

การศึกษาผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีต

A STUDY OF SULFATE ATTACK ON CONCRETE

ดร. ชัย จัตุรพิทักษ์กุล

รศ. ดร. ไกรวุฒิ เกียรติโภมล รศ. ดร. สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Dr. C. JATURAPITAKKUL

ASSOC. Dr. K. KIATTIKOMOL ASSOC. Dr. S. CHUCHEEPSAKUL

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY THONBURI

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 โดยใช้อัตราส่วนผสมของคอนกรีต คือปูนซีเมนต์: ราย: หินเท่ากับ 1:2:3 โดยน้ำหนัก และแปรค่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) จาก 0.45 จนถึง 0.65 หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C-192 ซึ่งเมื่อถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในน้ำและในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.5 และ 3.0 โดยน้ำหนัก จากนั้นทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน, 60 วัน, 120 วัน และ 180 วัน (6 เดือน) นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตด้วย

จากการศึกษาคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทที่อายุ 180 วัน ซึ่งแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 3 และมีค่า W/C อยู่ในช่วง 0.45-0.65 พบร่วมกับความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ลดลงไม่มากนัก ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบร่วมกับ W/C และความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีต กล่าวคือ ถ้าความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าสูงและค่า W/C สูงด้วย จะมีผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงมาก นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกค่า W/C ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทุกความเข้มข้นเมื่ออายุ 180 วันสามารถสังเกตเห็นลักษณะการกัดกร่อนได้อย่างเด่นชัด แต่กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่เห็นผลดังกล่าว ดังนั้นลิ่งก่อสร้างที่ทำด้วยคอนกรีตในบริเวณที่มีสารละลายซัลเฟตอยู่ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่

5 หรือถ้าจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควรจะเลือกให้ค่า W/C ต่ำกว่า 0.45

Abstract

The effects of magnesium sulfate solution on the compressive strength of concrete made from Portland Cement Type I and V were studied. The mix proportion of concrete by weight for cement: sand: coarse aggregate is 1:2:3. The water to cement ratios (W/C) are varied from 0.45 to 0.65. The specimens of concrete were cast in accordance with ASTM C-192 and cured in water and in magnesium sulfate solution which has concentration of 0.5%, 1.5%, and 3.0% by weight. All specimens were tested for compressive strength at the age of 28, 60, 120, and 180 days. An addition study is to investigate the corrosion of concrete which is cured in magnesium sulfate solution.

The results showed that the magnesium sulfate solution up to 3% had little effect on the compressive strength of concrete made from Portland Cement Type V when used W/C ratio between 0.45 to 0.65 and immersed in the solution 180 days. On the other hand, the compressive strength of concrete made from Portland Cement Type I was affected not only by the concentration of the sulfate solution but also by the W/C ratio. The higher concentration of magnesium sulfate solution and the higher W/C ratio resulted in a decrease of the compressive strength of concrete made from Portland Cement Type I. Therefore, it is recommended to use concrete made from Portland Cement Type V or from Portland Cement Type I with the W/C ratio not to be higher than 0.45 for any suspicious area which contains sulfate solution.

บทนำ

ปัจจุบันนี้การศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของสารละลายน้ำฟอฟฟ์ (Sulfate) ต่อคอนกรีตนับว่า มีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะกรณีที่จะต้องก่อสร้างอาคารต่างๆ ในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเล เช่น ตอนใต้ ท่าเรือ ประภาคาร เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากชัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ เช่น ในดิน น้ำทะเล ชัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิด ก้าชไฮโดรเจนชัลไฟต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกล้ายเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นชัลเฟตในที่สุด [1] อำนวยการทำการทำลายของชัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของชัลเฟตและความชื้น การทำลายของชัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่จะมีอำนาจรุนแรงขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโลหะ ในอาคารสูงน้ำเพื่อการซ่อมบำรุง ฐานรากและพื้นอาคารในบริเวณที่ดินมีชัลเฟต

ในน้ำทะเลความเสียหายของคอนกรีตเกิดขึ้นได้โดยการกัดกร่อนทางเคมีและการกัดเซาะทางกายภาพ

เช่น การกระแทกของคลื่นต่อโครงสร้างคอนกรีต หรือการอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ในน้ำทะเลสารเคมีส่วนใหญ่ที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมชัลเฟต ($MgSO_4$) [2,3,4] ส่วนเกลือแร่ ($NaCl$) กับเกลือโปตัลเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งพบมากในน้ำทะเล เช่นกันมีผลกับคอนกรีตน้อยมาก [5] แต่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้่ายากคอนกรีตมีค่าการซึมผ่าน (Permeability) สูง ในน้ำได้ดีนั่นที่มีแคลเซียมชัลเฟต หรือยิบชัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) มักจะมีชัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปแล้วดินจะมีชัลเฟตอยู่เล็กน้อย คือประมาณร้อยละ 0.01-0.05 ของน้ำหนัก แต่จะมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปูyetเคมีและปูyetธรรมชาติ

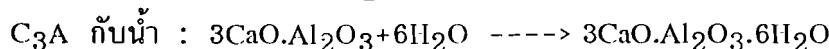
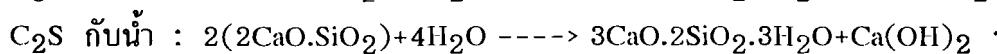
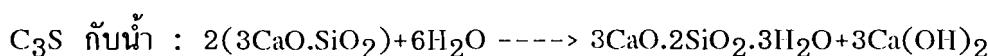
การศึกษาเรื่องผลกระทบของชัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และจำเป็นอย่างมากหากจะต้องก่อสร้างคอนกรีตในบริเวณที่มีชัลเฟตอยู่ เพราะหากไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากชัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้ว อาจจะเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้ในอนาคต เนื่องจากการซ่อมแซมคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนแล้วจะเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อคอนกรีต เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณของสารละลายชัลเฟต และ อายุของคอนกรีต ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการแนะนำการใช้คอนกรีตที่เหมาะสมในบริเวณที่มีสารละลายชัลเฟตอยู่

ผลกระทบของชัลเฟตต่อคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) มีสารประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ชนิด คือ

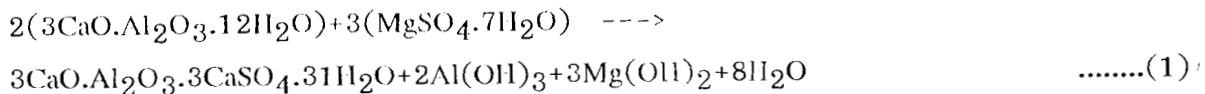
1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO \cdot SiO_2$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_3S ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่คอนกรีตในระยะแรกๆ สูง และให้ความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยา กับน้ำ
2. ไಡแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO \cdot SiO_2$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_2S ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่คอนกรีตในระยะแรกๆ ต่ำ แต่ให้กำลังสูงขึ้นภายหลัง และให้ความร้อนต่ำเมื่อทำปฏิกิริยา กับน้ำ
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_3A ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่คอนกรีตน้อยหรือเกือบไม่มีเลยยกเว้นในช่วงอายุแรกๆ เมื่อแข็งตัวจะทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากชัลเฟต แต่ว่าจำเป็นต้องมี C_3A ในปูนซีเมนต์ เพราะ C_3A จะเป็นฟลัก (Flux) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในการเผาเม็ดปูนลดลง เป็นการลดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการเผาปูนซีเมนต์ลง
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_4AF สารประกอบตัวนี้ก์ทำหน้าที่เป็นฟลักด้วยเช่นกัน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีปฏิกิริยาที่สำคัญเกิดขึ้นดังต่อไปนี้ คือ [6]

