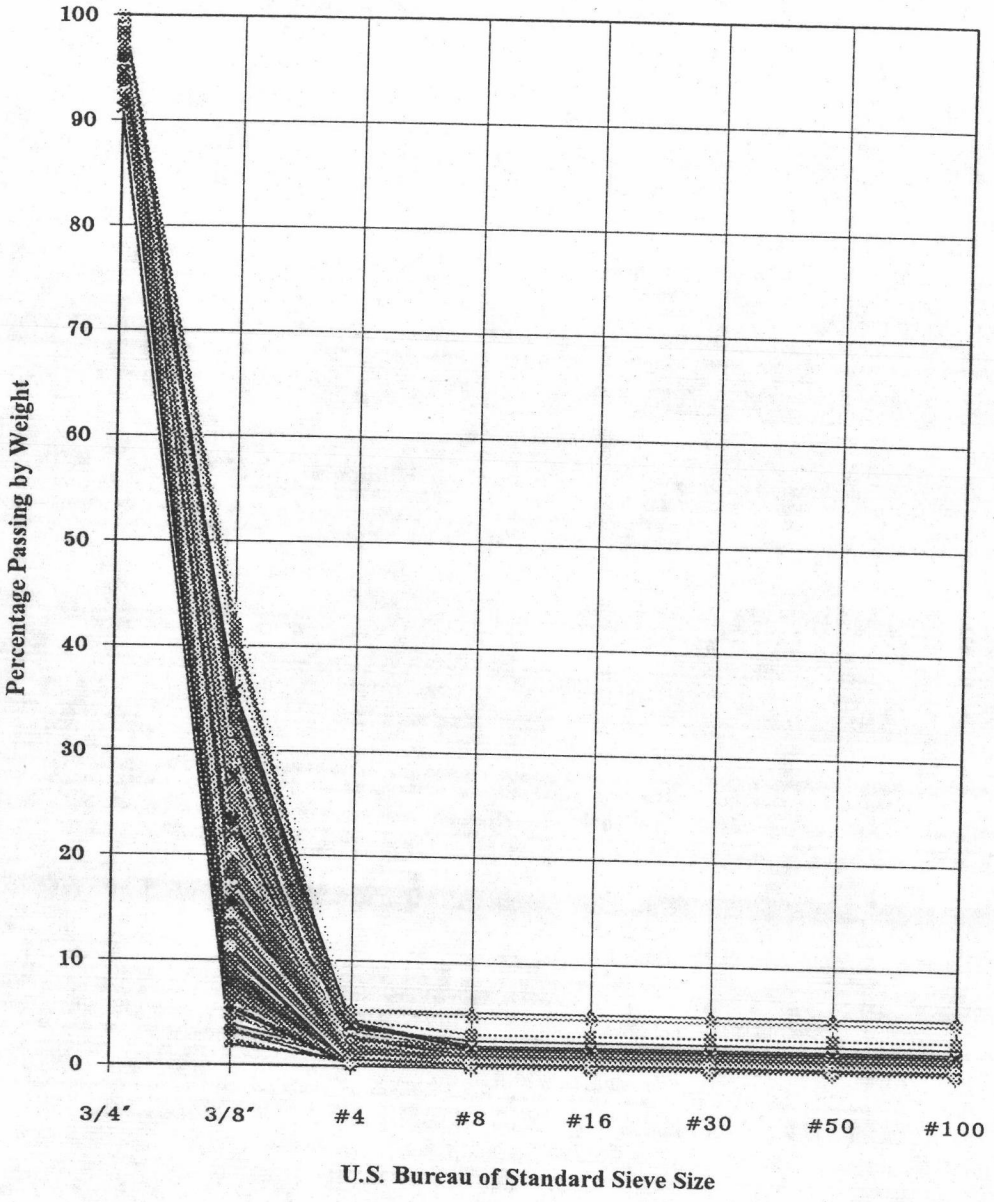
| Date | Percent Passing by Weight of Sand | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | No 4 | No 8 | No 16 | No 30 | No 50 | No 100 | No 200 |
| 16/04/1994 | 99.94 | 94.11 | 69.78 | 26.18 | 4.33 | 1.02 | 0.40 |
| 18/04/1994 | 94.15 | 85.01 | 57.85 | 21.34 | 3.41 | 0.64 | 0.10 |
| 20/04/1994 | 85.81 | 86.33 | 62.62 | 27.48 | 5.36 | 1.31 | 0.30 |
| 22/04/1994 | 98.08 | 89.56 | 68.41 | 25.27 | 4.67 | 1.13 | 0.15 |
| 23/04/1994 | 98.79 | 87.73 | 62.92 | 27.90 | 7.88 | 2.53 | 0.53 |
| 25/04/1994 | 97.36 | 88.63 | 69.15 | 29.60 | 7.93 | 2.34 | 0.35 |
| 26/04/1994 | 97.81 | 88.81 | 70.24 | 30.69 | 8.48 | 2.97 | 0.45 |
| 27/04/1994 | 96.36 | 87.20 | 67.19 | 29.93 | 7.72 | 2.30 | 0.32 |
| 28/04/1994 | 96.44 | 88.28 | 68.58 | 32.85 | 9.48 | 2.37 | 2.02 |
| 03/05/1994 | 96.38 | 87.01 | 67.30 | 32.89 | 6.29 | 1.65 | 0.21 |
| 04/05/1994 | 97.97 | 89.92 | 68.89 | 34.09 | 9.69 | 2.24 | 0.29 |
| 05/05/1994 | 97.66 | 88.26 | 68.19 | 35.89 | 9.83 | 2.25 | 0.44 |
| 09/05/1994 | 95.34 | 84.43 | 62.11 | 25.67 | 9.75 | 2.42 | 0.73 |
| 10/05/1994 | 99.02 | 90.71 | 67.90 | 33.44 | 8.70 | 1.93 | 0.32 |
| 11/05/1994 | 95.26 | 88.52 | 61.90 | 30.35 | 14.45 | 5.67 | 2.56 |
| 12/05/1994 | 96.19 | 84.59 | 68.04 | 22.59 | 5.44 | 1.12 | 0.82 |
| 14/05/1994 | 94.18 | 84.01 | 70.96 | 46.93 | 10.46 | 4.98 | 0.98 |
| 15/05/1994 | 95.83 | 86.67 | 73.27 | 47.65 | 8.75 | 3.99 | 0.65 |
| 17/05/1994 | 96.78 | 88.41 | 64.30 | 31.11 | 6.90 | 1.54 | 0.76 |
| 19/05/1994 | 99.95 | 94.56 | 77.78 | 36.26 | 8.94 | 3.41 | 1.08 |
| 20/05/1994 | 96.65 | 88.60 | 57.18 | 24.59 | 8.04 | 1.82 | 0.36 |
| 21/05/1994 | 91.24 | 80.76 | 64.91 | 32.33 | 10.16 | 1.58 | 0.65 |
| 23/05/1994 | 96.59 | 89.54 | 65.89 | 27.85 | 7.51 | 2.55 | 0.62 |
| 25/05/1994 | 94.28 | 85.90 | 60.06 | 29.35 | 9.11 | 1.91 | 0.39 |
| 26/05/1994 | 96.59 | 88.13 | 61.80 | 23.52 | 6.59 | 1.42 | 0.22 |
| 27/05/1994 | 88.84 | 77.00 | 51.35 | 25.35 | 6.72 | 1.08 | 0.17 |
| 02/06/1994 | 95.73 | 85.74 | 55.77 | 8.40 | 3.95 | 1.61 | 0.20 |
| 03/06/1994 | 99.75 | 96.38 | 72.31 | 25.49 | 7.48 | 2.53 | 0.24 |
| 04/06/1994 | 89.15 | 75.02 | 48.40 | 18.27 | 6.88 | 2.22 | 0.32 |
| 06/06/1994 | 96.09 | 86.69 | 68.04 | 30.40 | 9.79 | 1.31 | 0.17 |
| 07/06/1994 | 95.89 | 88.53 | 70.08 | 27.21 | 9.79 | 2.24 | 0.29 |
| 08/06/1994 | 95.04 | 83.74 | 52.83 | 15.21 | 4.22 | 2.04 | 0.49 |
| 10/06/1994 | 95.30 | 88.13 | 67.09 | 37.76 | 12.77 | 2.31 | 0.24 |
| 11/06/1994 | 99.58 | 94.14 | 75.35 | 30.90 | 9.02 | 1.82 | 0.24 |
| 13/06/1994 | 95.33 | 87.95 | 77.16 | 44.54 | 14.38 | 2.56 | 0.25 |
| 15/06/1994 | 97.29 | 90.95 | 70.73 | 29.21 | 10.96 | 2.63 | 2.42 |
| **Avg** | **96.09** | **86.83** | **64.85** | **30.88** | **8.96** | **2.51** | **0.66** |
| **SD.** | **2.37** | **4.76** | **9.43** | **9.05** | **3.71** | **1.57** | **0.60** |
| **Var** | **5.60** | **22.62** | **88.83** | **81.82** | **13.74** | **2.45** | **0.36** |




รูปที่ 3.2 กราฟแสดงข้อมูลขนาดคละของมวลรวมละเอียด

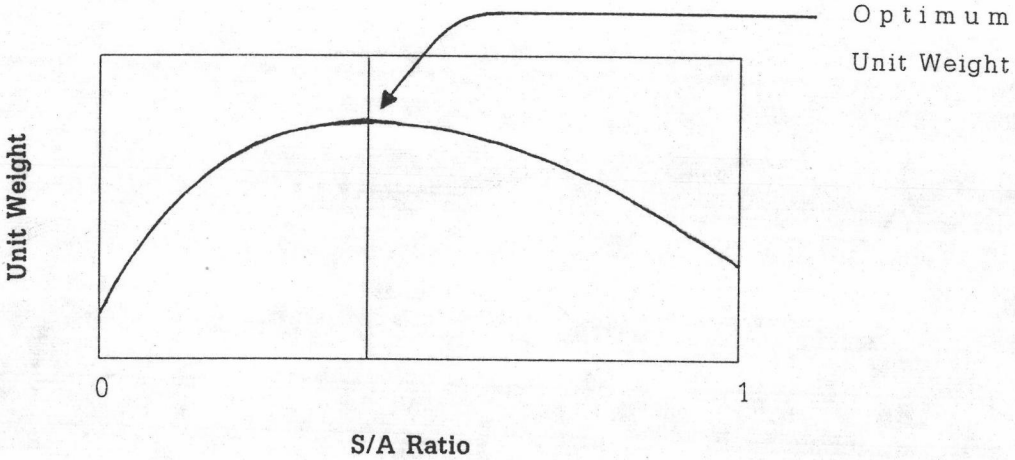
ตารางที่ 3.4 การเก็บข้อมูลขนาดคละของมวลรวมหยาบ

