หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

จากการทดสอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ สามารถนำมาแสดงผลและทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้คือ

5.1 ผลการทดสอบการบดอัดผงโลหะตัวอย่าง

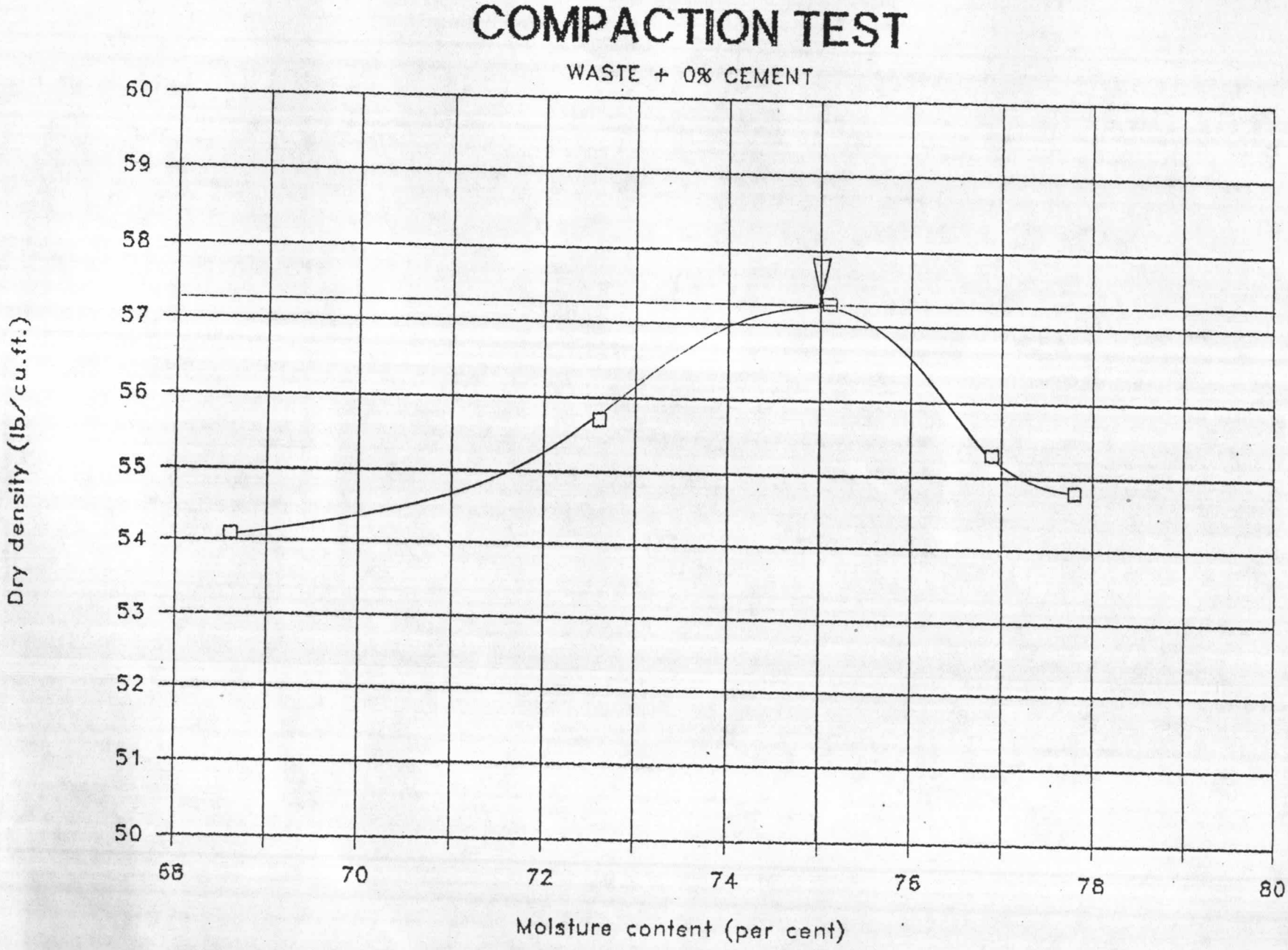
จากการทดสอบการบดอัดผงโลหะอย่างเดียว โดยใช้การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตราฐาน (วิธี ก.) ตามมาตราฐานกรมทางหลวง ผลที่ได้เป็นไปดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ซึ่งพบว่า

ค่าของ optimum moisture content เท่ากับ 75.0 %
ค่าของ maximum dry density มีค่าเท่ากับ 57.2 ปอนด์/ฟุต^3

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของ optimum moisture content ดังกล่าว มีค่าใกล้เคียงกับค่าของ Plastic Limit (72.6 %) ส่วนค่าของ maximum dry density มีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับความถ่วงจำเพาะ (4.3) ซึ่งเป็นเพราะว่าผงโลหะตัวอย่างมีช่องว่างของอากาศ (air void) มาก อันเนื่องมาจากได้ทำการเตรียมผงโลหะตัวอย่างโดยทำการบดผงโลหะตัวอย่างที่เป็นก้อนแห้ง แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เท่านั้น

5.2 ผลการทดสอบ unconfined compressive strength (UCS) ของผงโลหะอย่างเดียว

เพื่อเป็นการพิจารณาความแข็งแรงของผงโลหะ ก่อนที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อนำไปใช้ในเชิงวิศวกรรมโยธา จึงทำการทดสอบหาค่า UCS ของผงโลหะอย่างเดียว โดยทำการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตราฐาน (วิธี ก.) ตามมาตราฐานกรมทางหลวง ใช้ปริมาณน้ำที่ OMC แล้วนำมาทดสอบด้วยเครื่อง VERSA-TESTER



รูปที่ 5.1 แสดงการหาค่า optimum moisture content และ maximum dry density ของผงโลหะอย่างเดียว

ปรากฏผลดังนี้คือ

ค่าของ UCS ของผงโลหะอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 66.8 ปอนด์/นิ้ว^2 หรือ 4.70 กก./ซม.^{2}

และได้ทำการทดสอบหาค่าของ CBR เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบต่อไป

5.3 ผลการทดสอบ CBR ของผงโลหะอย่างเดียว

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ปรับปรุงจากมาตราฐานกรมทางหลวง ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 4.3 ผลการทดสอบเป็นดังนี้คือ

ค่าของ CBR (unsoaked) เท่ากับ 75.0 %

ค่าของ CBR (soaked) เท่ากับ 33.3 %

โดยมีค่า water absorption เท่ากับ 10.0 % และ swell เท่ากับ 0.19 %

ดังนั้นเราจึงต้องทำการ stabilize ผงโลหะตัวอย่างเพื่อให้มีกำลังสูงขึ้น อันเป็นวัตถุประสงค์หลักในการวิจัยครั้งนี้