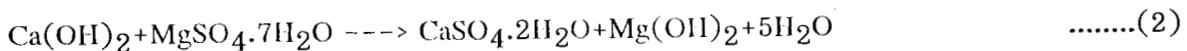


C_4Al กับน้ำ : C_4Al ทำปฏิกิริยากับน้ำและยึดชั่ม คล้ายกับปฏิกิริยาเดิมของ C_3A กับน้ำและยึดชั่ม ผลของปฏิกิริยาคือ แคลเซียมซัลฟอลูมิเนตและแคลเซียมฟลีฟอเรต์ ซึ่งเปลี่ยนเป็นแคลเซียมเฟอร์ไรต์ ไฮเดรตในที่สุด

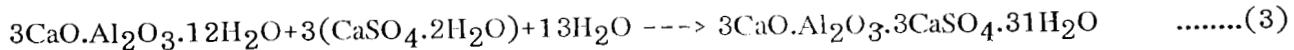
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต $(3CaO.Al_2O_3.12H_2O)$ ได้สารประกอบคือ แคลเซียมอลูมินัมซัลเฟตไฮเดรต $(3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O)$ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $(3Mg(OH)_2)$ และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $(2Al(OH)_3)$ ซึ่งแสดงตามสมการทางเคมีดังนี้ [4]



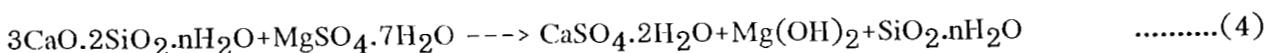
แมกนีเซียมซัลเฟตยังจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยึดชั่มตามสมการที่ (2)



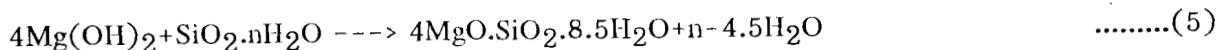
ยึดชั่มที่ได้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตได้เป็นแคลเซียมอลูมินัมซัลเฟตไฮเดรตดังสมการที่ (3)



นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต $(3CaO.2SiO_2.nH_2O)$ ได้สารประกอบใหม่คือแคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล $(SiO_2.nH_2O)$ ดังสมการที่ (4) คือ



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ (4) อาจจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตตามสมการ (3) ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเกิดตามปฏิกิริยาในสมการที่ (1) หรือ (4) จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจลเกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต $(4MgO.SiO_2.8.5H_2O)$ ดังสมการที่ (5) คือ



ปฏิกิริยาตามสมการข้างต้นพบว่ายึดชั่ม $(CaSO_4.2H_2O)$ ซึ่งเกิดตามสมการที่ (4) และแคลเซียมอลูมินัมซัลเฟตไฮเดรตหรือแคลเซียมซัลฟอลูมิเนต $(3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O)$ ซึ่งเกิดตามสมการที่ (3) จะร

การขยายตัวมากทำให้มีปริมาตรมากขึ้น ทำให้เกิดแรงดันภายในและเป็นผลให้เนื้อของคอนกรีตแตกหักในที่สุด ส่วนแมกนีเซียมชิลิเกตไสเดรตซึ่งเกิดตามสมการที่ (5) เป็นสารสีขาวนุ่มซึ่งทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงเช่นเดียวกัน

จากสมการเดเมที่ (1) ถึง (5) หากสามารถลด C_3A ในเนื้อของจะทำให้แคลเซียมอลูมิเนตไสเดรตลดลง ซึ่งเมื่อแคลเซียมอลูมิเนตไสเดรตลดลงจะทำให้ปริมาณการเกิดยิบซัม แคลเซียมชัลฟอยลูมิเนต และแมกนีเซียมชิลิเกตไสเดรตลดลงตามไปด้วย นั่นคือทำให้การกัดกร่อนของชัลเฟตลดลง ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ ๆ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากชัลเฟตได้

Aardt and Visser [7] รายงานว่า ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) หรือที่เรียกว่า C_3A เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของชัลเฟตได้ง่ายถ้าคอนกรีตนั้นอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีชัลเฟต ที่เมือง Oslo ในประเทศนอร์เวย์ Moum และ Rosenqvist [8] พบร่องการใช้ Alum Shales เป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของชัลเฟตต่อคอนกรีตได้เนื่องจากหินชนิดนี้มี Iron Sulfide ที่ไม่เสถียรซึ่งทำปฏิกิริยากับชัลเฟตได้ง่าย Gjorv [9] รายงานการทดลองคอนกรีตประมาณ 2500 ตัวอย่าง โดยใช้ระยะเวลาทดสอบ 25-30 ปี พบร่องค่า W/C ที่มี C_3A สูง ถูกกัดกร่อนสูงมากเมื่อยู่ในน้ำทะเล และการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) = 0.55 เมื่อแข็งในน้ำทะเล 30 ปี ทำให้กำลังอัดและกำลังดัดคอนกรีตลดลงประมาณร้อยละ 20 นอกจากนี้การใช้น้ำทะเลหรือน้ำจืดผสมคอนกรีตไม่มีความแตกต่างกันเลย เมื่อคอนกรีตนั้นทำจากปูนซีเมนต์ที่มีอลูมินาสูง (High Alumina Cement)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มอก. 15 [10] ได้กำหนดปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ปูนต่อต้านชัลเฟต) ไว้ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนประเภทที่ 1 ไม่ได้กำหนดปริมาณไว้ อย่างไรก็ตาม ACI 318R-89 Building Code Commentary [11] แนะนำว่าหากใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A มากถึงร้อยละ 10 ควรจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ๆ คือประมาณ 0.40 ซึ่งจะทำให้การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตลดลง เมื่อคอนกรีตมีความซึมผ่านน้อยการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายชัลเฟตก็จะลดลงตามไปด้วย

ในประเทศญี่ปุ่น Nishibayashi และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับ ปูนซีเมนต์ที่ใช้กับน้ำทะเล (ประมาณร้อยละ 80 ของปูนชนิดนี้เป็น Blast Furnace Slag) และแซ็ตตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลและในน้ำจืดนาน 1,000 วัน พบร่องค่าของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะเสียหายมากที่สุดเมื่อใช้ค่า W/C สูง ๆ ใช้น้ำทะเลเป็นส่วนผสมคอนกรีต และแซ็ตอยู่ในน้ำทะเล นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการบ่มคอนกรีตก่อนเป็นเวลา ๒๕ วันก่อนแซ็ตในน้ำทะเลไม่ได้ช่วยให้ความคงทนของคอนกรีตดีขึ้นถ้าคอนกรีตนั้นมีค่า W/C สูง ๆ ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี Blast Furnace Slag ผสมอยู่ร้อยละ 80 ไม่พบผลกระทบที่เด่นชัดของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเหล่านี้เมื่อทดสอบที่อายุ 1,000 วัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ การศึกษาถึงผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่ใช้แซคคอนกรีต ต่อการอัดคอนกรีตเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงผลกระทบของค่าอัตราล่วงน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อการกัดกร่อนเมื่อใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทนี้

การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5
2. ทราย - ทรายก่อสร้างหรือทรายน้ำเจด มีโมดูลส์ความละเอียด (Fineness Modulus) = 3.12
3. หิน - หินย่อยมีขนาดโตสุด 1.5 มิลลิเมตร และมีค่าโมดูลส์ความละเอียดเท่ากับ 8.30
4. น้ำ - น้ำประปา
5. แมกนีเซียมชัลเฟต ($MgSO_4$) ชนิด Commercial Grade ที่ทำปริมาณของชัลเฟตได้แน่นอน เพื่อใช้ในการทำสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตตามความเข้มข้นที่ระบุ

การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง

- 1) เตรียมคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C-192 [13] โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5
- 2) เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออกและนำไปบ่มในน้ำและน้ำที่มีสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตเข้มข้น 0.5% 1.5% และ 3%
- 3) ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ประเภทที่ 1 หรือ ประเภทที่ 5) : ทราย : หิน เท่ากับ 1:2:3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ 0.450 0.500 0.575 และ 0.650
- 4) กำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกทำการทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 60 120 และ 180 วัน นอกจากนี้ก่อนการทดสอบแรงอัดจะทำการสั่นเกตลักษณะผิวภายนอกของแท่งตัวอย่างด้วย
- 5) แต่ละค่าของการทดสอบกำลังอัดหาได้จากค่าเฉลี่ยของคอนกรีตจำนวน 5 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบทำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จำนวน 640 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กันและทำการทดสอบจนกระทั่งคอนกรีตแตกใน 120 วัน ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของปูนซีเมนต์ ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต์ที่ใช้และวัย กำลังอัดคอนกรีต อายุของคอนกรีต ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีต

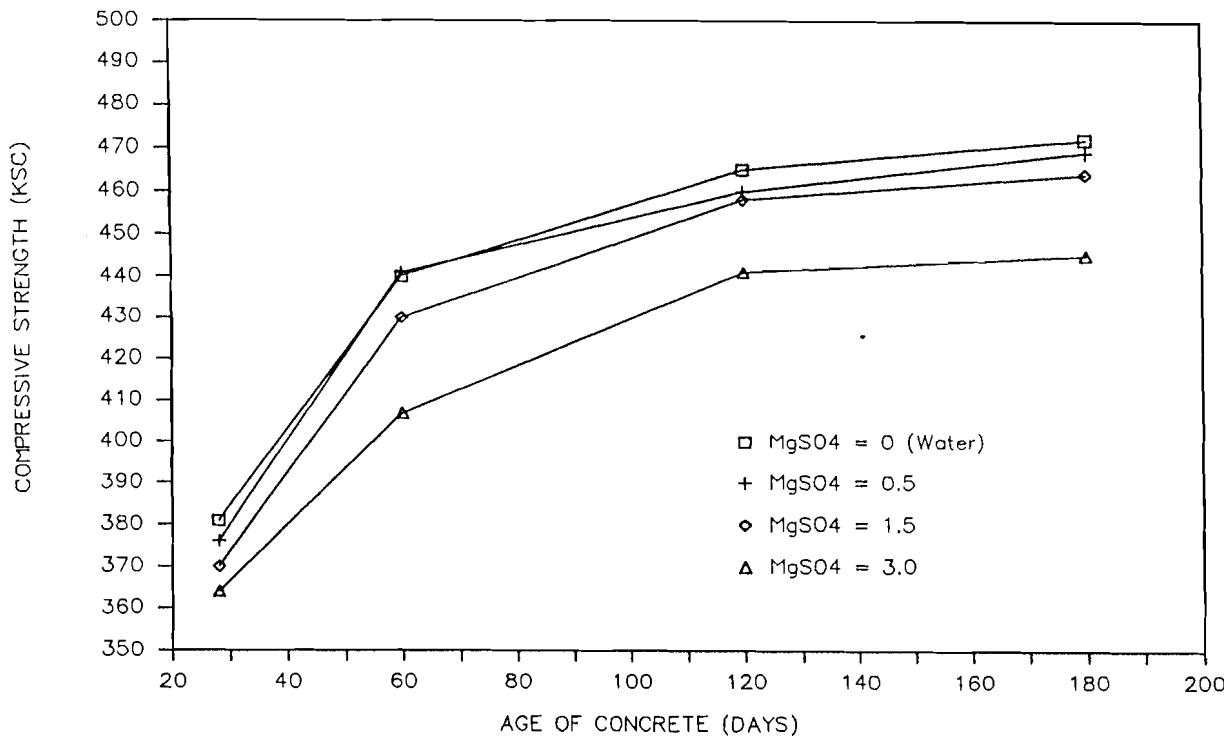
ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รูปที่ 1 ถึง แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับอายุของคอนกรีตที่
ทราบ กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ในน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงอายุ 28-120 วัน แต่หลังจากนั้นในช่วงอายุ 120-180 วัน ก็ไม่ได้อัดเก็บจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงอายุ 28-120 วัน แต่หลังจากนั้นที่ช่วงอายุ 120-180 วัน กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต์จะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่อายุ 120 วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากคอนกรีตถูกสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต์กัดกร่อนเพราะสามารถเห็นสะเก็ดขนาดเล็กๆ เกิดอยู่รอบตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบโดยทั่วไป

ตารางที่ 1 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

W/C	Curing in $MgSO_4$ (%)	Compressive Strength (ksc)			
		28-day	60-day	120-day	180-day
0.450	0 (Water)	381	440	465	472
	0.5	376	441	460	469
	1.0	370	430	458	464
	3.0	364	407	441	445
0.500	0 (Water)	338	375	424	435
	0.5	331	364	396	424
	1.0	332	367	390	413
	3.0	326	350	373	392
0.575	0 (Water)	231	323	355	359
	0.5	228	316	331	325
	1.0	220	283	295	280
	3.0	220	277	286	272
0.650	0 (Water)	168	251	289	299
	0.5	164	243	282	281
	1.0	154	237	271	262
	3.0	153	224	258	237