| Date | Percent Passing by Weight of Coarse Aggregate | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3/4" | 3/8" | No 4 | No 8 | No 16 | No 30 | No 50 | No 100 |
| 15/04/1994 | 98.88 | 11.29 | 0.41 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| 16/04/1994 | 98.60 | 22.15 | 0.67 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 |
| 18/04/1994 | 99.64 | 33.07 | 1.12 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.18 |
| 20/04/1994 | 98.18 | 13.81 | 0.23 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 21/04/1994 | 98.58 | 8.51 | 0.59 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 0.56 |
| 22/04/1994 | 98.06 | 11.12 | 0.28 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| 23/04/1994 | 98.25 | 3.37 | 0.80 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| 25/04/1994 | 93.64 | 5.39 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| 26/04/1994 | 93.03 | 1.93 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| 27/04/1994 | 96.75 | 12.34 | 1.01 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 0.56 |
| 28/04/1994 | 99.50 | 12.48 | 0.33 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 05/03/1994 | 98.76 | 15.58 | 0.67 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| 05/04/1994 | 98.79 | 14.48 | 0.51 | 0.41 | 0.41 | 0.41 | 0.41 | 0.41 |
| 05/05/1994 | 99.09 | 16.33 | 0.48 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| 05/09/1994 | 97.82 | 6.25 | 0.51 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| 05/11/1994 | 95.93 | 7.90 | 0.43 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| 05/12/1994 | 97.00 | 19.43 | 2.45 | 1.64 | 1.64 | 1.64 | 1.64 | 1.64 |
| 13/05/1994 | 91.12 | 1.87 | 0.54 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 |
| 14/05/1994 | 95.12 | 12.74 | 0.57 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 |
| 15/05/1994 | 99.27 | 21.55 | 0.62 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| 17/05/1994 | 98.12 | 6.42 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 19/05/1994 | 98.94 | 30.41 | 0.60 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 20/05/1994 | 97.99 | 11.67 | 0.37 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 |
| 21/05/1994 | 99.27 | 28.96 | 2.10 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 |
| 23/05/1994 | 93.68 | 10.88 | 0.43 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 |
| 25/05/1994 | 99.00 | 28.74 | 0.95 | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 0.57 |
| 26/05/1994 | 99.18 | 22.40 | 0.73 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 |
| 06/02/1994 | 98.36 | 22.89 | 3.48 | 2.54 | 2.54 | 2.54 | 2.54 | 2.54 |
| 06/03/1994 | 97.43 | 26.27 | 0.30 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 |
| 06/04/1994 | 98.28 | 12.23 | 1.12 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 |
| 06/06/1994 | 97.46 | 21.19 | 2.21 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 06/07/1994 | 94.58 | 35.70 | 3.82 | 1.83 | 1.83 | 1.83 | 1.83 | 1.83 |
| 06/08/1994 | 97.24 | 33.04 | 1.86 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 |
| 06/10/1994 | 100.00 | 11.31 | 0.37 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 |
| 06/11/1994 | 99.70 | 24.21 | 0.72 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 |
| 13/06/1994 | 98.24 | 16.92 | 0.52 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| 15/06/1994 | 100.00 | 34.19 | 4.09 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 2.07 |
| **Avg.** | **97.80** | **16.56** | **1.03** | **0.58** | **0.58** | **0.58** | **0.58** | **0.58** |
| **SD.** | **2.32** | **9.48** | **1.35** | **0.79** | **0.79** | **0.79** | **0.79** | **0.79** |
| **Var.** | **5.40** | **89.91** | **1.84** | **0.62** | **0.62** | **0.62** | **0.62** | **0.62** |

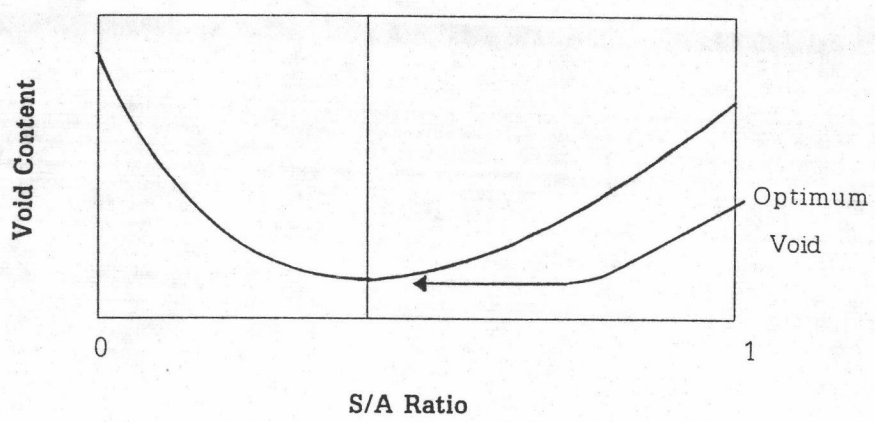



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงข้อมูลขนาดคละของมวลรวมหยาบ

3.2.2 ปริมาณช่องว่างและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่เหมาะสม ( Optimum Void and Unit Weight ) จากแนวความคิดที่ว่าขนาดคละที่ดีจะทำให้ได้คอนกรีตที่ใช้ปริมาณของซีเมนต์เพสท์ในการผสมน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ใช้ปริมาณน้ำในการผสมน้อยลงรวมทั้งช่วยเพิ่มความสามารถในการเทและลดการแยกตัวของเนื้อคอนกรีต ซึ่งเราสามารถพิจารณาค่าที่เหมาะสมได้ในแง่ของปริมาณช่องว่าง ( Void Content ) ของมวลรวม โดยมีความสัมพันธ์กันกับหน่วยน้ำหนักของมวลรวม ( Unit Weight of Aggregate ) และค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม ( S/A Ratio ) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนัก กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม สามารถแสดงดังรูปที่ 3.4 และความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม สามารถแสดงดังรูปที่ 3.5




รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม



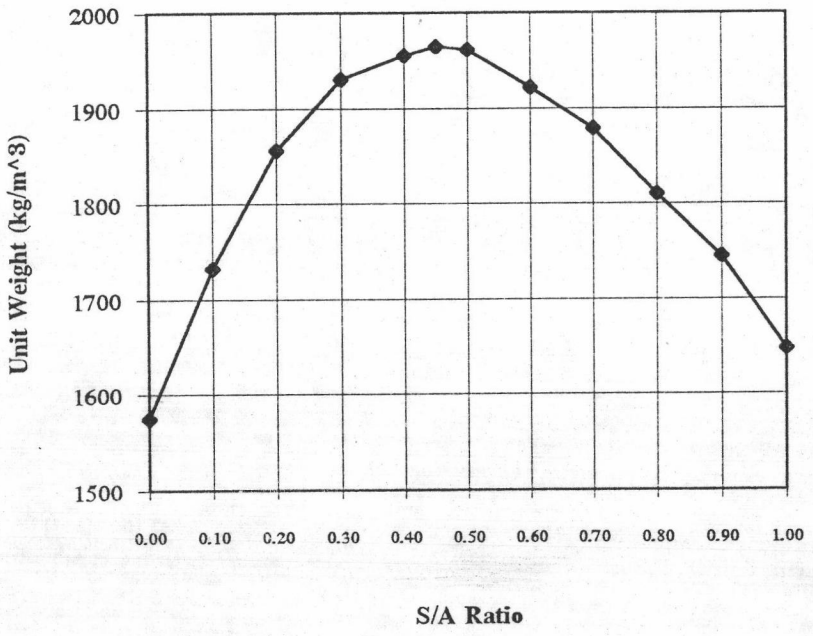

รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม

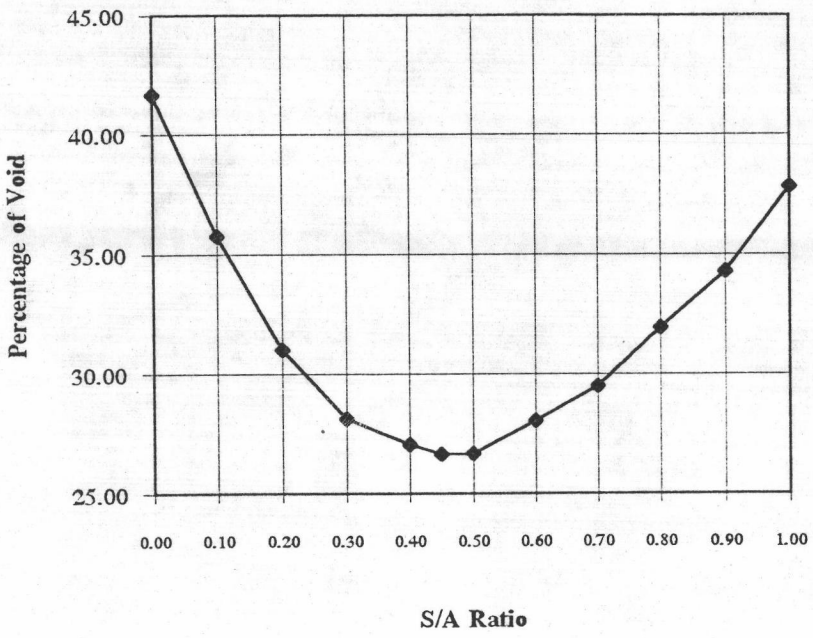
จากการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหินทราย เพื่อใช้ในการหาค่าสัดส่วนของมวลรวมที่เหมาะสม สำหรับปริมาณช่องว่างที่น้อยที่สุด ( Minimum Void Aggregate ) มีค่าแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าปริมาณช่องว่างของมวลรวม