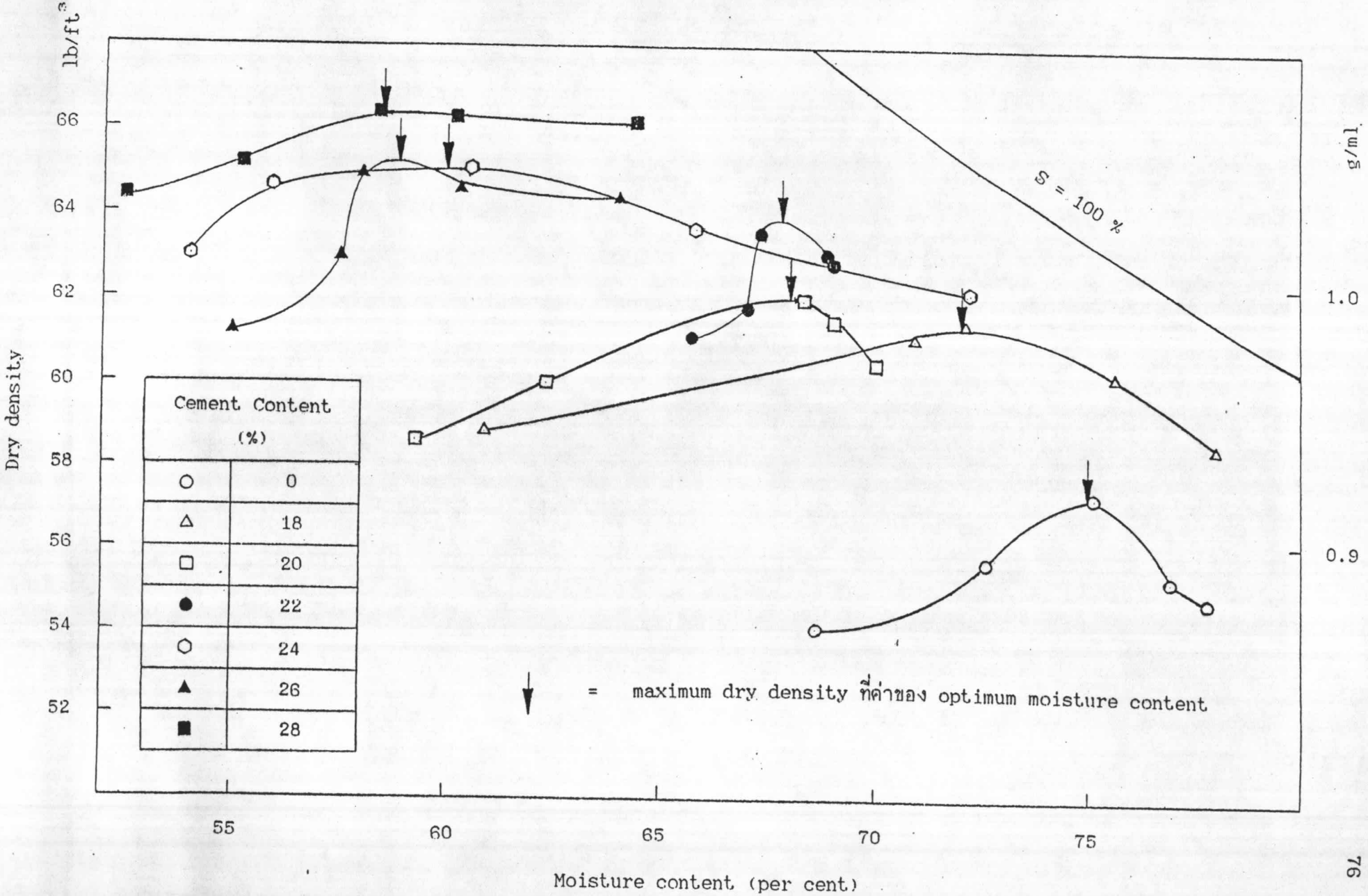
5.4 ผลการทดสอบการบดอัดผงโลหะผสมซีเมนต์

จากการทดสอบการบดอัดผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ คิดเป็นเปอร์เซนต์ของน้ำหนักผงโลหะตัวอย่าง โดยใช้การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตราฐาน (วิธี ก.) ตามมาตราฐานกรมทางหลวง ผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 5.1 ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์จะพบว่า ถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์มากขึ้นค่าของ OMC จะลดลง และค่าของ maximum dry density จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และในรูปที่ 5.3 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ที่ใช้และค่าของ maximum dry density

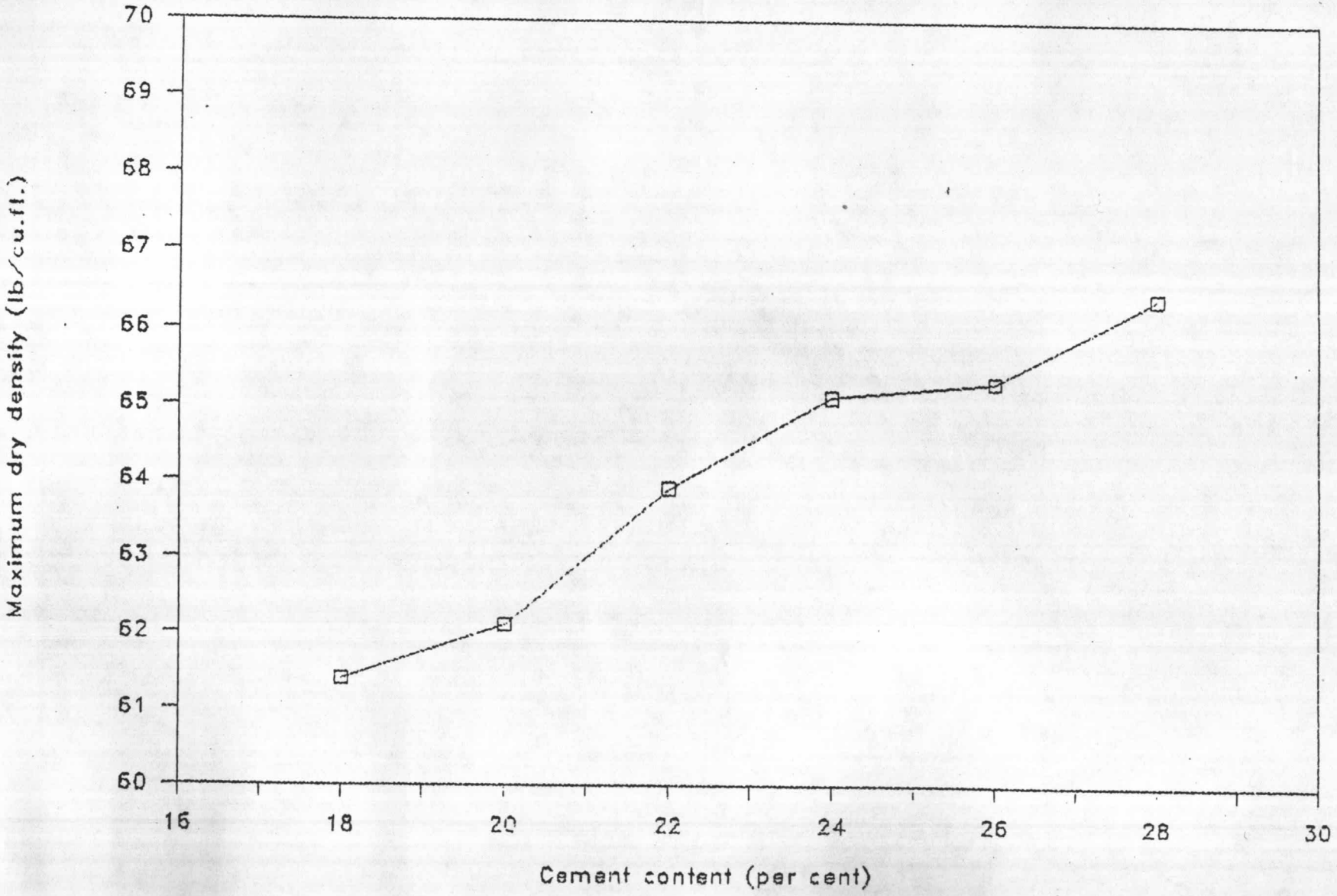
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบหาค่า optimum moisture content และ maximum dry density ของผงโลหะตัวอย่างซึ่งผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ

THE RELATIONSHIP BETWEEN OPTIMUM MOISTURE CONTENT AND MAX. DRY DENSITY

Cement content (%)	OMC (%)	Maximum dry density (lb/cu.ft.)
0	75.0	57.2
18	72.0	61.4
20	68.0	62.1
22	67.8	63.9
24	60.0	65.1
26	58.9	65.3
28	58.5	66.4



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง moisture content และ dry density ของผงโลหะตัวอย่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ และค่าของ maximum dry density

5.5 ผลการทดสอบหาค่า unconfined compressive strength (UCS) และค่า CBR ของผงโลหะผสมซีเมนต์

จากการทดสอบหาค่า unconfined compressive strength (UCS) ของผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ กัน ผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 5.2 รูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 และเมื่อทำการทดสอบหาค่า CBR ก็จะได้ผลดังตารางที่ 5.3 รูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ซึ่งค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบทั้งสองวิธีดังกล่าวได้ผลเป็นที่สอดคล้องกัน และสามารถนำมาวิเคราะห์อิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับผงโลหะผสมซีเมนต์ได้ดังนี้คือ

5.5.1 อิทธิพลเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี แยกวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 18 เปอร์เซนต์ ถึง 26 เปอร์เซนต์ และกรณีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 28 เปอร์เซนต์ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

5.5.1.1 กรณีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 18 เปอร์เซนต์ถึง 26 เปอร์เซนต์ จะเห็นได้ว่าค่าของกำลังจะสูงขึ้นที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.7

ทั้งนี้เป็นเพราะได้เกิดปฏิกริยา cement hydration ระหว่างน้ำกับซีเมนต์ขึ้นดังนี้คือ

ช่วงแรก เป็นช่วงที่เกิดปฏิกริยาสูงหลังจากผสมในวันแรกคือ

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \text{ ----------> } 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

(CAH)

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบหาค่า unconfined compressive strength ของผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ กัน

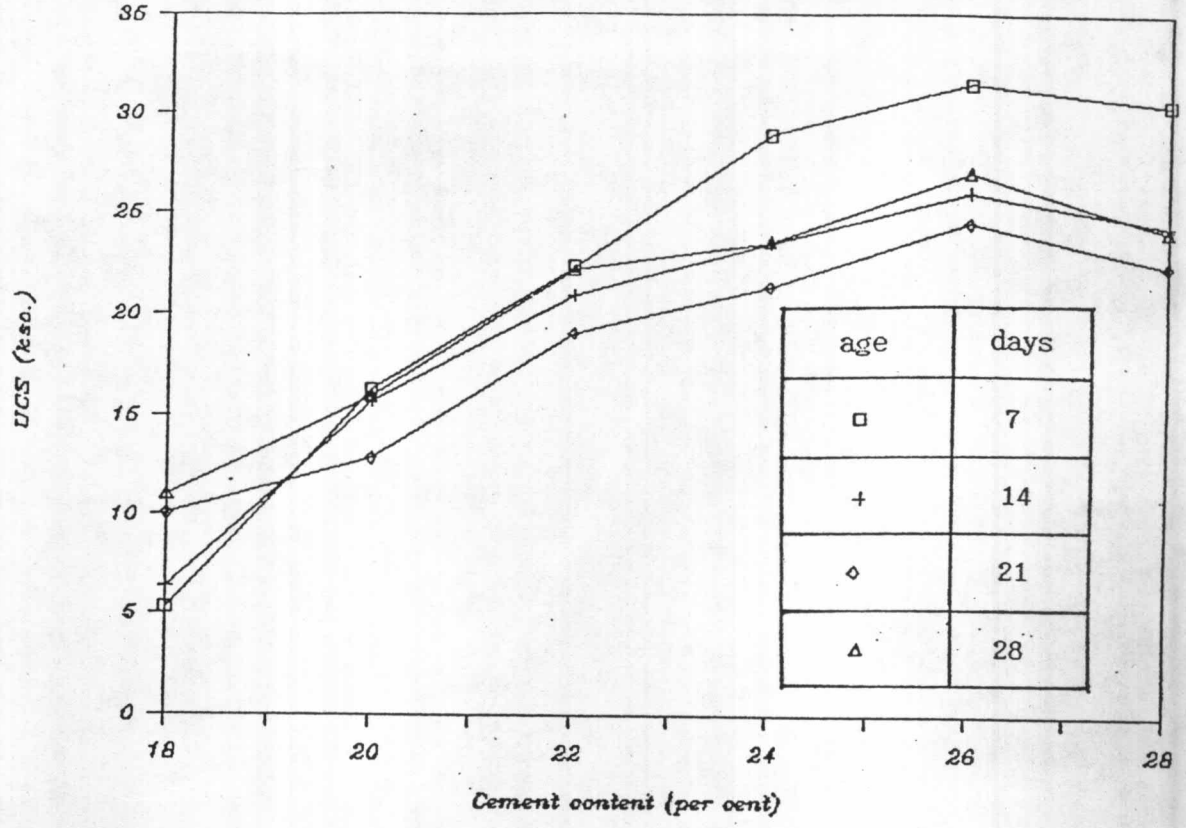
A SUMMARY OF UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (ksc.)