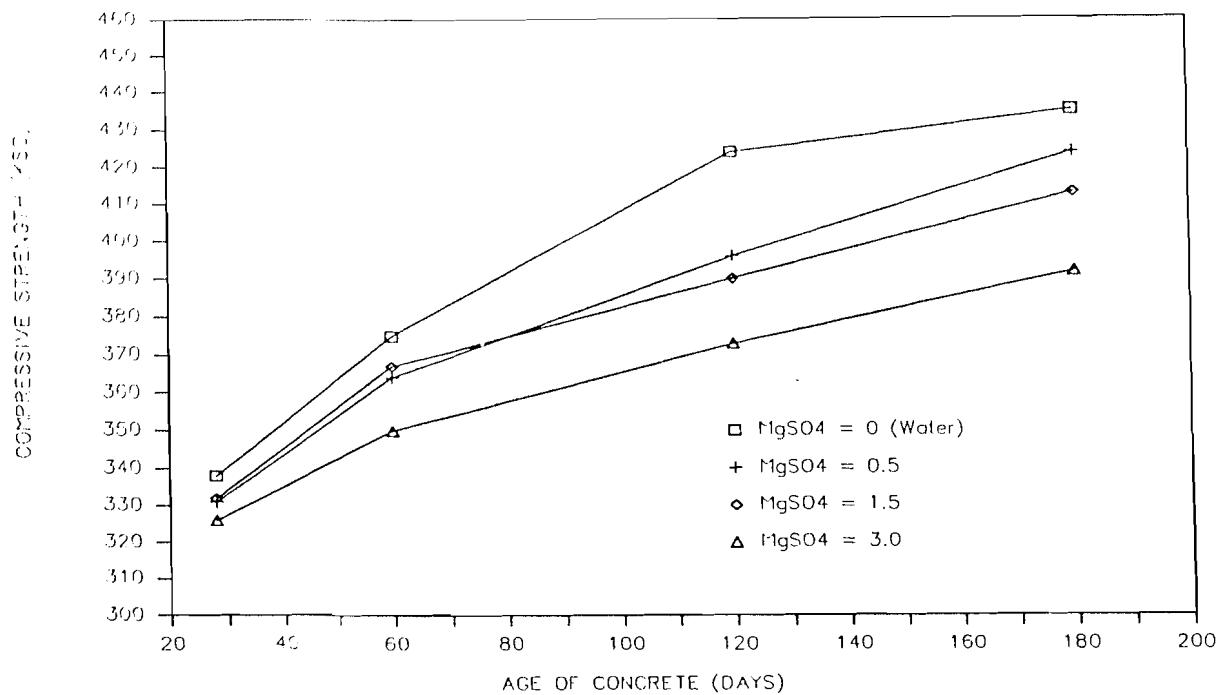
ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารละลายน้ำมีค่า $W/C = 0.450$, 0.500, 0.575 และ 0.650 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 120 วัน เท่ากับ 460, 396, 331, และ 282 กก./ซม.² ตามลำดับ และค่ากำลังอัดคอนกรีตเหล่านี้เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออายุเพิ่มเป็น 180 วัน คือมีค่ากำลังอัดเปลี่ยนเป็น 469, 424, 325 และ 281 กก./ซม.² ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสารละลายน้ำมีค่า $W/C = 0.450$ ที่จะทำให้การกัดกร่อนคอนกรีตได้ และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือ ระยะเวลาของ การกัดกร่อนยังไม่นานพอ เพราะในการทดลองครั้งนี้ใช้เวลาเพียง 6 เดือน แต่ว่าการกัดกร่อนของสารละลายน้ำมีค่า $W/C = 0.450$ จะเห็นได้ว่ามีความเข้มข้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำสูงขึ้นหรือเพิ่มระยะเวลาการทดลองให้นานกว่านี้

TYPE I CONCRETE, $W/C = 0.450$



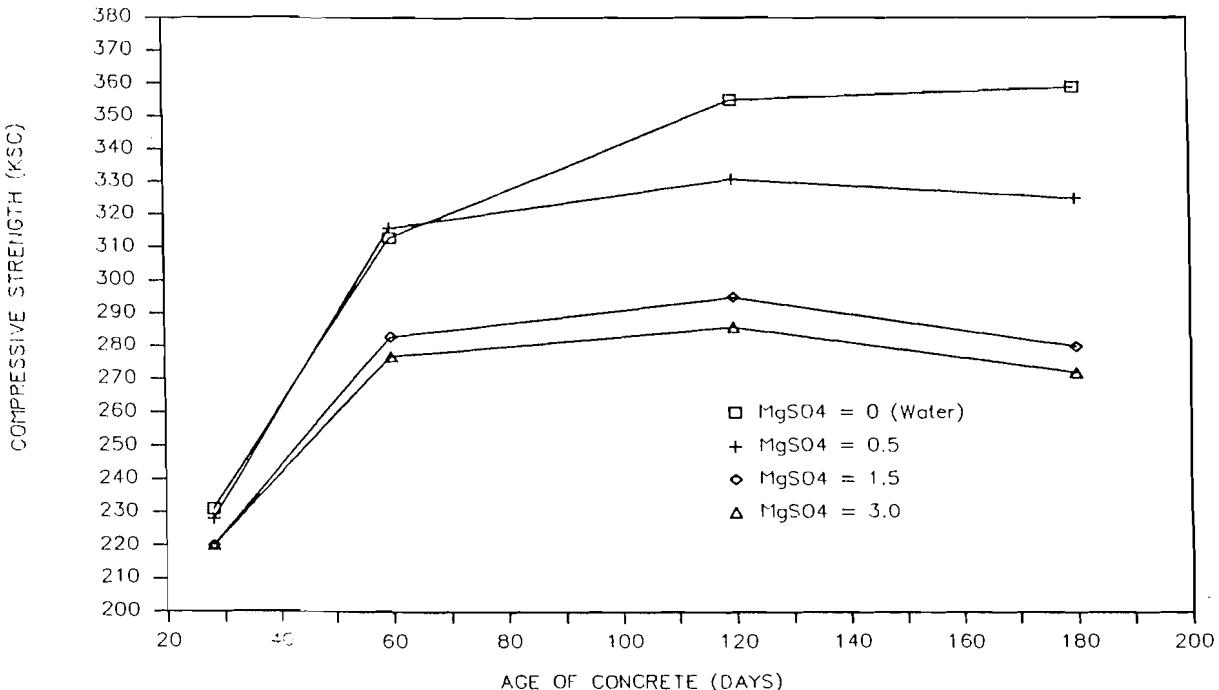
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับอายุ เมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.450