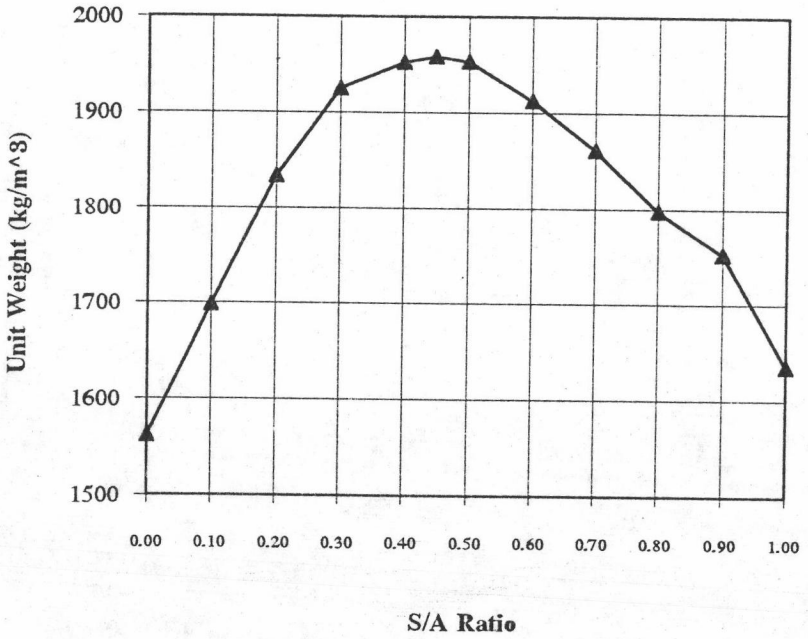
| S/A Ratio | หน่วยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ( kg/cu.m.) | | | | เปอร์เซนต์ช่องว่างในมวลรวม | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | ตัวอย่างที่ 4 | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | ตัวอย่างที่ 4 |
| 0 | 1575 | 1562 | 1549 | 1522 | 41.67 | 42.15 | 42.63 | 43.63 |
| 0.1 | 1732 | 1698 | 1712 | 1675 | 35.85 | 37.11 | 36.59 | 37.96 |
| 0.2 | 1856 | 1833 | 1833 | 1826 | 31.00 | 31.86 | 31.86 | 32.12 |
| 0.3 | 1930 | 1925 | 1918 | 1902 | 28.25 | 28.44 | 28.70 | 29.29 |
| 0.4 | 1955 | 1952 | 1942 | 1929 | 27.05 | 27.16 | 27.54 | 28.02 |
| 0.45 | 1964 | 1958 | 1946 | 1935 | 26.72 | 26.94 | 27.39 | 27.80 |
| 0.5 | 1961 | 1953 | 1944 | 1930 | 26.83 | 27.13 | 27.46 | 27.99 |
| 0.6 | 1921 | 1912 | 1907 | 1910 | 28.05 | 28.39 | 28.58 | 28.46 |
| 0.7 | 1879 | 1861 | 1871 | 1866 | 29.63 | 30.30 | 29.93 | 30.11 |
| 0.8 | 1810 | 1797 | 1808 | 1803 | 31.95 | 32.44 | 32.03 | 32.22 |
| 0.9 | 1745 | 1752 | 1746 | 1742 | 34.40 | 34.14 | 34.36 | 34.51 |
| 1 | 1648 | 1636 | 1634 | 1641 | 37.81 | 38.26 | 38.34 | 38.08 |

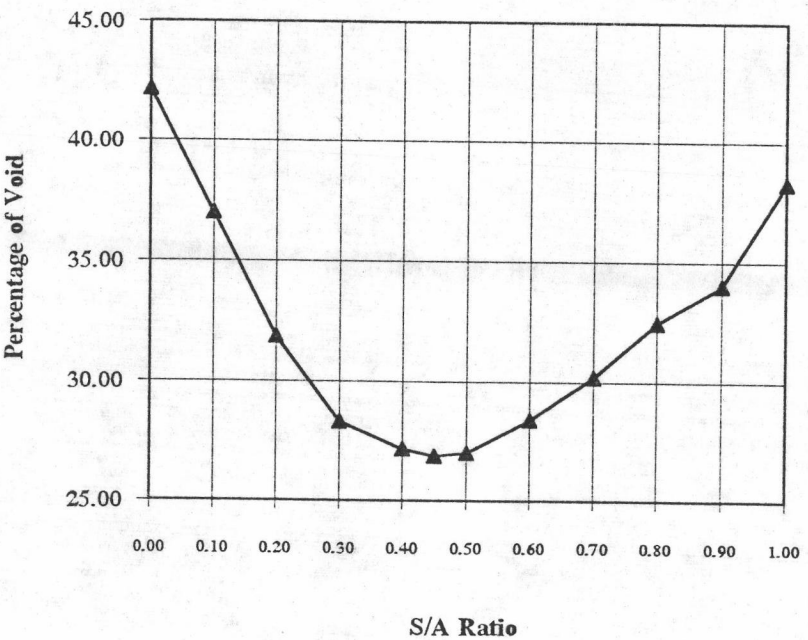
| Sieve No | Percent Passing by Weight | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | | ตัวอย่างที่ 2 | | ตัวอย่างที่ 3 | | ตัวอย่างที่ 4 | |
| | Coarse Agg. | Fine Agg. | Coarse Agg. | Fine Agg. | Coarse Agg. | Fine Agg. | Coarse Agg. | Fine Agg. |
| 1" | 100 | | 100 | | 100 | | 100 | |
| 3/4" | 98.76 | | 98.79 | | 97.43 | | 98.12 | |
| 3/8" | 45.83 | 100 | 44.48 | 100 | 30.41 | 100 | 46.42 | 100 |
| No. 4 | 3.67 | 96.59 | 4.51 | 95.73 | 6.48 | 96.09 | 3.93 | 97.29 |
| No. 8 | 0.5 | 89.54 | 0.41 | 85.74 | 1.64 | 86.69 | 0.89 | 90.95 |
| No. 16 | | 65.89 | | 55.77 | | 68.04 | | 70.73 |
| No. 30 | | 27.85 | | 28.4 | | 30.4 | | 29.21 |
| No. 50 | | 7.51 | | 6.95 | | 9.79 | | 10.96 |
| No. 100 | | 2.55 | | 1.61 | | 1.31 | | 2.63 |
| No. 200 | | 0.62 | | 0.2 | | 0.17 | | 0.42 |
| Unit Weight (kg/m^3) | 1575 | 1648 | 1562 | 1636 | 1549 | 1634 | 1522 | 1641 |
| Voids Contents (%) | 41.67 | 37.81 | 42.15 | 38.26 | 42.63 | 38.34 | 43.63 | 38.08 |



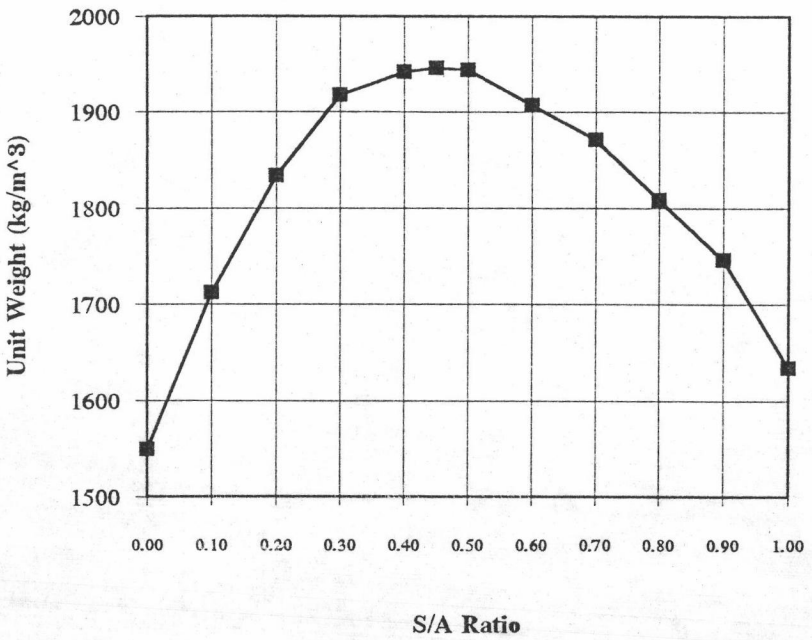



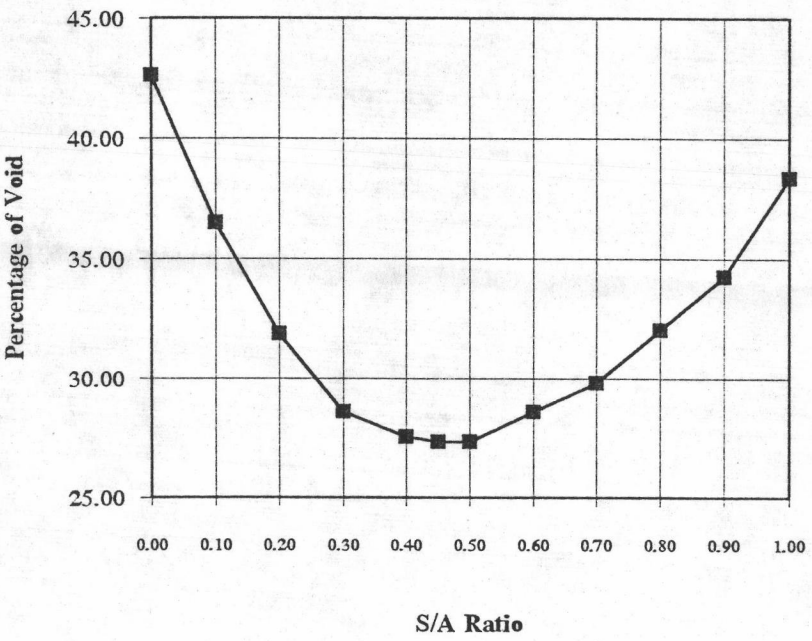

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม ( ตัวอย่างที่ 1 )