Cement content (%)	7 days	14 days	21 days	28 days
18	5.32	6.36	10.05	11.02
20	16.23	15.67	12.80	15.89
22	22.30	20.89	19.00	22.16
24	28.93	23.50	21.35	23.57
26	31.47	26.02	24.48	27.01
28	30.43	24.34	22.37	24.12

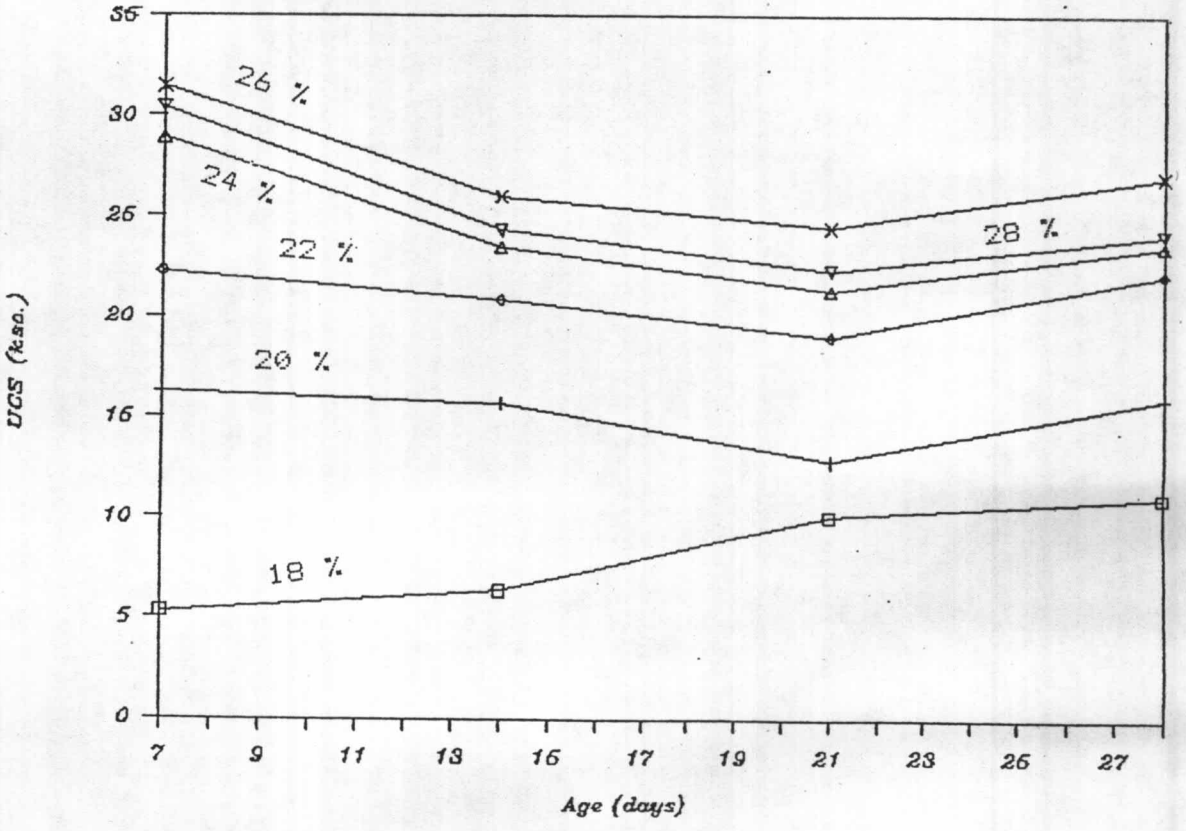
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบหาค่า unsoaked CBR ของผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ กัน

A SUMMARY OF UNSOAKED CBR (%)

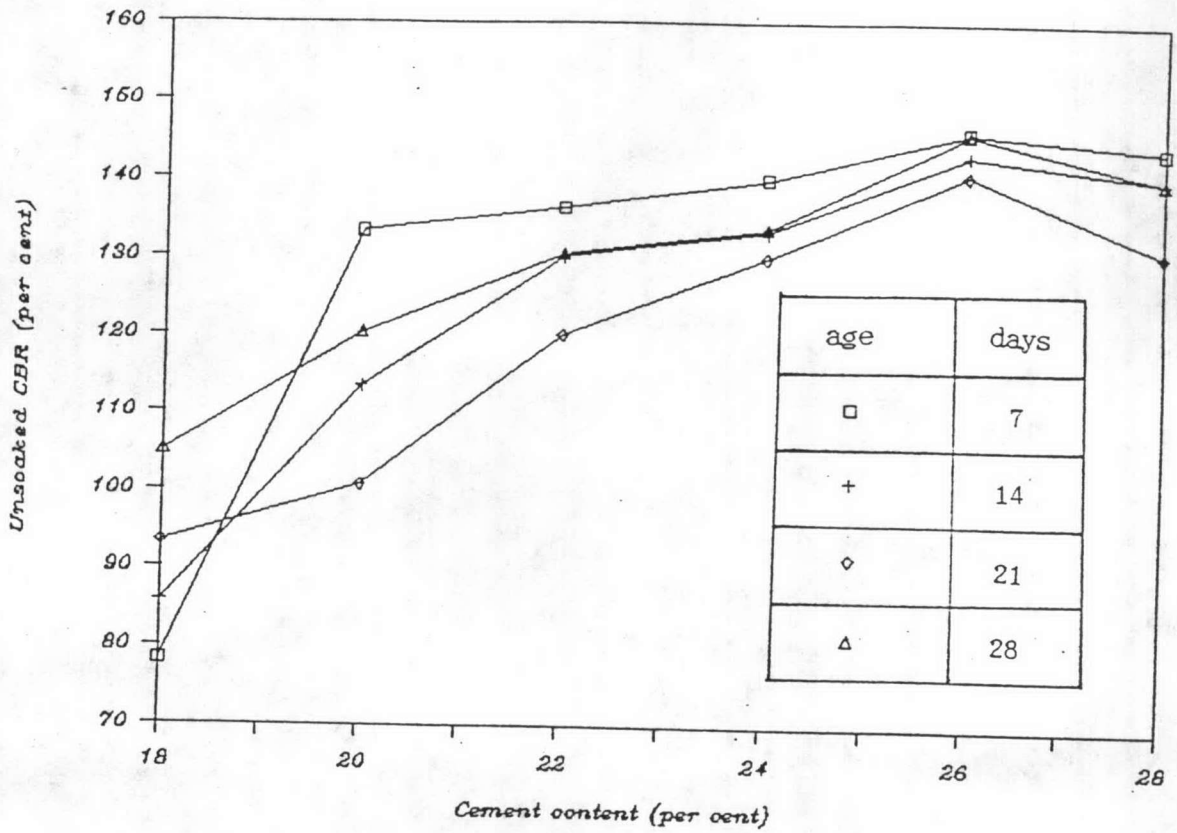
Cement content (%)	7 days	14 days	21 days	28 days
18	78.3	85.7	93.3	105.1
20	133.3	113.3	100.7	120.3
22	136.3	130.0	120.0	130.4
24	140.0	133.3	130.0	133.7
26	146.0	143.0	140.6	145.8
28	143.8	140.1	130.7	140.0