TYPE I CONCRETE, W/C = 0.500



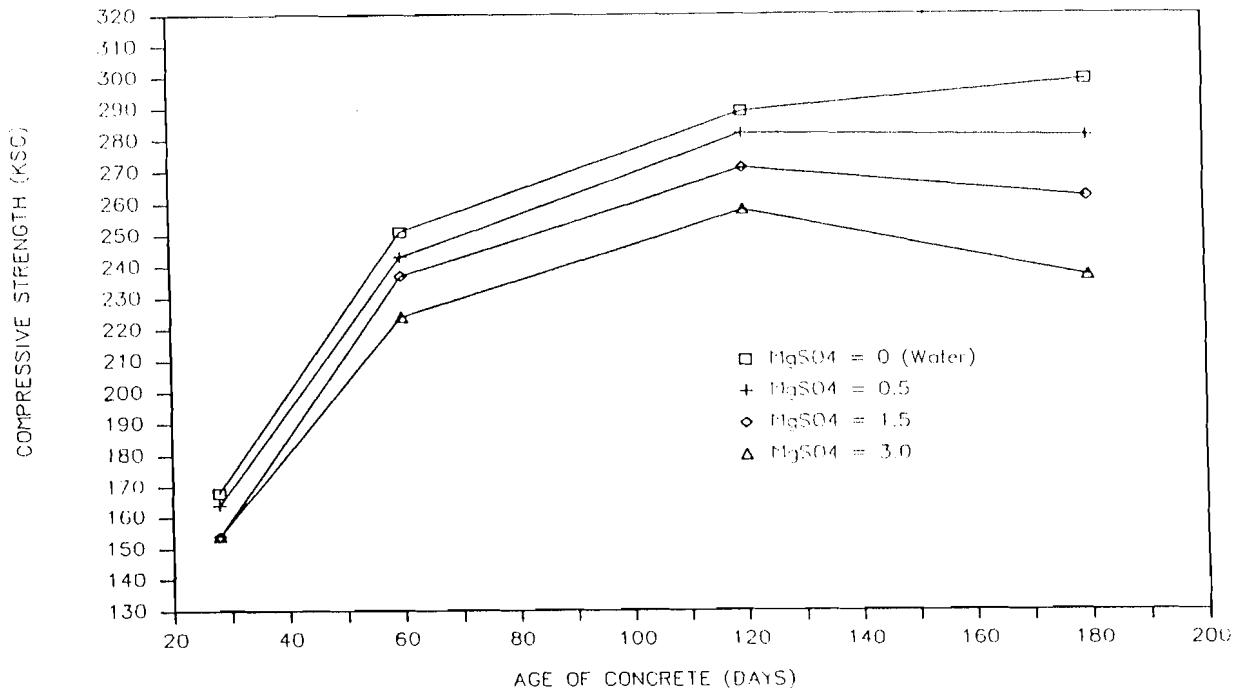
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับอายุเมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.500

TYPE I CONCRETE, W/C = 0.575



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับอายุเมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.575

TYPE I CONCRETE, W/C = 0.650



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับอายุ เมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.650

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า W/C กับความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต

การใช้คอนกรีตที่มีค่า W/C ต่ำกว่า 0.500 พบร่วมผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อ กำลังอัดคอนกรีตมีผลไม่มากนัก กล่าวคือ กำลังอัดคอนกรีตที่มีค่า W/C = 0.450 ลดลง 27 กก./ซม². เมื่อ แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต 3% เป็นเวลา 180 วัน หรือลดลงร้อยละ 5.7 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ แซ่ในน้ำธรรมชาติ และค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ลดลงเพิ่มเป็น 43 กก./ซม². หรือคิดเป็นร้อยละ 9.9 สำหรับคอนกรีตที่มีค่า W/C = 0.500

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายของแมกนีเซียมชัลเฟตสูงขึ้น การกัดกร่อนต่อคอนกรีตจะสูงขึ้นด้วย ดัง แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.575 และ 0.650 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ช่วง อายุ 28-60 วัน กำลังอัดคอนกรีตที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กันมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงว่าผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตยังไม่มีผลที่เห็นเด่นชัดต่อคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงคอนกรีตก่อนทดสอบกำลังอัดยังไม่พบการกัดกร่อนแต่อย่างใด แต่เมื่อคอนกรีตแซ่ ในสารละลายจนถึง 120 วัน พบร่วมผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตเริ่มมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีตเพราะอัตราการ เพิ่มกำลังเริ่มลดลงและยิ่งเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุ 180 วัน ดังเช่น คอนกรีตที่มีค่า W/C เท่ากับ

0.65 แซ่ในน้ำธรรมดามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 299 กก./ซม². ในขณะที่คอนกรีตอย่างเดียวกันแต่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 3% ในช่วงอายุ 60 วัน ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตยังไม่ทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ลดลงแต่อย่างใด แต่หลังจากอายุ 120 วัน กำลังอัดคอนกรีตเริ่มลดลงโดยแป้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตและอายุของคอนกรีตที่แซ่ในสารละลาย แต่ถ้าคอนกรีตมีค่า W/C ต่ำกว่า 0.50 ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อกำลังอัดคอนกรีตมีไม่นักนักในช่วงอายุ 28-180 วัน แต่ผลกระทบจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า W/C ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น สรุปได้ว่าค่ากำลังอัดที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 3% ในช่วงอายุ 60 วัน ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตยังไม่ทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ลดลงแต่อย่างใด แต่หลังจากอายุ 120 วัน กำลังอัดคอนกรีตเริ่มลดลงโดยแป้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตและอายุของคอนกรีตที่แซ่ในสารละลาย แต่ถ้าคอนกรีตมีค่า W/C ต่ำกว่า 0.50 ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อกำลังอัดคอนกรีตมีไม่นักนักในช่วงอายุ 28-180 วัน แต่ผลกระทบจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า W/C ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีต

ตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 รูปที่ 5 ถึง 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กับอายุของคอนกรีตเมื่อแซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบร่วมกับกำลังอัดคอนกรีตที่แซ่ในน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกือบคงที่ในช่วงอายุ 28-120 วัน ส่วนกำลังอัดคอนกรีตที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตความเข้มข้นต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงอายุ 180 วัน แสดงว่าผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีผลน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตว่าอัตราการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในช่วงอายุ 120 ถึง 180 วัน ของคอนกรีตประเภทที่ 5 จะมีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตประเภทที่ 1

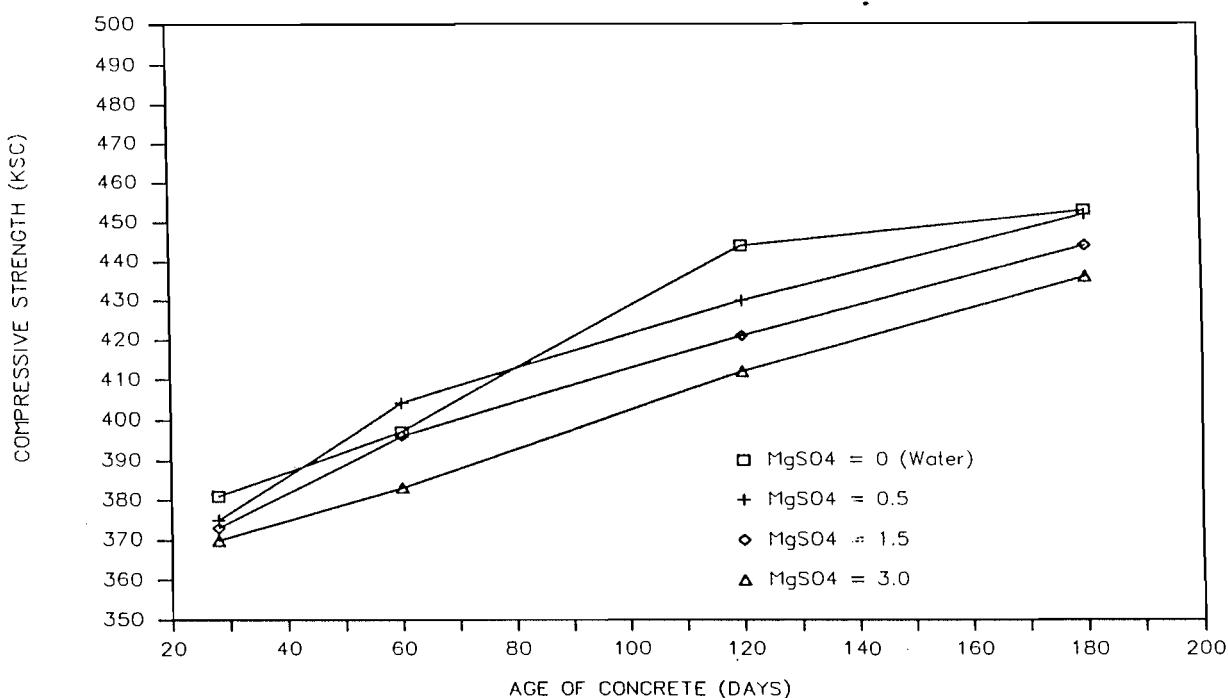
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า W/C กับความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต

คอนกรีตที่มีค่า W/C ไม่เกิน 0.500 แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูงถึง 3% เป็นเวลา 180 วัน (6เดือน) ไม่พบปัญหาด้านการกัดกร่อนแต่อย่างใด เพราะกำลังอัดที่ทดสอบได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งที่แซ่ในน้ำและที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต แต่เมื่อเพิ่มค่า W/C เป็น 0.575 และ 0.650 พบร่วมกับกำลังอัดคอนกรีตที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตความเข้มข้นไม่เกิน 0.5% มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่บ่มในน้ำอยู่เล็กน้อย แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 3% จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างเด่นชัด กล่าวคือ กำลังอัดคอนกรีตลดลง 34 กก./ซม². หรือร้อยละ 10.5 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่แซ่ในน้ำที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.575 และลดลง 22 กก./ซม². หรือร้อยละ 10.0 เมื่อค่า W/C เท่ากับ 0.650

ตารางที่ 2 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

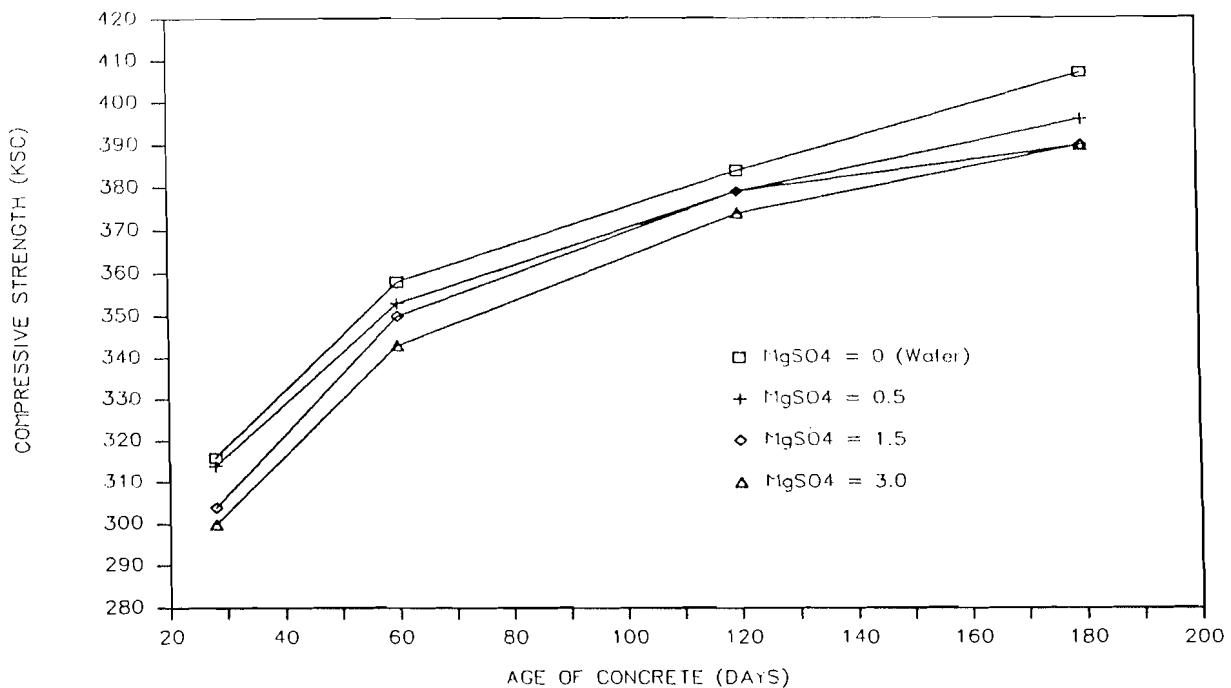
W/C	Curing in $MgSO_4$ (%)	Compressive Strength (ksc)			
		28-day	60-day	120-day	180-day
0.450	0 (Water)	381	397	444	453
	0.5	375	404	430	452
	1.0	373	396	421	444
	3.0	370	383	412	436
0.500	0 (Water)	316	358	384	407
	0.5	314	353	379	396
	1.0	304	350	379	390
	3.0	300	343	374	390
0.575	0 (Water)	234	260	299	322
	0.5	227	243	271	310
	1.0	219	229	245	290
	3.0	212	226	241	288
0.650	0 (Water)	157	186	209	220
	0.5	153	181	194	209
	1.0	140	173	181	203
	3.0	134	162	171	198

TYPE V CONCRETE, W/C = 0.45



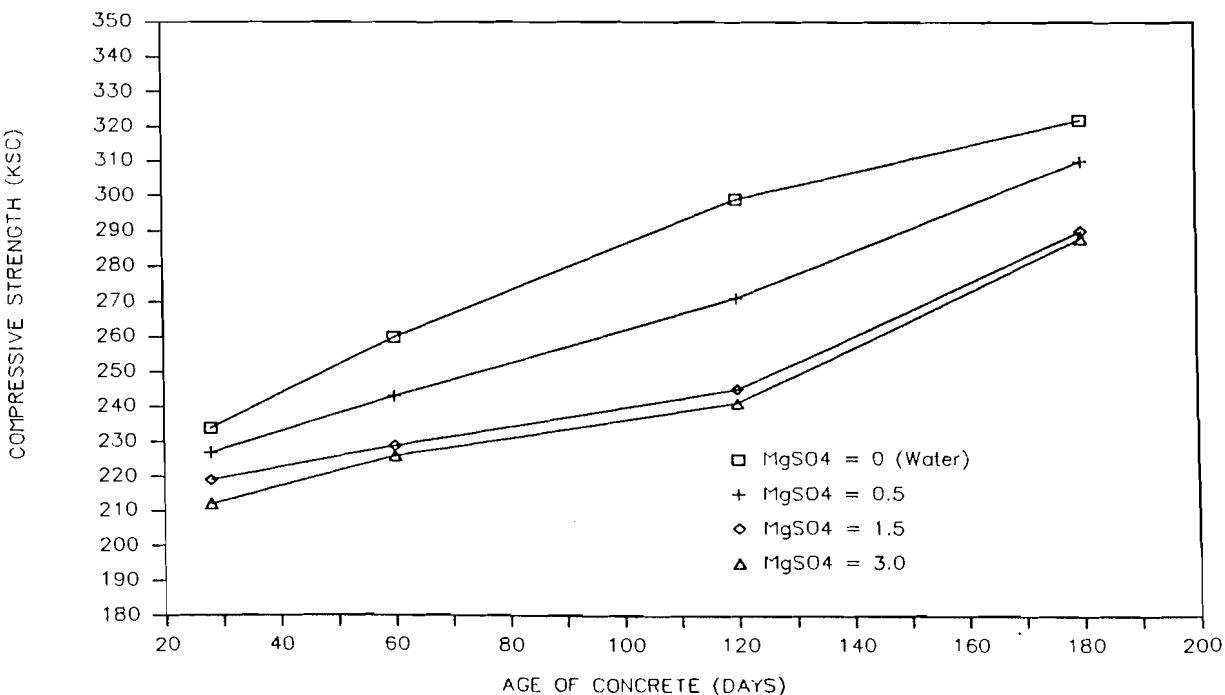
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กับอายุ เมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.450