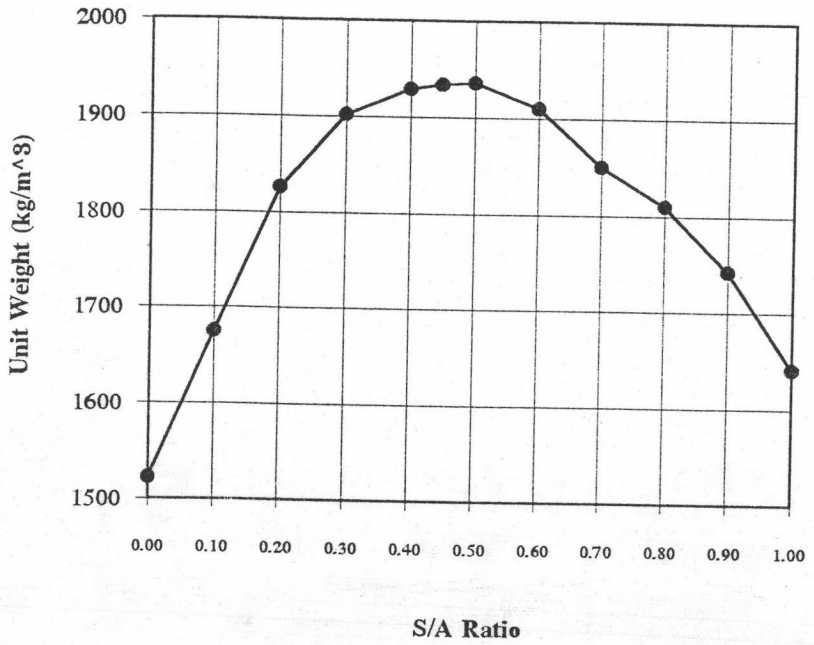



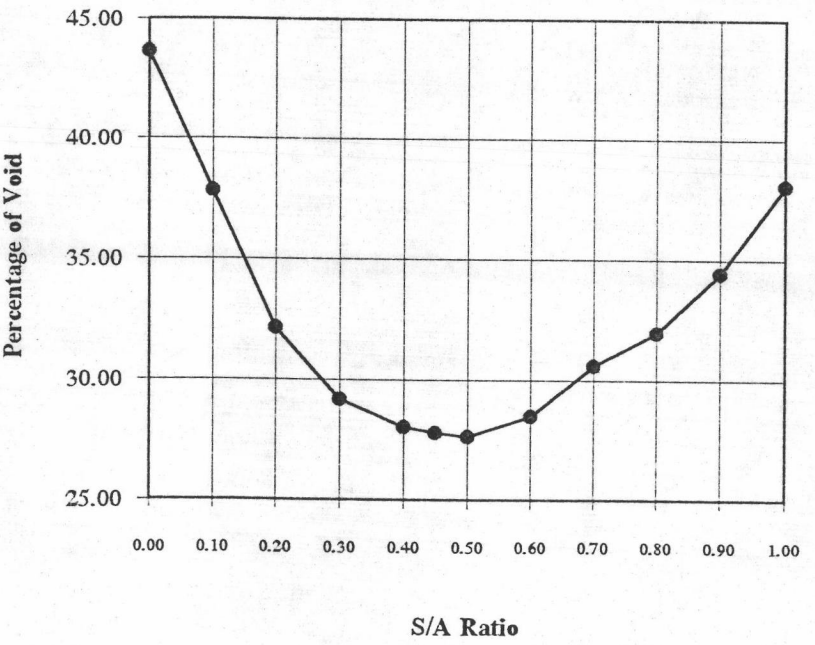

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม ( ตัวอย่างที่ 2 )




รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม ( ตัวอย่างที่ 3 )




รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม ( ตัวอย่างที่ 4 )

3.3 สัดส่วนผสมสำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตคุณภาพสูง โดยทำการศึกษาข้อมูลขนาดคละของมวลรวม และทำการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวม ให้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยใช้สัดส่วนของทรายต่อมวลรวมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมที่น้อยที่สุด การกำหนดสัดส่วนผสมได้ใช้แนวทางตามการออกแบบส่วนผสมของ ACI 211.4R [45] ในการกำหนดปริมาณซีเมนต์และอัตราส่วนนี้ต่อซีเมนต์สำหรับคอนกรีตกำลังสูง, ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม,ปริมาณของมวลรวมหยาบ โดยค่าอัตราส่วนของปริมาณทรายต่อมวลรวม (S/A Ratio) ที่เหมาะสมได้จากข้อมูลการทดสอบหาค่าปริมาณช่องว่างที่น้อยที่สุดของมวลรวม (Minimum Void Content) และการรวมขนาดคละ (Combined Gradation) ในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้การไล่เรียงขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน

อัตราการใช้สารลดปริมาณน้ำอย่างมาก ( Superplasticizer ) ที่ใช้ในส่วนผสม กำหนดตามข้อแนะนำของผู้ผลิตสารเคมี ซึ่งอัตราการใช้สารเคมีที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น ชนิดของสารเคมี,ค่าความเข้มข้น,เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้สารลดปริมาณน้ำ ในประเภท แนพทาลีน ลักษณะเป็นของเหลว ใช้ในอัตรา 1.2 ลิตร -2.4 ลิตร ต่อปริมาณซีเมนต์ 100 กิโลกรัม ตามข้อแนะนำของบริษัทผู้ผลิต โดยสารเคมีลดปริมาณน้ำที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.20 มีส่วนประกอบของเนื้อสาร 42 เปอร์เซนต์มีค่า PH ประมาณ 9.5

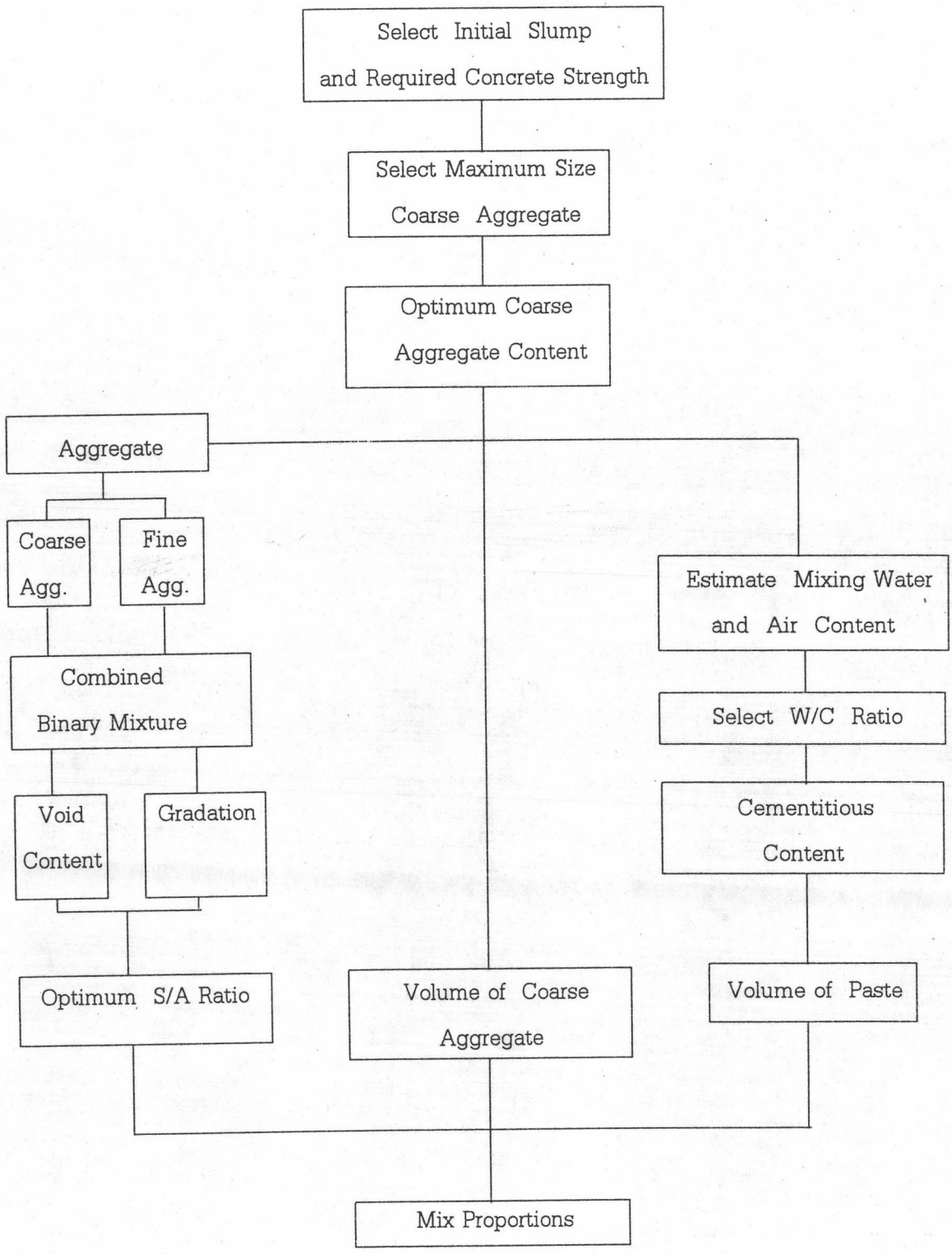
อัตราการใช้ของวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอยสำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ กำหนดตามข้อแนะนำของ ACI 211.4R [45] โดยมีค่าอยู่ในช่วง 15-35 เปอร์เซนต์ของปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก

อัตราการใช้วัสดุผสมเพิ่ม ซิลิก้าฟูม สำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยปรกติใช้ค่าประมาณ 5-10 เปอร์เซนต์ และสามารถเพิ่มปริมาณการใช้ไปถึง 25 เปอร์เซนต์ ของปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ตามข้อแนะนำของ ACI Committee 226 [43]

3.3.1 การกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีตคุณภาพสูง

การพิจารณาสัดส่วนผสมคอนกรีตคุณภาพสูง ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกได้แก่การพิจารณาในด้านสัดส่วนของวัสดุมวลรวม อันได้แก่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ส่วนที่สองได้แก่ ด้านวัสดุเชื่อมประสานอันประกอบไปด้วย ซีเมนต์,น้ำ,วัสดุผสมเพิ่ม,สารเคมีลดปริมาณน้ำ และสารผสมอื่นๆ

ซึ่งคุณสมบัติด้านความสามารถเทได้ในสภาวะคอนกรีตเหลว และคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตแข็งนั้น ไม่เพียงขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนผสมต่างๆ เท่านั้น แต่ยังรวมถึง คุณสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ ทั้งในด้านคุณภาพของวัสดุมวลรวม,วัสดุเชื่อมประสาน,และวัสดุผสมเพิ่ม ตามสัดส่วนการใช้ที่เหมาะสม ในรูปที่ 3.10 แสดงแผนภูมิแนวทางการกำหนดสัดส่วนผสมของคอนกรีตคุณภาพสูง




รูปที่ 3.10 แผนภูมิแสดงแนวทางการกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองแปรผันปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ตั้งแต่ 350 ,400 ,450 ,500 และ 550 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยทำให้ได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ แปรผันอยู่ในช่วงประมาณ 0.23-0.46 และแบ่งกลุ่มอัตราการใช้สารลดปริมาณน้ำออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1.2,1.8 และ 2.4 ลิตร ต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.6

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบส่วนผสมคอนกรีตที่เติมสารลดปริมาณน้ำอย่างมาก ร่วมกับวัสดุผสมเพิ่มอันได้แก่ ขี้เถ้าลอย (Fly Ash) และ ซิลิก้าฟูม (Silica Fume) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ และลดการเยิ้ม (Bleeding) ของคอนกรีต รวมทั้งปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต อัตราการใช้วัสดุผสมเพิ่ม ขี้เถ้าลอย แปรผันในอัตรา 15,20,25 และ 30 เปอร์เซนต์ของปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก และอัตราการใช้วัสดุผสมเพิ่ม ซิลิก้าฟูม แปรผันในอัตรา 5,10,15และ 20 เปอร์เซนต์ของปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.7,3.8 อัตราการใช้วัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการทดสอบได้จากข้อแนะนำตามมาตรฐาน ACI [43,45] และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมทั้งข้อแนะนำอัตราการใช้ของผู้ผลิตสารเคมี