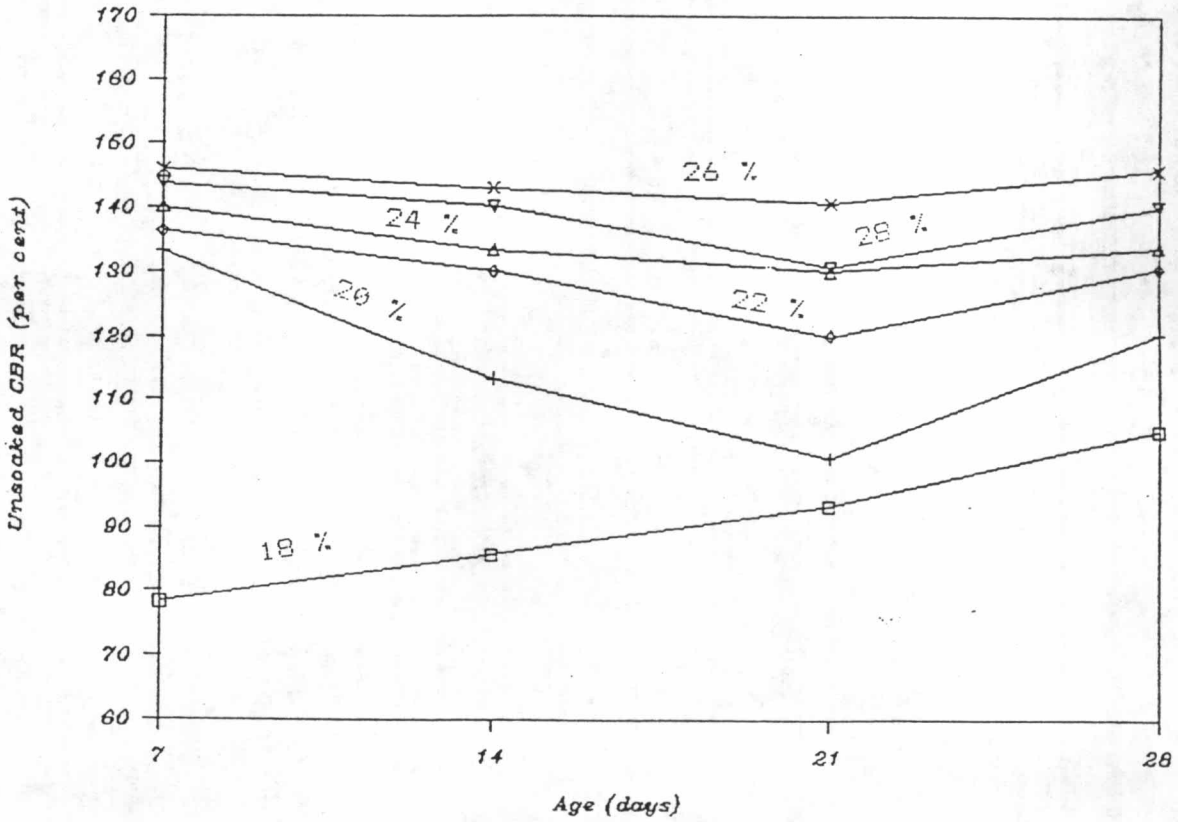
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unconfined compressive strength และปริมาณซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unconfined compressive strength และระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unsoaked CBR และปริมาณซีเมนต์ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unsoaked CBR และระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ

ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่เกิดปฏิกริยาสูงในระหว่างวันที่ 2 ถึงวันที่ 7 หลังจากการผสมคือ

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

ช่วงที่สาม เป็นช่วงที่เกิดปฏิกริยาสูงภายหลัง 7 วันของการผสมคือ

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

ซึ่งสาร calcium silicate hydrate (CSH) และสาร calcium aluminate hydrate (CAH) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยึดเชื่อมหรือตัวประสาน จึงทำให้เกิดการจับตัวกันของผงโลหะตัวอย่าง และมีผลให้กำลังสูงขึ้น

5.5.1.2 <u>กรณีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 28 เปอร์เซนต์</u> จะเกิดปฏิกริยาทั้ง 2 แบบดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.5.1.2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณซีเมนต์ที่ 26 เปอร์เซนต์ ที่อายุการบ่มเท่ากันแล้ว จะพบว่าค่าของ UCS และค่าของ CBR จะลดลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปฏิกริยาของ cement เมื่อผสมกับผงโลหะแล้ว จะคล้ายกับการทำ Lime Stabilization ซึ่งจะมีค่า Optimum value of cement content

5.5.2 อิทธิพลเนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพ สามารถแยกวิเคราะห์ได้ดังนี้คือ

5.5.2.1 Dry density โดยทั่วไปแล้วเมื่อ maximum dry density สูงขึ้น stabilized - material จะมีกำลังสูงขึ้นด้วย แต่สำหรับผงโลหะผสมซีเมนต์นี้จะต้องพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 18 เปอร์เซนต์ถึง 26 เปอร์เซนต์ กำลังของผงโลหะผสมซีเมนต์จะสูงขึ้นตาม maximum dry density ที่สูงขึ้น แต่ที่ปริมาณซีเมนต์ 28 เปอร์เซนต์นั้น ถึงแม้ว่า maximum dry density จะสูงขึ้น แต่กำลังของผงโลหะผสมซีเมนต์จะลดลงไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.6 ทั้งนี้เพราะการเกิดปฏิกริยา cement hydration ที่ไม่สมบูรณ์ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.5.1.3

5.5.2.2 Moisture content ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ปริมาณน้ำที่ OMC ซึ่งให้ค่า maximum dry density ใส่ลงไปในผงโลหะผสมซีเมนต์ทุกตัวอย่างของการทดลอง เพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา cement hydration ขึ้น อันมีผลทำให้ผงโลหะผสมซีเมนต์มีกำลังสูงขึ้น แต่บางครั้งปริมาณน้ำที่ OMC ที่มีค่าน้อยอาจจะทำให้เกิดการลดค่าของ degree of cement hydration ดังในตัวอย่างที่ผสมปริมาณซีเมนต์ 28 เปอร์เซนต์

5.5.2.3 การผสม (mixing) เนื่องจากผงโลหะตัวอย่างที่นำมาศึกษาวิจัยในครั้งนี้อยู่ในลักษณะรวมตัวกันเป็นก้อนและมีความชื้นผสมอยู่ จึงได้นำมาอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซียลเซียส และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ก่อนที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งทำให้มีช่องว่าง (air - void) อยู่ ดังที่ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 5.2

5.5.3 อิทธิพลเนื่องจากการบ่ม (curing) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบใน 2 องค์ประกอบคือ ระยะเวลาที่ทำการบ่มและการแช่น้ำ (soaking) ของผงโลหะผสมซีเมนต์

5.5.3.1 ระยะเวลาที่ทำการบ่ม จากการที่บ่มผงโลหะผสมซีเมนต์ตัวอย่างในถุงพลาสติกปิดปากแน่นเพื่อไม่ให้ความชื้นเปลี่ยนแปลง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องโดยเฉลี่ยประมาณ 29.0 องศาเซียลเซียส พบว่าเมื่อทำการบ่มผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ 18 เปอร์เซนต์ ค่าของกำลังจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มที่นานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.7 ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลได้ดังหัวข้อที่ 5.5.1.1