TYPE V CONCRETE, W/C = 0.500



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กับอายุ เมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.500

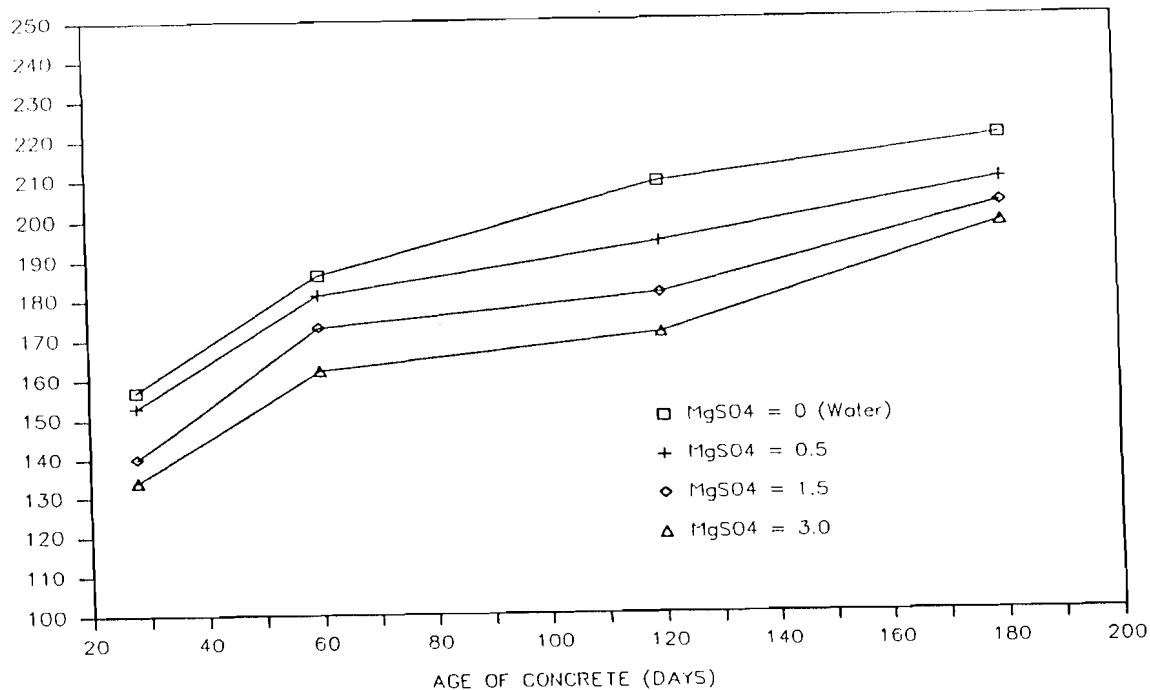
TYPE V CONCRETE, W/C = 0.575



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กับอายุ เมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.575

TYPE V CONCRETE, W/C = 0.650

COMPRESSIVE STRENGTH (KSC)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กับอายุ เมื่อใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.650

การเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีต

จากตารางที่ 1 และ 2 พบว่ากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งแซนน์จะมีแนวโน้มเมื่อกันคือ ในช่วง 28-120 วัน จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มคงที่หลังจากอายุ 120 วัน โดยที่กำลังอัดคอนกรีตประเภทที่ 1 จะสูงกว่าคอนกรีตประเภทที่ 5 ส่วนกำลังอัดคอนกรีตทึ้งสองประเภทซึ่งแซนในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอายุ 120 วัน หลังจากอายุ 120 วันไป แล้ว กำลังอัดคอนกรีตประเภทที่ 1 จะเริ่มลดลงในขณะที่คอนกรีตประเภทที่ 5 จะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการกัดกร่อนของชัลเฟตค่อนข้างน้อยแม้ว่าจะแซตัวอย่างคอนกรีตไว้ถึง 180 วัน (6 เดือน)

กำลังอัดคอนกรีตทึ้งสองประเภทจะแปรผกผันกับค่า W/C คือค่า W/C ต่ำกำลังอัดจะสูง พิจารณาคอนกรีตที่อายุ 180 วันเมื่อแซนน้ำพบว่าที่อัตราส่วนผสมเดียวกันคอนกรีตประเภทที่ 1 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตประเภทที่ 5 ส่วนกำลังอัดคอนกรีตที่แซนในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันเมื่อมีม

อายุ 180 วัน จะมีผลลัพธ์กัน คือ กำลังอัดคอนกรีตประเภทที่ 1 มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตประเภทที่ 5 เมื่อมีค่าของ W/C เท่ากัน โดยที่คอนกรีตประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่มีค่า W/C = 0.65 เมื่อแซนน้ำที่อายุ 180 วัน จะมีค่ากำลังอัด 299 กก./ซม.² และ 220 กก./ซม.² ตามลำดับ แต่สำหรับคอนกรีตที่มีค่า W/C ต่ำ คือ W/C = 0.45 ค่ากำลังอัดคอนกรีตทั้งสองประเภทมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก คือมีค่า 472 กก./ซม.² สำหรับคอนกรีตประเภทที่ 1 และ มีค่าเท่ากับ 453 กก./ซม.² สำหรับคอนกรีตประเภทที่ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า W/C กับ ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต

จากการวิเคราะห์ข้างต้น สรุปได้ว่าในช่วงอายุ 28-120 วัน กำลังอัดคอนกรีตประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่า คอนกรีตประเภทที่ 5 ที่บ่มหรือแซนสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตสภาวะเดียวกันทุกๆ ค่าของ W/C ที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี C₂S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และ C₃S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งทั้ง C₂S และ C₃S เป็นสารที่ทำให้ความแข็งแรง แก่คอนกรีต [6] และเวลาที่แซนคอนกรีตยังไม่นานพอที่จะเห็นผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลาย แมกนีเซียมชัลเฟต

สำหรับคอนกรีตที่แซนในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตหลังจากอายุ 120 วันแล้ว กำลังอัดคอนกรีต ประเภทที่ 1 จะลดลง ส่วนคอนกรีตประเภทที่ 5 จะสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มี C₃A มาก (โดยทั่วไปมากกว่าร้อยละ 10) ทำให้การด้านทานชัลเฟตมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมี C₃A อญ്യน้อย (ไม่เกินร้อยละ 5) จึงกล่าวได้ว่าผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อคอนกรีตประเภทที่ 1 จะเห็นผลได้ชัดเจนหลังจากอายุ 120 วันไปแล้ว .