ตารางที่ 3.6 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ทำการทดสอบ

| Code | Cement (kg.) | Water (kg.) | Sand (kg.) | Agg. (kg.) | W/C | S/A | Admix. (liters.) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *A1* | 350 | 120 | 890 | 1090 | 0.34 | 0.45 | 4.20 |
| *A2* | 400 | 120 | 870 | 1070 | 0.30 | 0.45 | 4.80 |
| *A3* | 450 | 120 | 850 | 1050 | 0.27 | 0.45 | 5.40 |
| *A4* | 500 | 120 | 830 | 1025 | 0.24 | 0.45 | 6.00 |
| *A5* | 550 | 120 | 810 | 1000 | 0.22 | 0.45 | 6.60 |
| *B1* | 350 | 140 | 890 | 1090 | 0.40 | 0.45 | 4.20 |
| *B2* | 400 | 140 | 870 | 1070 | 0.35 | 0.45 | 4.80 |
| *B3* | 450 | 140 | 850 | 1050 | 0.31 | 0.45 | 5.40 |
| *B4* | 500 | 140 | 830 | 1025 | 0.28 | 0.45 | 6.00 |
| *B5* | 550 | 140 | 810 | 1000 | 0.25 | 0.45 | 6.60 |
| *C1* | 350 | 160 | 890 | 1090 | 0.46 | 0.45 | 4.20 |
| *C2* | 400 | 160 | 870 | 1070 | 0.40 | 0.45 | 4.80 |
| *C3* | 450 | 160 | 850 | 1050 | 0.36 | 0.45 | 5.40 |
| *C4* | 500 | 160 | 830 | 1025 | 0.32 | 0.45 | 6.00 |
| *C5* | 550 | 160 | 810 | 1000 | 0.29 | 0.45 | 6.60 |
| *D1* | 350 | 120 | 890 | 1090 | 0.34 | 0.45 | 6.30 |
| *D2* | 400 | 120 | 870 | 1070 | 0.30 | 0.45 | 7.20 |
| *D3* | 450 | 120 | 850 | 1050 | 0.27 | 0.45 | 8.10 |
| *D4* | 500 | 120 | 830 | 1025 | 0.24 | 0.45 | 9.00 |
| *D5* | 550 | 120 | 810 | 1000 | 0.22 | 0.45 | 9.90 |
| *E1* | 350 | 140 | 890 | 1090 | 0.40 | 0.45 | 6.30 |
| *E2* | 400 | 140 | 870 | 1070 | 0.35 | 0.45 | 7.20 |
| *E3* | 450 | 140 | 850 | 1050 | 0.31 | 0.45 | 8.10 |
| *E4* | 500 | 140 | 830 | 1025 | 0.28 | 0.45 | 9.00 |
| *E5* | 550 | 140 | 810 | 1000 | 0.25 | 0.45 | 9.90 |
| *F1* | 350 | 160 | 890 | 1090 | 0.46 | 0.45 | 6.30 |
| *F2* | 400 | 160 | 870 | 1070 | 0.40 | 0.45 | 7.20 |
| *F3* | 450 | 160 | 850 | 1050 | 0.36 | 0.45 | 8.10 |
| *F4* | 500 | 160 | 830 | 1025 | 0.32 | 0.45 | 9.00 |
| *F5* | 550 | 160 | 810 | 1000 | 0.29 | 0.45 | 9.90 |
| *G1* | 350 | 120 | 890 | 1090 | 0.34 | 0.45 | 8.40 |
| *G2* | 400 | 120 | 870 | 1070 | 0.30 | 0.45 | 9.60 |
| *G3* | 450 | 120 | 850 | 1050 | 0.27 | 0.45 | 10.80 |
| *G4* | 500 | 120 | 830 | 1025 | 0.24 | 0.45 | 12.00 |
| *G5* | 550 | 120 | 810 | 1000 | 0.22 | 0.45 | 13.20 |
| *H1* | 350 | 140 | 890 | 1090 | 0.40 | 0.45 | 8.40 |
| *H2* | 400 | 140 | 870 | 1070 | 0.35 | 0.45 | 9.60 |
| *H3* | 450 | 140 | 850 | 1050 | 0.31 | 0.45 | 10.80 |
| *H4* | 500 | 140 | 830 | 1025 | 0.28 | 0.45 | 12.00 |
| *H5* | 550 | 140 | 810 | 1000 | 0.25 | 0.45 | 13.20 |
| *I1* | 350 | 160 | 890 | 1090 | 0.46 | 0.45 | 8.40 |
| *I2* | 400 | 160 | 870 | 1070 | 0.40 | 0.45 | 9.60 |
| *I3* | 450 | 160 | 850 | 1050 | 0.36 | 0.45 | 10.80 |
| *I4* | 500 | 160 | 830 | 1025 | 0.32 | 0.45 | 12.00 |
| *I5* | 550 | 160 | 810 | 1000 | 0.29 | 0.45 | 13.20 |

ตารางที่ 3.7 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย ( Fly Ash )

| Code | Cement (kg.) | FA (kg.) | Sand (kg.) | Agg. (kg.) | S/A | W (kg.) | W/(C+FA) | Admix. (liters.) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *J1* | 350 | 53 | 866 | 1061 | 0.45 | 160 | 0.40 | 7.25 |
| *J2* | 400 | 60 | 843 | 1037 | 0.45 | 160 | 0.35 | 8.28 |
| *J3* | 450 | 68 | 820 | 1013 | 0.45 | 160 | 0.31 | 9.32 |
| *J4* | 500 | 75 | 796 | 984 | 0.45 | 160 | 0.28 | 10.35 |
| *J5* | 550 | 83 | 773 | 955 | 0.45 | 160 | 0.25 | 11.39 |
| *K1* | 350 | 70 | 859 | 1052 | 0.45 | 160 | 0.38 | 7.56 |
| *K2* | 400 | 80 | 834 | 1026 | 0.45 | 160 | 0.33 | 8.64 |
| *K3* | 450 | 90 | 810 | 1001 | 0.45 | 160 | 0.30 | 9.72 |
| *K4* | 500 | 100 | 785 | 970 | 0.45 | 160 | 0.27 | 10.80 |
| *K5* | 550 | 110 | 761 | 940 | 0.45 | 160 | 0.24 | 11.88 |
| *L1* | 350 | 88 | 851 | 1042 | 0.45 | 160 | 0.37 | 7.88 |
| *L2* | 400 | 100 | 825 | 1015 | 0.45 | 160 | 0.32 | 9.00 |
| *L3* | 450 | 113 | 799 | 988 | 0.45 | 160 | 0.28 | 10.13 |
| *L4* | 500 | 125 | 774 | 956 | 0.45 | 160 | 0.26 | 11.25 |
| *L5* | 550 | 138 | 748 | 924 | 0.45 | 160 | 0.23 | 12.38 |
| *M1* | 350 | 105 | 843 | 1032 | 0.45 | 160 | 0.35 | 8.19 |
| *M2* | 400 | 120 | 816 | 1004 | 0.45 | 160 | 0.31 | 9.36 |
| *M3* | 450 | 135 | 789 | 976 | 0.45 | 160 | 0.27 | 10.53 |
| *M4* | 500 | 150 | 763 | 943 | 0.45 | 160 | 0.25 | 11.70 |
| *M5* | 550 | 165 | 736 | 909 | 0.45 | 160 | 0.22 | 12.87 |

ตารางที่ 3.8 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม ( Silica Fume )

| Code | Cement ( kg. ) | SF ( kg. ) | Sand ( kg. ) | Agg. ( kg. ) | S/A | W ( kg. ) | W/(C+SF) | Admix. ( liters. ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *N4* | 350 | 18 | 882 | 1080 | 0.45 | 160 | 0.44 | 6.62 |
| *N4* | 400 | 20 | 861 | 1059 | 0.45 | 160 | 0.38 | 7.56 |
| *N4* | 450 | 23 | 840 | 1038 | 0.45 | 160 | 0.34 | 8.51 |
| *N4* | 500 | 25 | 819 | 1011 | 0.45 | 160 | 0.30 | 9.45 |
| *N5* | 550 | 28 | 798 | 985 | 0.45 | 160 | 0.28 | 10.40 |
| *O1* | 350 | 35 | 874 | 1071 | 0.45 | 160 | 0.42 | 6.93 |
| *O2* | 400 | 40 | 852 | 1048 | 0.45 | 160 | 0.36 | 7.92 |
| *O3* | 450 | 45 | 830 | 1025 | 0.45 | 160 | 0.32 | 8.91 |
| *O4* | 500 | 50 | 808 | 998 | 0.45 | 160 | 0.29 | 9.90 |
| *O5* | 550 | 55 | 785 | 970 | 0.45 | 160 | 0.26 | 10.89 |
| *P1* | 350 | 53 | 866 | 1061 | 0.45 | 160 | 0.40 | 7.25 |
| *P2* | 400 | 60 | 843 | 1037 | 0.45 | 160 | 0.35 | 8.28 |
| *P3* | 450 | 68 | 820 | 1013 | 0.45 | 160 | 0.31 | 9.32 |
| *P4* | 500 | 75 | 796 | 984 | 0.45 | 160 | 0.28 | 10.35 |
| *P5* | 550 | 83 | 773 | 955 | 0.45 | 160 | 0.25 | 11.39 |
| *Q1* | 350 | 70 | 859 | 1052 | 0.45 | 160 | 0.38 | 7.56 |
| *Q2* | 400 | 80 | 834 | 1026 | 0.45 | 160 | 0.33 | 8.64 |
| *Q3* | 450 | 90 | 810 | 1001 | 0.45 | 160 | 0.30 | 9.72 |
| *Q4* | 500 | 100 | 785 | 970 | 0.45 | 160 | 0.27 | 10.80 |
| *Q5* | 550 | 110 | 761 | 940 | 0.45 | 160 | 0.24 | 11.88 |

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

3.4.1 วิธีการผสมคอนกรีต

ในการผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องผสมคอนกรีต เล็กแบบกระทะ ( Pan Mixer ) มีขนาดความจุ 0.12 ลบ.ม. ซึ่งประกอบไปด้วยถังผสม ( Circular Pan ) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 ซม. ความสูง 45 ซม. และมีใบกวนยึดติดอยู่กับแกนตรงกลาง โดยหมุนรอบแกนในอัตราประมาณ 30 รอบต่อนาที ใช้การขับเคลื่อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า ผ่านระบบเฟืองเพื่อทดรอบการหมุนให้เหมาะสม ในการผสมใช้วิธีการเทียบสัดส่วนผสมจากส่วนผสมต่อ 1 ลบ.ม. โดยคิดตามปริมาตรของการผสมและคำนวณออกเป็นน้ำหนักของวัสดุ ซึ่งมีขั้นตอนในการผสมคอนกรีตดังต่อไปนี้