5.5.3.2 การแช่น้ำ (soaking) เมื่อทำการแช่น้ำผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ 18 เปอร์เซนต์ และที่ 24 เปอร์เซนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ กัน เป็นเวลานาน 4 วัน แล้วนำมาทดสอบหาค่า soaked CBR เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ unsoaked CBR ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าของ unsoaked CBR จะมีค่ามากกว่า soaked CBR ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 ตารางที่ 5.5 รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ 24 เปอร์เซนต์ จะมีการลดลงของกำลังภายหลังการแช่น้ำในสัดส่วนที่น้อยกว่าผงโลหะผสมซีเมนต์ 18 เปอร์เซนต์

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าของการดูดซึมน้ำ (water absorption) จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.10 ส่วนค่าของการบวมตัว (swell) ของผงโลหะผสมซีเมนต์จะมีค่าน้อยมาก โดยเฉพาะภายหลังระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ไปแล้วจะไม่มีการบวมตัวของผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณ 18 เปอร์เซนต์ และ 24 เปอร์เซนต์ เกิดขึ้นเลย ดังแสดงในตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.11

5.5.4 อิทธิพลเนื่องจากซีเมนต์ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ตามมาตราฐาน มอก. เพียงอย่างเดียวตลอดการทดลอง ดังนั้นความสำคัญจึงอยู่ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับอิทธิพลเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.5.1

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า unconfined compressive strength (UCS) กับค่า unsoaked CBR ของผงโลหะผสมซีเมนต์

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่า UCS และ unsoaked CBR โดยการนำค่าต่าง ๆ ของUCS และunsoaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มเดียวกันมาทำการทดลองหาความสัมพันธ์ พบว่าสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ในลักษณะสมการถดถอยเส้นตรง (linear regression) ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และรูปที่ 5.12 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์

ตารางที่ 5.4 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 18 เปอร์เซนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

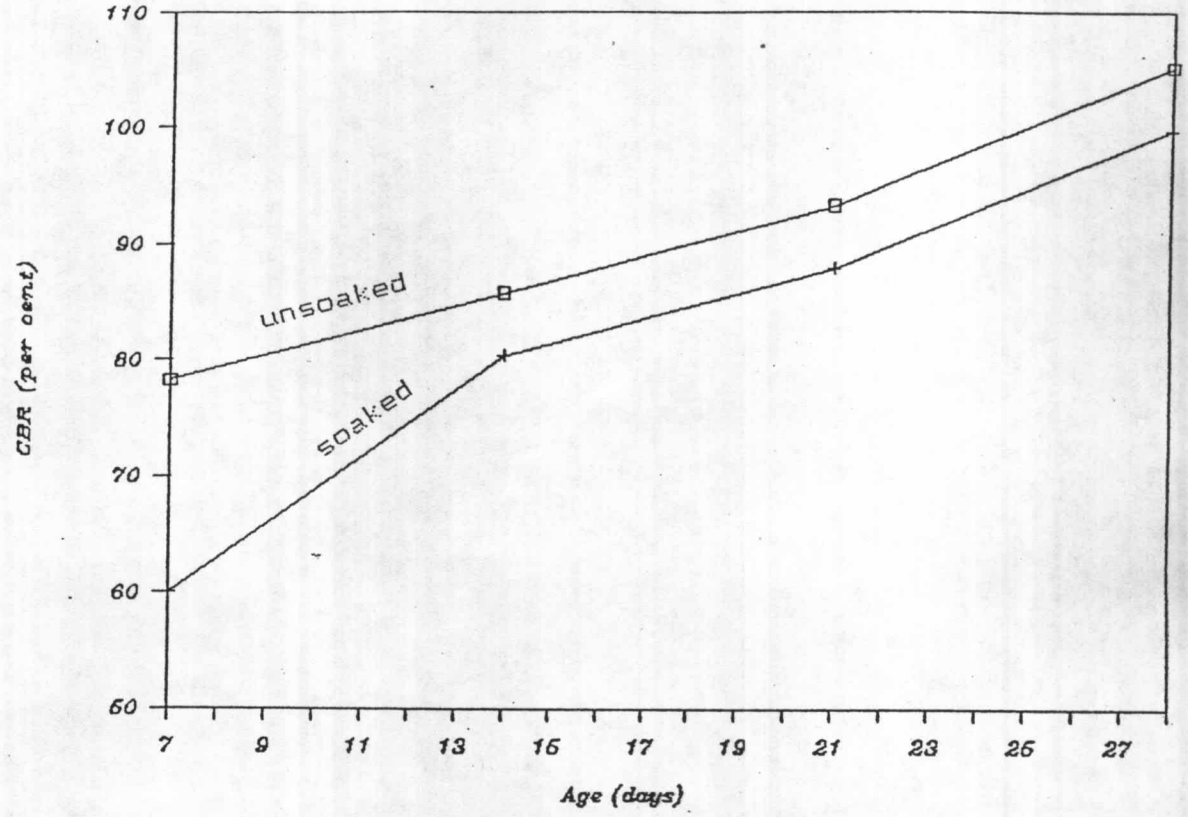
THE COMPARISON BETWEEN UNSOAKED AND SOAKED CBR AT 18% CEMENT CONTENT

Type	7 days	14 days	21 days	28 days
Unsoaked CBR	78.3	85.7	93.3	105.1
Soaked CBR	60.0	80.3	87.9	99.7

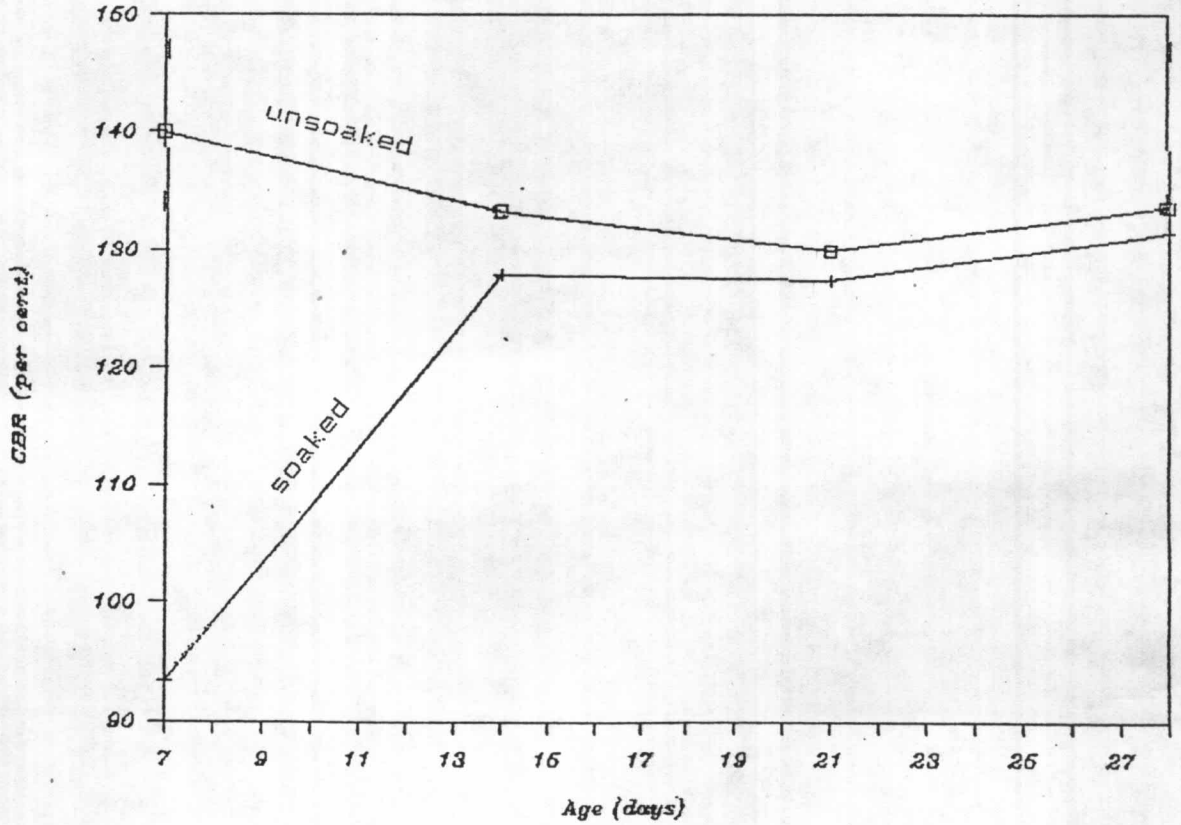
ตารางที่ 5.5 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 24 เปอร์เซนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