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตมีความเข้มข้นสูง และค่า W/C สูง จะทำให้ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อคอนกรีตประเภทที่ 1 รวดเร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น ในขณะที่คอนกรีต ประเภทที่ 5 มีผลกระทบน้อยมาก ดังนั้นหากจำเป็นต้องสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างที่มีสารละลายชัลเฟตอยู่ควร จะต้องคำนึงถึงผลกระทบของการกัดกร่อนด้วย ใน ACI 318-89 [14] ระบุไว้ว่าในกรณีคอนกรีตร้างในบริเวณที่มีชัลเฟตเกิน 2% จำเป็นจะต้องใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และอาจต้องใช้ป้อซโซลาน (Pozzolan) เช่นพวนเต้าถ่านหิน (Fly Ash) เพื่อช่วยลดการกัดกร่อนด้วย

ผลกระทบของการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อคอนกรีต

จากการสังเกตการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตต่อคอนกรีตทั้งสองประเภท พอสรุปได้ดังนี้ คือ

ที่อายุคอนกรีต 120 วัน ยังไม่สามารถเห็นการกัดกร่อนของคอนกรีตทั้งสองประเภทที่แซนในสารละลาย แมกนีเซียมที่มีความเข้มข้น 0 ถึง 3% แต่เมื่อแซนถึงอายุ 180 วันคอนกรีตประเภทที่ 1 ทุกๆ ค่า W/C ที่

แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตความเข้มข้น 3% จะสังเกตเห็นการกัดกร่อนจากสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตได้คือ ที่ผิวของคอนกรีตมีรูพรุนเล็กๆ และมีเกล็ดสีขาวรอบๆ ผิว แต่คอนกรีตที่แซ่ในน้ำไม่เกิดผล ยิ่งค่า W/C มีค่าสูงจะเห็นการกัดกร่อนได้ชัดเจนกว่ากรณีที่ค่า W/C ต่ำ เพราะคอนกรีตที่มีค่า W/C สูงจะมีความหนาแน่นต่ำมีรูพรุนมากซึ่งทำให้การซึมผ่านของน้ำสูง เมื่อคอนกรีตมีการซึมผ่านของน้ำสูงจะทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตสูงขึ้นด้วย และในทางตรงกันข้ามคอนกรีตที่มีค่า W/C ต่ำจะมีการกัดกร่อนน้อยเนื่องจากมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำนั่นเอง ส่วนคอนกรีตประเภทที่ 5 ไม่เห็นผลการกัดกร่อนของตัวอย่างที่แซ่ในน้ำและแซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองกำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และการสังเกตการกัดกร่อนของคอนกรีตที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต พอสรุปได้ดังนี้

1. กำลังอัดคอนกรีตประเภทที่ 1 ที่แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟต 3% มีค่าลดลงมากในกรณีที่คอนกรีตมีค่า W/C สูง คือทำให้คอนกรีตที่มี W/C = 0.65 มีกำลังอัดลดลงร้อยละ 22.4% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่แซ่ในน้ำ และค่ากำลังอัดที่ลดลงจะมีค่าน้อยลงเมื่อคอนกรีตมีค่า W/C ต่ำ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากคอนกรีตที่มีค่า W/C ต่ำมีความหนาแน่นสูง ทำให้ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตที่มีค่า W/C สูง ดังนั้นจึงทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตน้อยลงตามไปด้วย
2. การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 สามารถลดการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตได้ดี ซึ่งจากการทดลองเมื่อแซ่คอนกรีตประเภทที่ 5 ในสารละลายแมกนีเซียมสูงถึง 3% เป็นเวลา 180 วัน พบร่วมมีผลกระแทบต่อคอนกรีตประเภทที่ 5 น้อยมาก
3. ในการก่อสร้างอาคารหรือลิ่งปูกลงร้างที่มีปริมาณของชัลเฟตอยู่ค่อนข้างสูง ควรพิจารณาเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือหากจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควรกำหนดต่ำ W/C ให้ต่ำกว่า 0.45 เพื่อลดปัญหาการกัดกร่อนของชัลเฟต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือของภาควิชาชีวกรรมโยธาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อี๊เพื่อสถานที่และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล ผู้เขียนขอขอบคุณ นายปฐม แสงใส นายพิรพงษ์ มีเชื้อ นายสิทธิพล กาญจนารายนต์ นายสุมล เกียงแก้ว นายกอบชัย ประเสริฐ นายเจริญ ถานะภิรมย์ นายจรัญ เกยุรวิเชียร และ นายพรณรงค์ คงกลินสุคนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการเตรียม

จะทดสอบตัวอย่างตลอดช่วงเวลาของการวิจัย สุดท้ายนี้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยนี้ในประเภท การวิจัยพื้นฐานปีงบประมาณ 2532-2533

เอกสารอ้างอิง

1. Thornton, H.T., "Acid Attack of Concrete Caused by Sulfur Bacteria Action", J. of the American Concrete Institute, Vol. 75, No. 11, pp. 577-584, 1987
2. สิริลักษณ์ จันทรงศุ "คอนกรีตในน้ำทะเล" เอกสารประกอบคำบรรยาย ณ ห้องประชุม ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2529, วิศวกรรมสาร เล่มที่ 5 หน้า 37-47 2529
3. สมประสงค์ บุญยนิตย์ "การใช้ชัลเฟต์ต่อต้านชัลเฟต์ใต้ธรณีและใต้น้ำ" วิศวกรรมสาร เล่มที่ 3 หน้า 75-80 2530
4. Mather, B., "Effects of Seawater on Concrete", Highway Research Record, No. 113 1966.
5. Concrete and Concrete Materials, Concrete Manual, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 8th Edn, United States Government Printing Office Washington, 1975.
6. Neville, A.M., Properties of Concrete 3rd Edn, Pitman Books, Limited, 1983.
7. Aardt J.H.P. and Visser, S., "Influence of Alkali on the Sulfate Resistance of Ordinary Portland Cement Mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 485-494, 1985.
8. Moum J. and Rosenqvist, I. Th., "Sulfate Attack on Concrete in the Oslo Region", J. of the American Concrete Institute, pp. 257-264, 1959.
9. Gjorv, O. E., "Long-Time Durability of Concrete in Seawater", J. of the American Concrete Institute, Vol. 68, No. 1, 1971.
10. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15, 2514
11. ACI Committee 318, Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete ACI 318 R-89, ACI Manual of Concrete Practice Part III, American Concrete Institut

Detroit, 1992.

12. Nishibayashi, S., Yamura, K., and Inoue, S., "Durability of Concrete in Sea Water: Method of Accelerated Testing and Evaluation", Performance of Concrete in Marine Environment Publication, SP-65, American Concrete Institute, Detroit, 1980.
13. ASTM C-192, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, 1990.
14. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," ACI 318-89, ACI Manual of Concrete Practice Part III, American Concrete Institute, Detroit, 1992.