1. เติมน้ำประมาณ 10 เปอร์เซนต์ ลงในเครื่องผสมก่อน

2. นำวัสดุมวลรวมหินและทราย ชั่งน้ำหนักตามปริมาณที่ต้องการ ใส่ลงในเครื่องผสม

3. เริ่มเติมปูนซีเมนต์และสารแร่ผสมเพิ่ม ลงไปหลังจากใส่มวลรวมเสร็จเรียบร้อยแล้ว

4. เติมน้ำประมาณ 80 เปอร์เซนต์ หลังจากที่ส่วนผสมเริ่มคลุกเคล้ากันบางส่วน

5. หลังจากที่ส่วนผสมคลุกเคล้ากันสม่ำเสมอพอสมควรแล้ว เริ่มเติมน้ำยาลดปริมาณน้ำลงไปและเติมน้ำ 10 เปอร์เซนต์สุดท้าย

6. เดินเครื่องผสมจนเนื้อคอนกรีตเข้ากันได้ดี และมีความสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาตั้งแต่เริ่มผสมน้ำที่ 80 เปอร์เซนต์ ไม่ต่ำกว่า 1 นาที และไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที

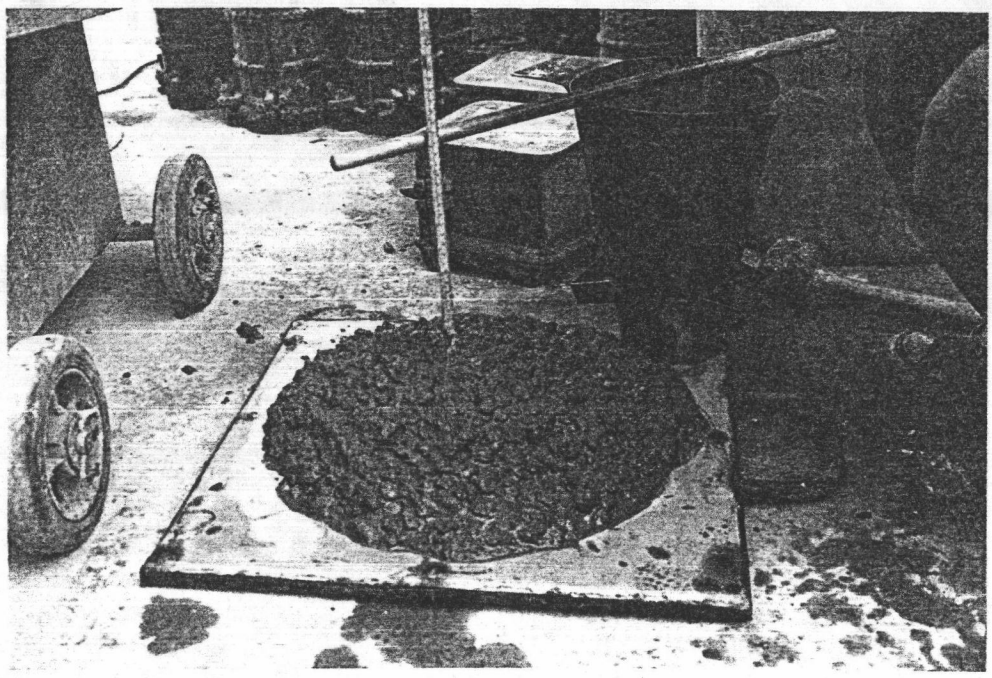
3.4.2 วิธีการทดสอบคอนกรีต

ในการทดลองผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ ได้แบ่งส่วนผสมของคอนกรีตคุณภาพสูงออกเป็น 3 กลุ่ม ใหญ่ ๆ อันได้แก่ คอนกรีตที่เติมสารลดปริมาณน้ำอย่างมาก คอนกรีตเติมสารลดปริมาณน้ำอย่างมากร่วมกับ ขี้เถ้าลอย ( Fly Ash ) และคอนกรีตเติมสารลดปริมาณน้ำอย่างมากร่วมกับซิลิก้าฟูม (Silica Fume) การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าวในงานวิจัยนี้ ได้เน้นไปในด้านการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดอันได้แก่

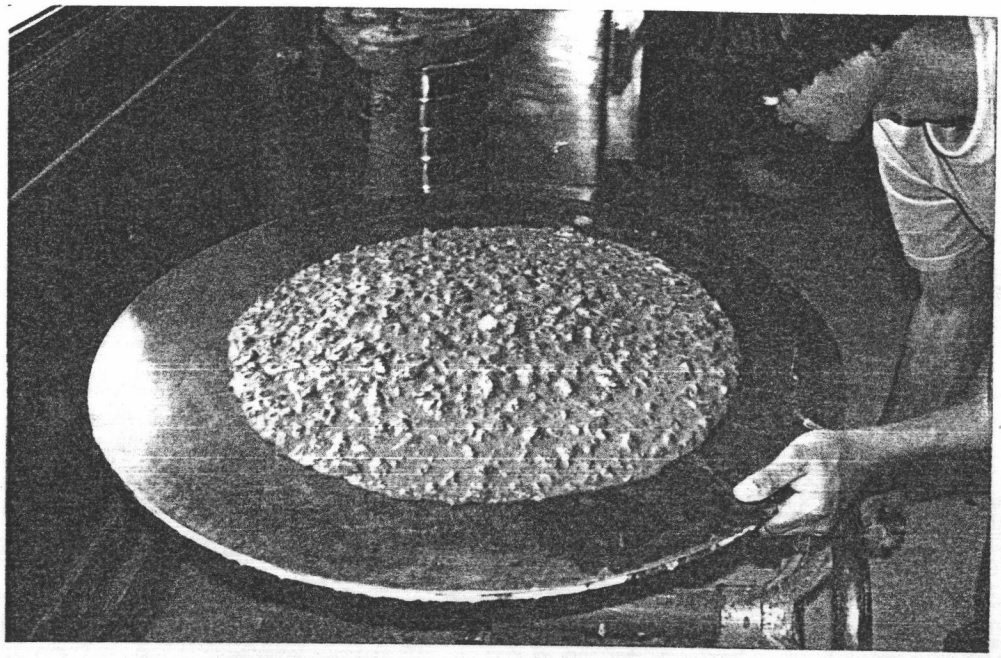
1. การทดสอบการยุบตัว ( Slump test ) เป็นการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C 143 ( Standard Test Method of Slump of Portland Cement Concrete ) อุปกรณ์ประกอบด้วย โคนรูปทรงกรวยตัด เส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 10. ซม. ด้านล่าง 20 ซม. สูง 30 ซม. มีหูจับสองด้าน และแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบทั้ง 2 ข้าง เหล็กตำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว60. ซม. ปลายกลมมน แผ่นเหล็กสำหรับรอง,ช้อนตัก,เกรียงเหล็ก,และตลับเมตร วิธีการทดสอบทำได้โดยวางแผ่นเหล็กลงกับพื้นราบ นำกรวยเหล็กวางและใช้เท้าเหยียบปลายทั้งสองข้าง ใช้ช้อนตัก ตักคอนกรีตใส่ลงในกรวย โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาณเท่าๆ กัน โดยปริมาตรแต่ละชั้นตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง ในการตำต้องตำให้ทั่วพื้นที่ เมื่อเสร็จชั้นที่ 3 แล้วปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบได้ระดับกับขอบกรวย รวมทั้งทำความสะอาดบริเวณรอบกรวยและแผ่นเหล็กรอง จากนั้นค่อย ๆ ดึงกรวย

เหล็กขึ้นในแนวดิ่ง ตั้งกรวยลงข้าง ๆ กองคอนกรีตและวัดค่าการยุบตัวของคอนกรีตเทียบกับขอบบนของกรวยเหล็ก

2.การทดสอบการไหลตัว ( Flow Test ) เป็นการทดสอบวัดการไหลตัวของคอนกรีตซึ่งเหมาะกับการใช้วัดคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ ( Workability ) ของคอนกรีตเหลวมาก โดยการทดสอบตามมาตราฐาน ASTM C124-39 , AASHO T120-42 ( Flow of Portland Cement by Use of the Flow Table ) อุปกรณ์ประกอบด้วย โต๊ะเขย่า ( Flow Table ) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 ซม., แบบหล่อรูปกรวยคว่ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 171 มม. สำหรับด้านบน และ 254 มม สำหรับด้านล่าง, เหล็กกระทุ้งขนาด 16 มม. ยาว 60 ซม. วิธีการทดสอบทำได้โดย วางกรวยคว่ำลงตรงกลางโต๊ะเขย่าให้ตรงรอยขีด ตักคอนกรีตใส่ในแบบโดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ในแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกรทุ้งจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น ปาดหน้าให้เรียบ และยกแบบหล่อกรวยขึ้นในแนวดิ่ง หลังจากนั้น ทำการหมุนให้โต๊ะเขย่ายกกระแทกเป็นระยะความสูง 12.7 มม. เป็นจำนวน 15 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที ทำให้คอนกรีตสดแผ่กระจายออกไปรอบด้าน และวัดหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่ออกโดยวัดสองแนวที่ตั้งฉากกัน ค่าการไหลตัวของคอนกรีตคือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