THE COMPARISON BETWEEN UNSOAKED AND SOAKED CBR AT 24% CEMENT CONTENT

Type	7 days	14 days	21 days	28 days
Unsoaked CBR	140.0	133.3	130.0	133.7
Soaked CBR	93.3	128.0	127.5	131.6



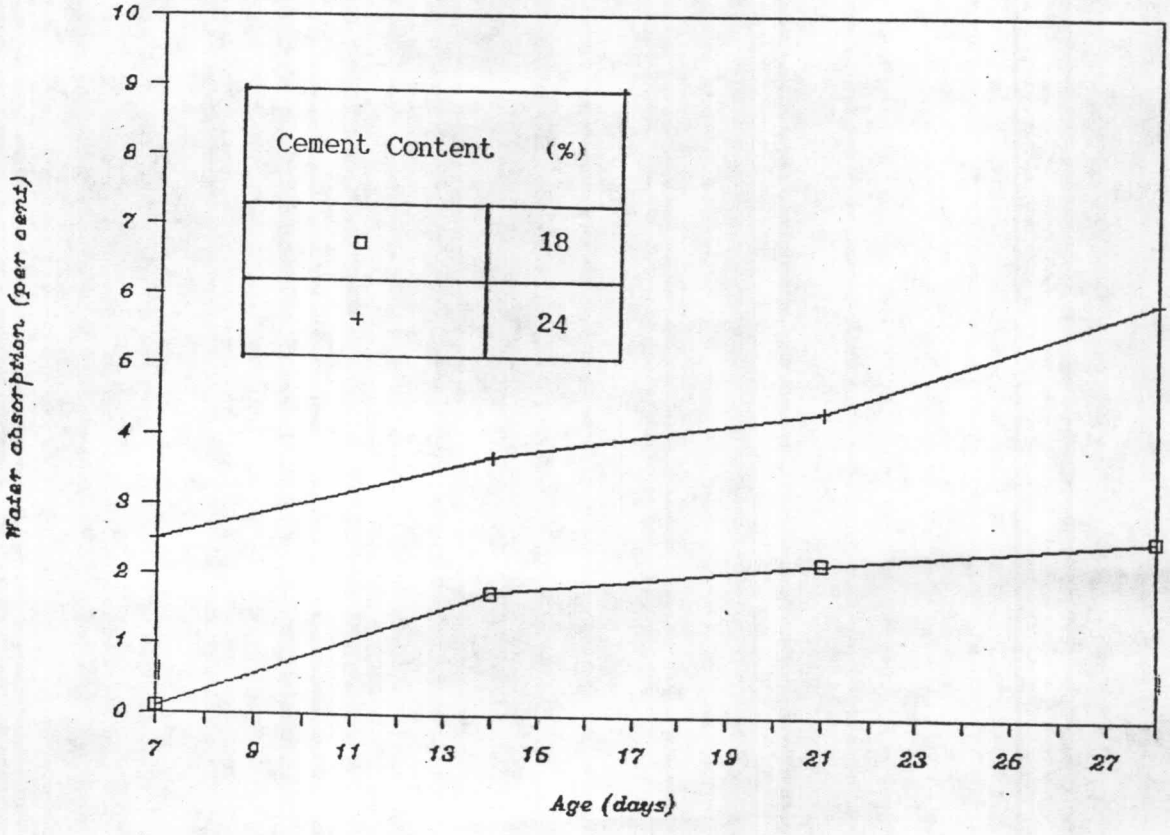
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 18 เปอร์เซนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 24 เปอร์เซนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption)

A SUMMARY OF WATER ABSORPTION (%)				
Cement content (%)	7 days	14 days	21 days	28 days
18	0.10	1.74	2.19	2.56
24	2.50	3.68	4.35	5.92

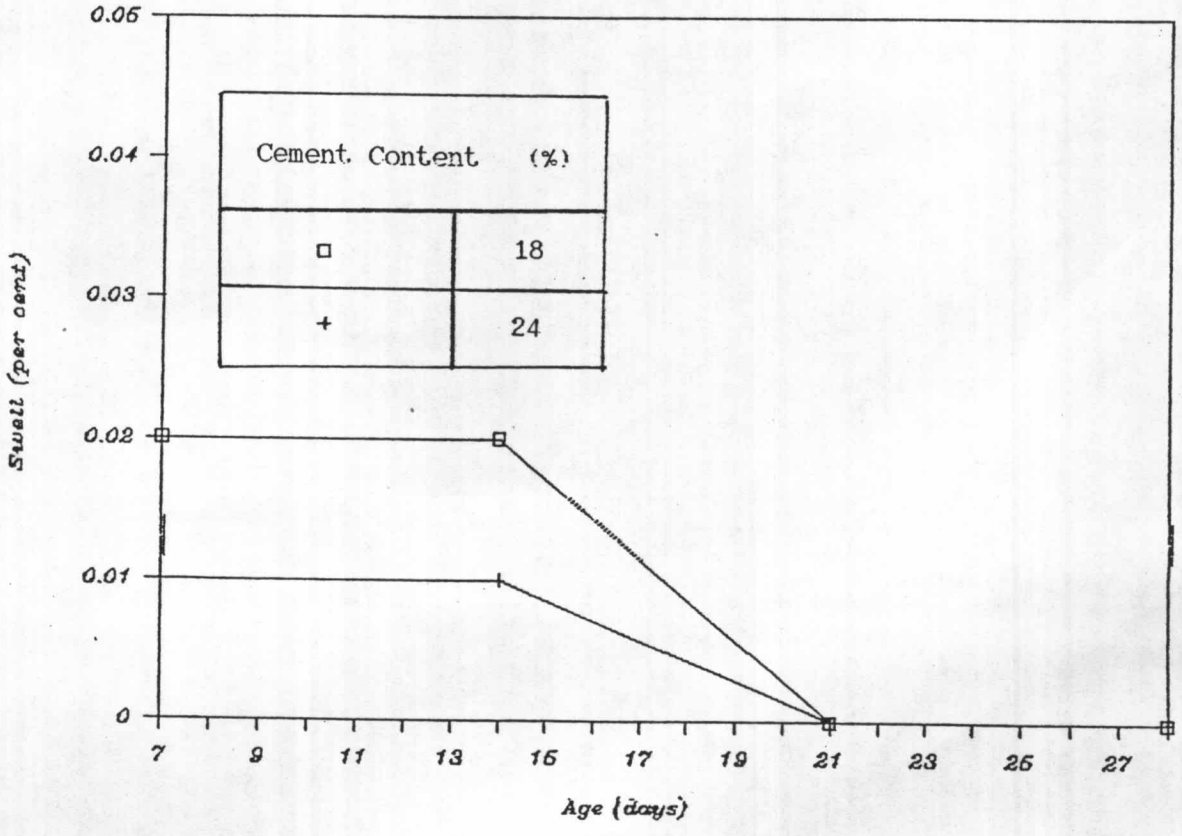


รูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการดูดซึมน้ำ (water absorption)

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดสอบหาค่าการบวมตัว (swell)

A SUMMARY OF SWELL (%)

Cement content (%)	7 days	14 days	21 days	28 days
18	0.02	0.02	0.00	0.00
24	0.01	0.01	0.00	0.00



รูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการบวมตัว (swell)

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ UCS และ unsoaked CBR ที่ได้จากการทดสอบ

THE RELATIONSHIP BETWEEN UCS AND CBR (UNSOAKED)

UCS (ksc.)	CBR (%)	Cement content (%)	Curing time (days)
4.70	75.0	0.0	0
5.32	78.3	18.0	7
16.23	133.3	20.0	7
22.30	136.3	22.0	7
28.93	140.0	24.0	7
31.47	146.0	26.0	7
30.43	143.8	28.0	7
6.36	85.7	18.0	14
15.67	113.3	20.0	14
20.89	130.0	22.0	14
23.50	133.3	24.0	14
26.02	143.0	26.0	14
24.34	140.1	28.0	14
10.05	93.3	18.0	21
12.80	100.7	20.0	21
19.00	120.0	22.0	21
21.35	130.0	24.0	21
24.48	140.6	26.0	21
22.37	130.7	28.0	21
11.02	105.1	18.0	28
15.89	120.3	20.0	28
22.16	130.4	22.0	28
23.57	133.7	24.0	28
27.01	145.8	26.0	28
24.12	140.0	28.0	28

Regression Output:

Constant	70.63501
Std Err of Y Est	6.373725
R Squared	0.917117
No. of Observations	25
Degrees of Freedom	23
X Coefficient(s)	2.699752
Std Err of Coef.	0.169230

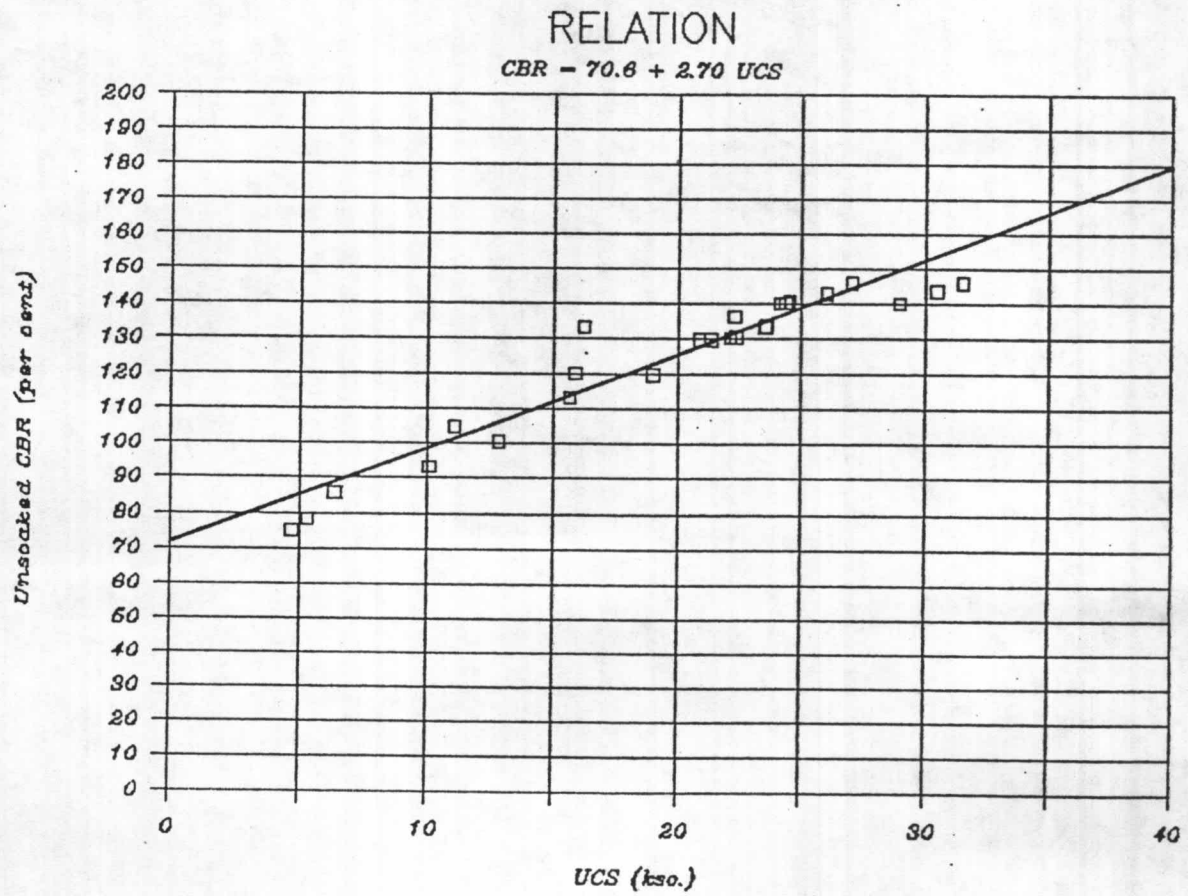
ระหว่างค่าของ unsoaked CBR และค่าของ UCS ที่ปริมาณซีเมนต์ใด ๆ คือ

$$CBR = 70.6 + 2.70\ UCS$$

โดยที่ CBR มีหน่วยเป็น เปอร์เซนต์

และ UCS " กก./ซม.^{2}

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ ทำให้สามารถนำไปประมาณค่าของ unsoaked CBR ที่สูง ๆ ซึ่งการทดสอบเพื่อหาค่า unsoaked CBR โดยตรงกระทำได้ไม่สะดวกนัก ทั้งนี้โดยใช้การทดสอบหาค่าของ UCS ก่อน แล้วคำนวนหาค่าของ unsoaked CBR จากความสัมพันธ์ดังกล่าว



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ UCS และ unsoaked CBR