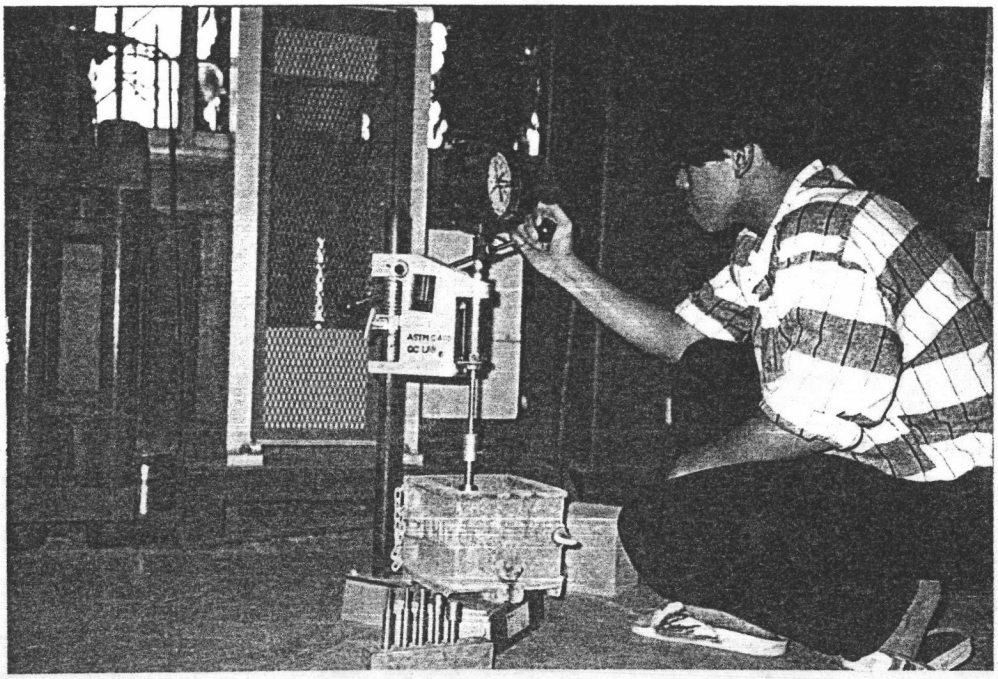


รูปที่ 3.11 แสดงการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด

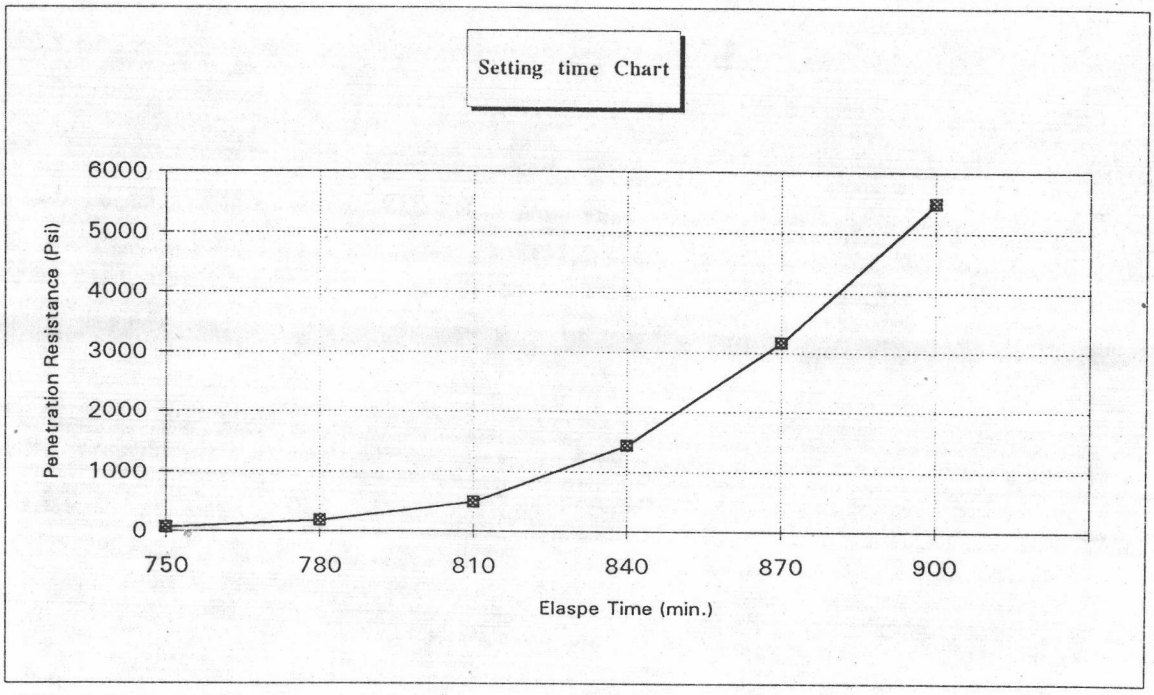


รูปที่ 3.12 แสดงการทดสอบค่าการไหลตัวของคอนกรีต

3. การทดสอบเวลาก่อตัวของคอนกรีต เป็นการทดสอบเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการนำคอนกรีตไปใช้งาน โดยทำการทดสอบตามมาตราฐาน ASTM C403 ( Standard Test Method of Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance ) อุปกรณ์ประกอบด้วย เครื่องมือกดทดสอบหาเวลาการก่อตัว, ตะแกรงร่อนมาตราฐานเบอร์ 4, เหล็กตำขนาด 16 มม., แบบเหล็กทรงลูกบาศก์ 15x15x15 ซม. วิธีการทดสอบทำได้โดย นำคอนกรีตร่อนผ่านตะแกรงมาตราฐานเบอร์ 4 นำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เทลงแบบลูกบาศก์ที่เตรียมไว้ โดยใส่ให้ความสูงต่ำกว่าขอบแบบหล่อประมาณครึ่งเซนติเมตร ใช้เหล็กตำให้ทั่วพื้นที่ ใช้ฆ้อนยางตีขอบแบบเพื่อไล่ฟองอากาศ ปาดผิวหน้าให้เรียบ และดูดน้ำที่ผิวออก ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือกดทดสอบ โดยกดให้หัวทดสอบจมลงในเนื้อคอนกรีต 2.5 ซม. และจดค่าน้ำหนักที่ใช้ในการกด และเวลาที่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่กด และขนาดของหัวกด ในการทดสอบจะเลือกขนาดของหัวกดให้เหมาะสมกับสภาพคอนกรีตโดยในช่วงแรก จะใช้หัวกดขนาดใหญ่ และเมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตยิ่งแข็งตัว จะเลือกหัวกดขนาดเล็กลง ในการทดสอบต้องหาแรงต้านทานอย่างน้อย 6 จุด เพื่อนำมาเขียนกราฟระหว่าง เวลา กับ แรงต้านทานการจมของคอนกรีต เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่จุดเริ่มแข็งตัว ( Stiffening Time ) แรงต้านทานเท่ากับ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่จุดแข็งตัวเริ่มต้น ( Initial Setting Time ) แรงต้านทานเท่ากับ 500 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว ที่จุดแข็งตัวสุดท้าย ( Final Setting Time ) แรงต้านทานเท่ากับ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 3.13 แสดงการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต



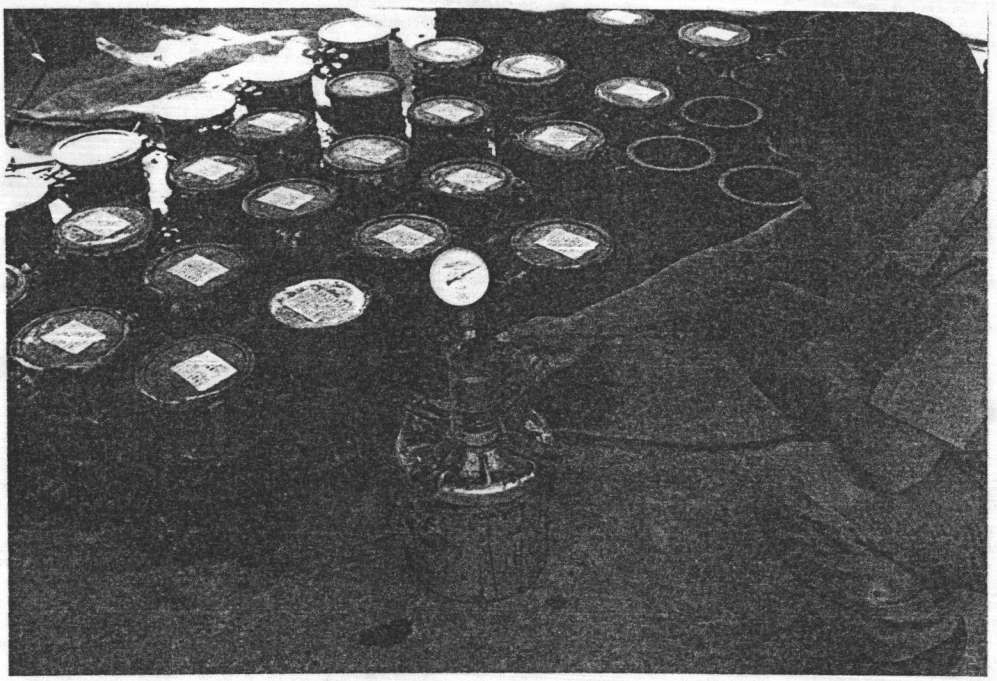

**Remark :** Dosage of Superplasticizer 7.500 cc/cu.m

Initial Setting Time Penetration Resistance 500 psi. = 13:30 hrs.

Final Setting Time Penetration Resistance 4000 psi = 14:40 hrs.

รูปที่ 3.14 กราฟแสดงค่าการก่อตัวของคอนกรีต

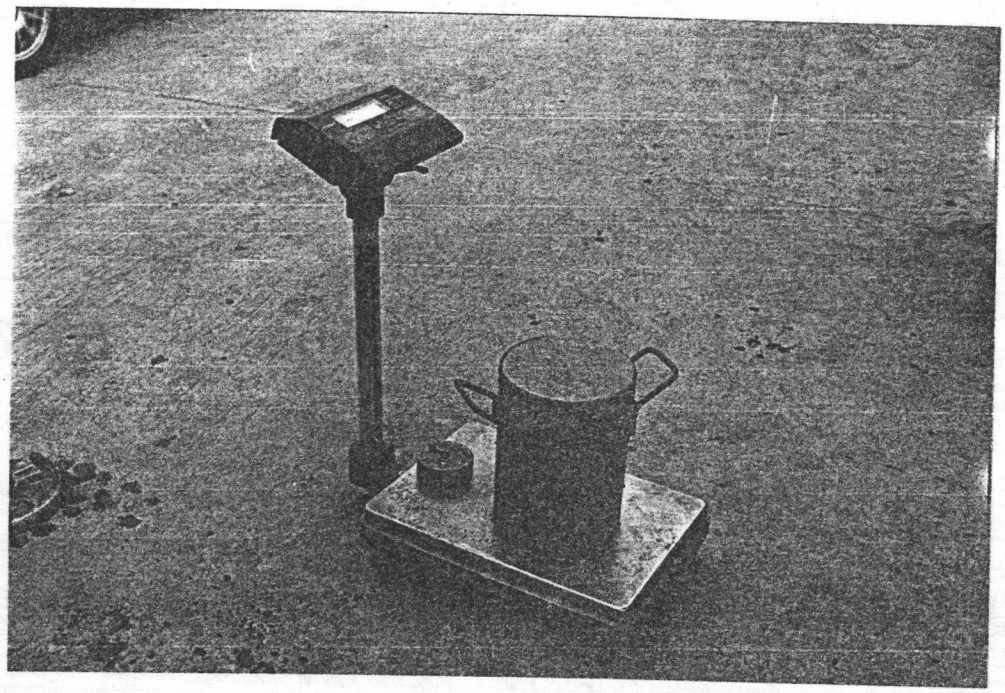
4. การทดสอบหาปริมาณในอากาศ เป็นการทดสอบหาปริมาณอากาศในเนื้อคอนกรีตสด ตามมาตราฐาน ASTM C231 ( Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method ) อุปกรณ์ประกอบด้วย เครื่องทดสอบ แอร์มิเตอร์ เหล็กตำขนาด 16 มม., ฆ้อนยาง, ลูกยาง, ภาชนะใส่น้ำ, แผ่นเหล็กปาดหน้า, ช้อนตัก วิธีการทดสอบทำได้โดยตักคอน กรีตที่ผสมไว้ใส่ลงในเครื่องทดสอบแอร์มิเตอร์ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่า ๆ กัน ในแต่ละชั้นตำ 25 ครั้งด้วยเหล็กตำ ใช้ฆ้อนยางตีรอบ ๆ แอร์มิเตอร์ 10-15 ที เพื่อไล่อากาศในคอนกรีตออก ใช้แผ่นเหล็กปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทำความสะอาดบริเวณขอบแอร์มิเตอร์ ปิดฝาและขันสกรูให้แน่น เปิดวาล์วสำหรับใส่น้ำทั้งสองข้างใช้ลูกยางดูดน้ำใส่จนเต็ม โดยสังเกตุจากน้ำที่ไหลออกมาอีกด้านหนึ่ง เมื่อน้ำเต็มจึงปิดวาล์ว อัดอากาศเข้าไปในหม้อลม ที่อยู่บริเวณฝาปิดจนเต็ม โดยสังเกตุจากหน้าปัดของเครื่อง เข็มจะชี้ที่เลขศูนย์ กดปุ่มปล่อยอากาศและอ่านค่าปริมาณอากาศจากหน้าปัด ทำการบันทึกค่า ในการหาปริมาณในอากาศควรทำ 2 ครั้ง และค่าที่ได้ทั้ง สองครั้งต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 เปอร์เซนต์ นำค่าที่ได้ทั้งสองมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยที่ได้ คือค่าปริมาณอากาศในคอนกรีต



รูปที่ 3.15 แสดงการทดสอบหาปริมาณอากาศในคอนกรีต

5. การทดสอบหน่วยน้ำหนัก เป็นการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดในสภาพจริงตามมาตรฐาน ASTM C138 , BS 1881 PART 107 ( Method of Determination of Density of Compacted Fresh Concrete) อุปกรณ์ประกอบด้วย ถังใส่คอนกรีตขนาดมาตราฐาน ขนาดความจุ

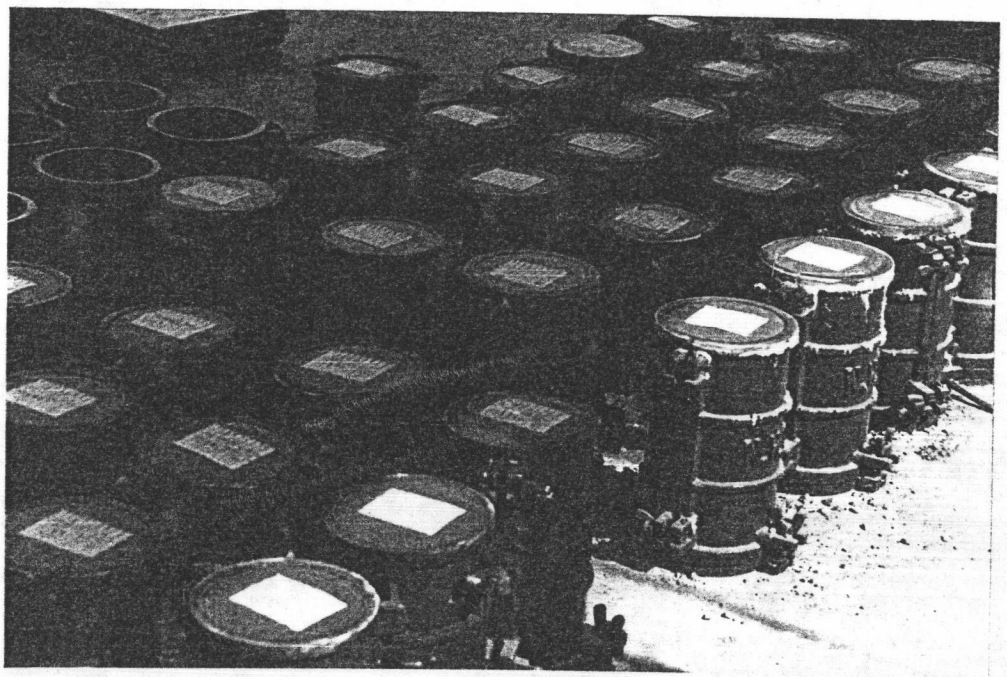
10 ลิตร เหล็กตำขนาด 16 มม.,เหล็กปาดหน้าคอนกรีต , เครื่องชั่ง, ช้อนตัก วิธีการทดสอบทำได้โดย ชั่งน้ำหนักถังเปล่า นำคอนกรีตใส่ลงในถังโดยแบ่งเป็น 6 ชั้น ใช้เหล็กตำ ตำคอนกรีตให้แน่น ในแต่ละชั้นต้องตำไม่น้อยกว่า 60 ครั้ง ใช้เหล็กปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ นำไปชั่งหาน้ำหนัก และคำนวณหน่วยน้ำหนักจากน้ำหนักคอนกรีตในถังหารด้วยปริมาตร ของถังเปล่า ในการคำนวณหน่วยน้ำหนัก ควรให้มีความละเอียดถึง 10 กก/ลบ.ม.



รูปที่ 3.16 แสดงการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

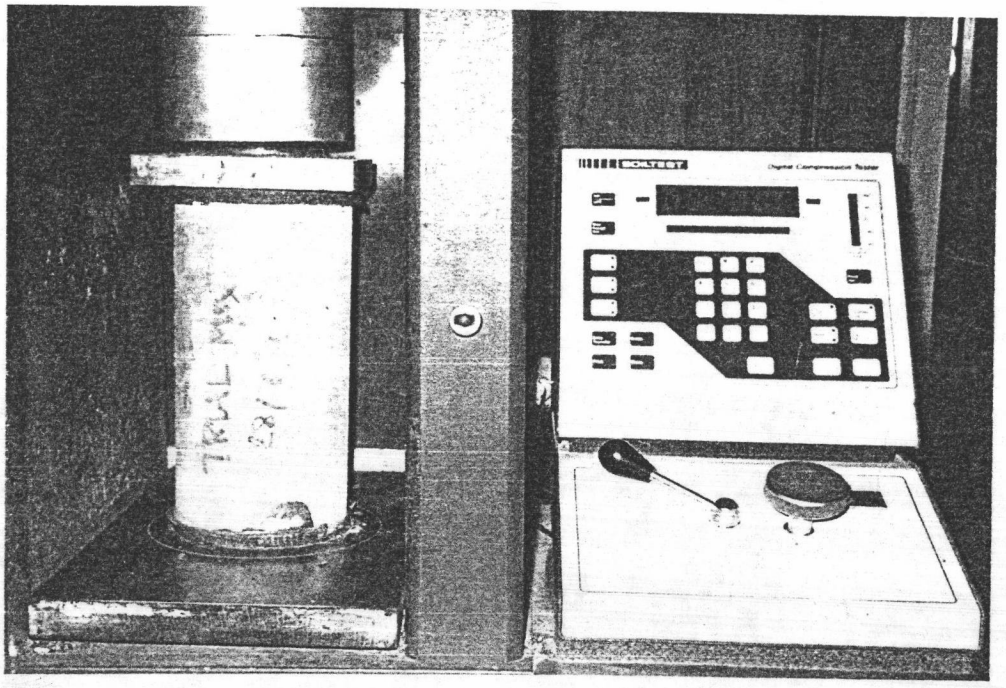
6. การทดสอบกำลังรับแรงอัด เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตราฐาน ASTM C 39 ( Test Method For Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens ) โดยการจัดเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทำการทดสอบตามมาตราฐาน ASTM C192 ( Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory ) ใช้แบบหล่อก้อนตัวอย่าง รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ในการเก็บตัวอย่างตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น จำนวน 3 ชั้น เท่า ๆ กัน ในแต่ละชั้น ตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้ง เมื่อตำชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ ใช้ แผ่นพลาสติกคลุมด้านบน แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งในแบบ เมื่อครบประมาณ 24 ชม.เริ่มทำการแกะตัวอย่างออกจากแบบแล้วนำไปทดสอบในส่วนอายุครบ 1 วัน ตัวอย่างที่เหลือให้ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำให้เป็นไปตามมาตราฐาน ASTM C192 เมื่อครบอายุทดสอบ ให้นำตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากน้ำ นำมาผึ่งให้แห้ง แล้วนำไปหล่อกำมะถัน คุมหัวลูกปูนตามมาตรา

ฐาน ASTM C 617 ( Standard Proctice for Capping Cylindrical-Concrete Specimens ) หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบและทำการบันทึก ค่าการทดสอบไว้ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบ

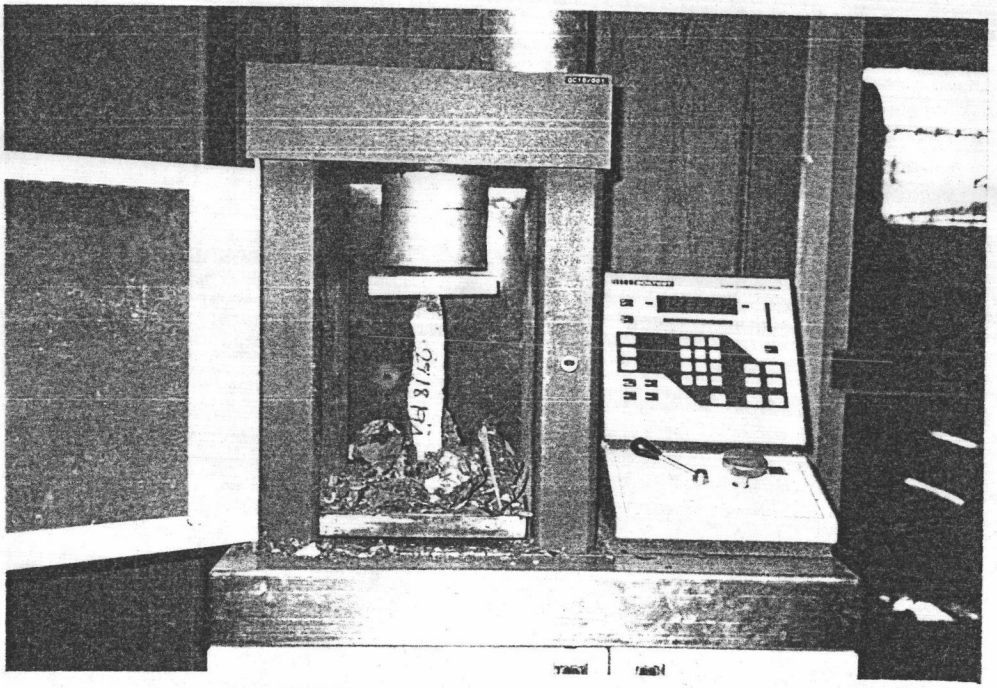


รูปที่ 3.17 แสดงการเก็บตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 3.18 แสดงการ Capping ส่วนปลายของตัวอย่างคอนกรีต




รูปที่ 3.19 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูง