

ความคงทนของคอนกรีตจากการกัดกร่อนด้วยซัลเฟต($MgSO_4$)

① ที่มาและชนิดของเกลือซัลเฟต

สารประกอบทางเคมีที่มีผลต่อกระทบโดยตรงต่อความคงทนของคอนกรีต ที่สำคัญและพบมากในธรรมชาติ ประกอบด้วยเกลือของคลอไรด์ซึ่งพบมากในน้ำทะเลและเกลือของซัลเฟตซึ่งพบมากในดินหรือน้ำใต้ดิน(ในบางพื้นที่) ในน้ำเสียจากที่พักอาศัย ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท รวมถึงกลุ่มของโรงงานทำปุ๋ยและตามแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติ

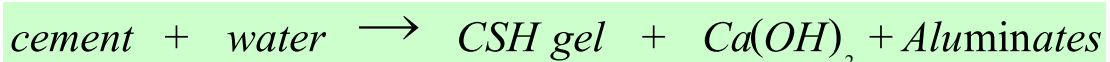
เกลือของซัลเฟต(SO_4^{2-})ที่อยู่ในรูปของสารละลาย มีผลค่อนข้างรุนแรงต่อการกัดกร่อนคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเกลือของซัลเฟต(SO_4^{2-})ที่พบมากที่สุดคือ โซเดียมซัลเฟต(Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต($MgSO_4$) นอกจากนี้ก็ยังมีเกลือของโปรแตสเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต($CaSO_4$)รวมอยู่ด้วย โดยกระบวนการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตนั้น รูปแบบของการแสดงออกของความเสียหายที่มีต่อคอนกรีตมักปรากฏอยู่ในลักษณะดังนี้(ดังแสดงในรูปที่ 1.)



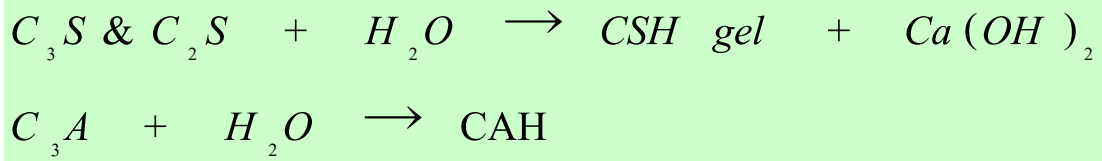
② ปฏิกริยาเคมีไฮเดรชันและผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยา

จุดเริ่มต้นของกระบวนการของการกัดกร่อนหรือทำลายด้วยซัลเฟต เป็นผลมาจากสารประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ผงกับน้ำเป็นหลักคือ สารประกอบปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์($Ca(OH)_2$) และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(CAH) ดังแสดงในสมการที่ 1. และสมการที่ 2.(ขยายสมการที่ 1.)

สมการที่ 1. : การเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยา

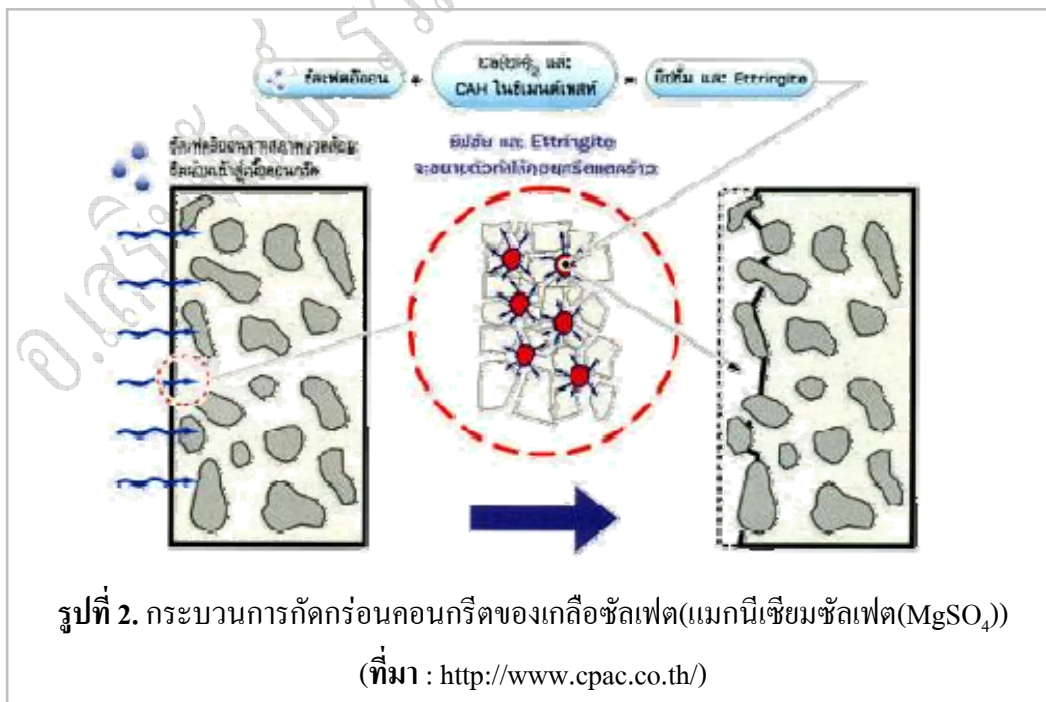


สมการที่ 2. : การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(ขยายสมการที่ 1.)และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา



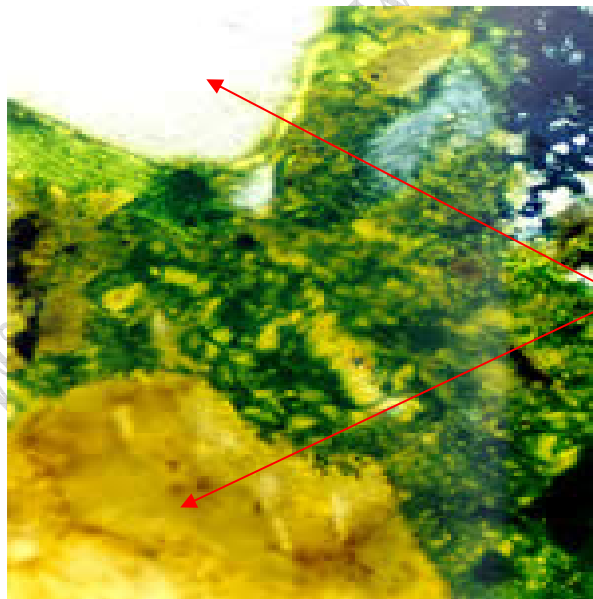
3 ปฏิกิริยาเคมีและกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต(MgSO₄)

กระบวนการของการกัดกร่อนด้วยซัลเฟต(ดังแสดงในรูปที่ 2.) เริ่มจากแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄)แพร่กระจายเข้าไปในโพรงของคอนกรีต แล้วเริ่มทำปฏิกิริยา(ดังแสดงในสมการที่ 3. และสมการที่ 4.) กับสารประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน(ดังแสดงในสมการที่ 2.)คือ สารประกอบปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์(Ca(OH)₂) และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(CAH) เกิดเป็นยิปซัม(CaSO₄-2H₂O)และแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต (6CaO·Al₂O₃·3SO₃·32H₂O)หรือEttringite(ดังแสดงในสมการที่ 3. และสมการที่ 4.) ซึ่งโดยธรรมชาติของEttringite แล้วจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตชนิดอื่นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันมาก จึงทำให้ Ettringite เกิดการขยายตัวได้(ซึ่งรูปร่างของ Ettringite จะมีลักษณะเป็นแท่งผลึก ดังแสดงในรูปที่ 3.-1) และนอกจากนี้แล้วเมื่อใดก็ตามหากไอออนของซัลเฟตสามารถรวมตัวกับ คาร์บอนไดออกไซด์(CO₂)ที่ฝังตัวอยู่ในคอนกรีตได้ ก็จะทำให้เกิด Thaumasite ขึ้นมาเสริมพลังในการทำลายในอีกด้านหนึ่งได้(ดังแสดงในรูปที่ 3.-2)



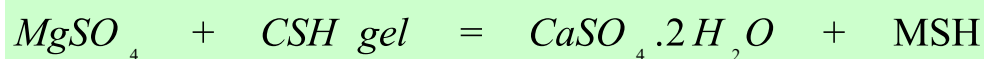
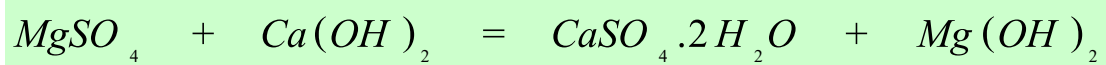


รูปที่ 3.-1 รูปร่างของผลึกของซัลเฟตในคอนกรีต
(ที่มา : [http:// www.alanwood.co/](http://www.alanwood.co/))

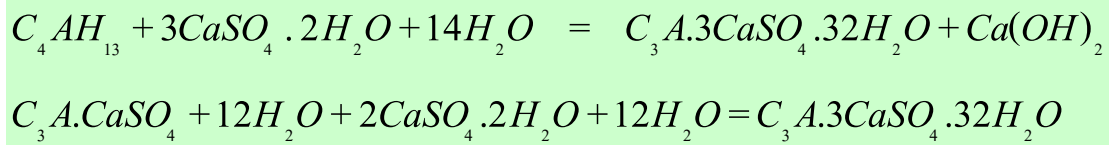


รูปที่ 3.-2 เป็นPhotomicrograph ของคอนกรีตที่เกิด Thaumacite เนื่องจากซัลเฟต
(ที่มา : <http://www.sandberg.co.uk/>)

สมการที่ 3. : การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง $MgSO_4$ กับ $Ca(OH)_2$ และ C-S-H



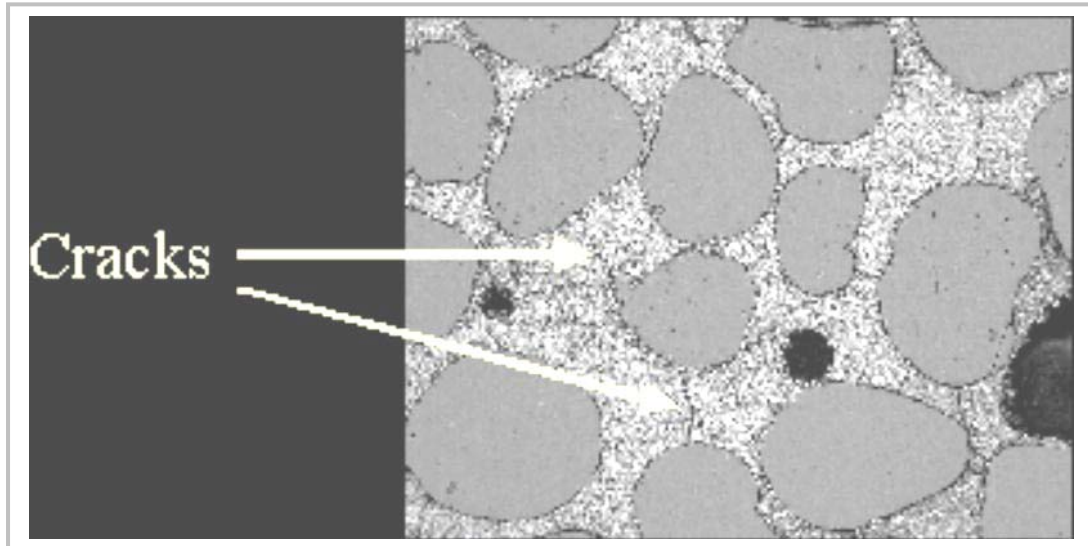
สมการที่ 4. : เป็นการเกิดปฏิกิริยาซึ่งนำไปสู่การเกิดของ Ettringite



จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวนำมาสู่กลไกของการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ดังแสดงในสมการที่ 3. และสมการที่ 4. โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ผลผลิตที่ได้คือเป็นยิปซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ซึ่งเราถือว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ให้กำลังกับคอนกรีต ในขณะที่เดียวกันก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดการสลายตัวแล้วเปลี่ยนไปเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แทน ทำให้เกิดสารประกอบอัลคาไลน์แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ในที่สุด ซึ่งสารประกอบดังกล่าวนี้ไม่มีความสามารถในการประสานหรือยึดเหนี่ยวเลย จึงถือได้ว่าเป็นกระบวนการทำให้คอนกรีตสูญเสียกำลังนั่นเอง

ในขณะที่ Ettringite ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต อันเนื่องมาจากการขยายตัวของมันเอง(ดังแสดงในรูปที่ 4.)

ฉะนั้นเมื่อองค์ประกอบภายในไม่มีเสถียรภาพและเกิดการขยายตัวขึ้น จึงส่งผลดังกล่าวให้เนื้อในของคอนกรีตเกิดหน่วยแรงภายในขึ้น (Internal Concrete Stresses) ซึ่งเมื่อใดก็ตามแต่หากหน่วยแรงภายในดังกล่าว มีปริมาณที่มากกว่าความสามารถในการยึดเหนี่ยวหรือมากกว่าแรงประสานที่มีในมวลของคอนกรีตขณะนั้น รอยร้าวจากภายในก็จะเกิดและจะขยายต่อเนื่องไปเรื่อยๆหากมีกำลังที่มากพอ ซึ่งยิ่งถ้าหากว่าพฤติกรรมดังกล่าวเป็นไปพร้อมๆกับการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายใน อันเนื่องมาจากผลของการเกิดสารประกอบอัลคาไลน์แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ด้วยแล้ว ท้ายที่สุดกระบวนการดังกล่าวจะเป็นต้นเหตุ และเอื้อให้กับปัจจัยเสริมจากภายนอกอื่นๆให้ทำลายองค์อาคารคอนกรีตนั้นๆได้โดยง่าย ส่งผลให้ช่วงอายุของการใช้งานองค์อาคารคอนกรีตนั้นๆสั้นลงและไม่สามารถที่จะคงความคุ้มทุนไว้ได้ เพราะไม่สามารถที่จะใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งก็คือเกิดการวิบัติก่อนเวลาอันควรนั่นเอง



รูปที่ 4. รอยร้าวเนื่องจากการขยายตัวของ Ettringite ในคอนกรีต

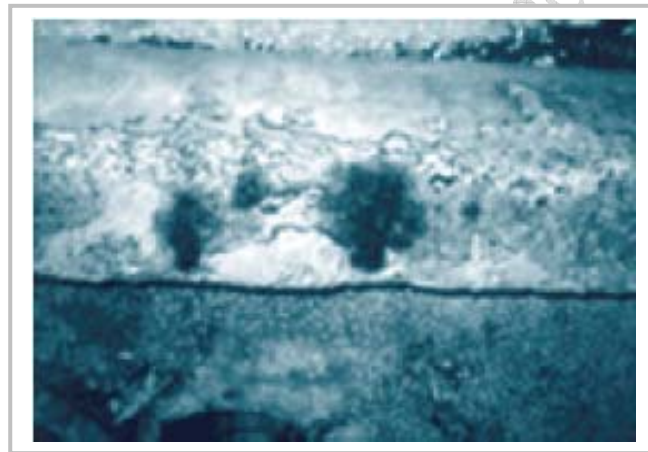
(ที่มา : [http:// www.civil.uwaterloo.ca/](http://www.civil.uwaterloo.ca/))

ผลของกระบวนการกัดกร่อนดังกล่าว นำไปสู่ความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้(ดังแสดงในรูปที่ 5. และ รูปที่ 6.)



รูปที่ 5. ผลของกระบวนการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟตที่มีต่อโครงสร้างคอนกรีต

(ที่มา : บ้านพักข้าราชการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี)



รูปที่ 6. ผลของกระบวนการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟตที่มีต่อ โครงสร้างคอนกรีต(ต่อ)

(ที่มา : <http://www.cpac.co.th/>)

4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำลายโดยซัลเฟต

1.) ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ผงเองเป็นเบื้องต้น โดยเฉพาะในกลุ่มของแคลเซียมอลูมิเนต(ทั้ง C_3A และ C_4AF) ยังมีในปริมาณน้อยยังสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี

2.) ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์($Ca(OH)_2$) ยังมีในปริมาณน้อยจะยิ่งช่วยลดความรุนแรงของการทำลายลงได้ จากสมการที่ 1. และสมการที่ 2. จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์หลักที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์($Ca(OH)_2$) หรือ Tobermorite ซึ่งมีอยู่ประมาณ 20-25% โดยองค์ประกอบดังกล่าวเป็นส่วนที่ไม่ให้กำลังรับ

แรงอัดกับคอนกรีต แต่องค์ประกอบส่วนนี้สามารถที่จะให้กำลังรับแรงอัดกับคอนกรีตได้ ก็โดยการเติมสารประเภทที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ผสมลงไปในคอนกรีตที่มักนิยมใช้กันมากคือสาร “ปอซโซลาน(Pozzolans)” เช่น Flyash Slag และ Microsilica(SiO_2) ซึ่งสารดังกล่าวนี้มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเช่นเดียวกันกับปูนซีเมนต์ผงคือ คัลเซียม ซิลิเกต และอลูมินเนต ซึ่งจะช่วยให้ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ไปเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H) ได้อีกครั้ง จึงถือได้ว่าเป็นการช่วยลดปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง

- 3.) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตเอง ในฐานะที่เป็นตัวทำลาย
- 4.) ขึ้นอยู่กับช่วงหรือระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำ ยิ่งสัมผัสนานก็จะยิ่งมีโอกาสถูกทำลายได้มากกว่า
- 5.) ขึ้นอยู่กับความทึบน้ำของเนื้อคอนกรีตเอง ยิ่งทึบน้ำมากก็จะยิ่งมีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้ดี

5 วิธีป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

ก็โดยการใช้ข้อมูลจากหัวข้อเรื่องที่ 4. มาเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ

- 1.) ลดปริมาณของแคลเซียมอลูมินเนต(ทั้ง C_3A และ C_4AF) โดยการเลือกใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต(Sulfate Resisting Cement) ซึ่งในปูน Type ดังกล่าวจะมีส่วนประกอบของ C_3A น้อย
- 2.) ลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยการ
 - เติมสาร “ปอซโซลาน(Pozzolans)” เช่น Flyash Slag และ Microsilica(SiO_2) ลงไปในส่วนผสม ซึ่งสารดังกล่าวนอกจากจะไปช่วย(ดึงออกของแคลเซียม)เปลี่ยนปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ไปเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H) ได้อีกครั้งแล้ว ยังมีคุณสมบัติที่ดีด้านความทึบน้ำด้วย
 - บ่มคอนกรีตด้วยวิธีไอน้ำความดันสูง ซึ่งการกระทำดังกล่าวส่งผลให้ผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันส่วนมากอยู่ในรูปของผลึกขนาดเล็ก ซึ่งทำให้การทำปฏิกิริยาของผลิตผลดังกล่าวกับไอออนของซัลเฟตลดน้อยลงความคงทนจึงมีเพิ่มขึ้น
- 3.) ลดน้ำ(ทั้งในส่วนผสม w/c และน้ำที่ท่วมขัง)และป้องกันไอออนของซัลเฟตโดย
 - ปรับปรุงเรื่องของการระบายน้ำไม่ให้แช่แฉะหรือท่วมขังนานๆ
 - ใช้สารหรือวัสดุกันซึมเข้ามาช่วยสกัดการซึมผ่านของน้ำและไอออนของซัลเฟต
 - ปรับปรุงส่วนผสมให้มีความทึบน้ำ

6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

① M.J.Shannag ,H.A.Shania (2003)[2]; ทำการวิจัยเรื่อง “ *Sulfates Resistant of High-performance Concrete(HPC)* “ โดยการออกแบบส่วนผสมของ HPC จำนวน 5 ส่วนผสม(ดังตารางที่ 1) โดยแช่ตัวอย่างมอร์ตาร์ในสภาวะรุนแรงต่างๆได้แก่ ในสารละลาย **MgSO₄ 20%** ,สารละลาย Na SO₄ 20% ,น้ำจากทะเลแดง(Red Sea),น้ำจากทะเลเดดซี(Dead Sea)และน้ำธรรมดา โดยในแต่ละสภาวะได้ทำการทดลองกับส่วนผสมของ HPC 5 ส่วนผสม(ดังตารางที่ 2) ซึ่งได้ผลการทดสอบกำลังอัดดังตารางที่ 3. และรูปที่ 7.

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของซีเมนต์,สารปอซโซลานและซิลิกาฟุ้ง ที่ใช้ในการศึกษา

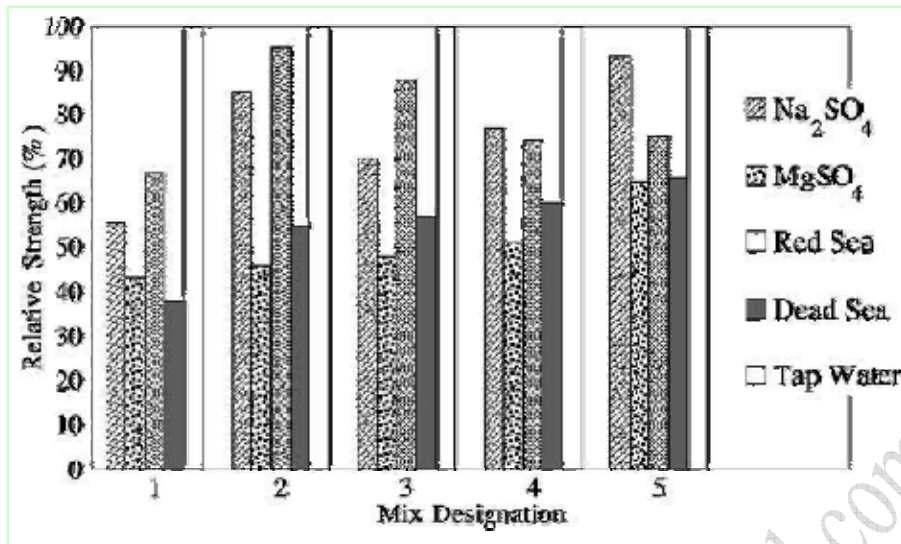
Characteristics of cements, natural pozzolan, and silica fume used in this study				
Oxide (%)	Natural pozzolan	Silica fume	Cement (Type I)	Pozzolanic cement
SiO ₂	40.8	93	20.9	22.3
Al ₂ O ₃	12.8	0.4	5.6	6.0
Fe ₂ O ₃	10.5	1.2	3.1	4.0
CaO	11.8	0.2	62.7	55.8
MgO	9.1	1.2	2.2	4.8
Na ₂ O	2.3	0.1	0.2	0.4
K ₂ O	1.1	1.1	0.8	0.8
SO ₃	0.1	0.3	2.9	2.7
Loss on ignition (%)	9.30	0.75	1.30	2.48
Specific gravity	2.68	2.10	3.15	3.12
Specific surface (m ² /kg)	600	20,000 ^a	300	434

^a The specific surface of silica fume is measured by the nitrogen adsorption technique.

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 360 วัน

Concrete mix quantities (kg/m ³)									
Mix designation	W/(C+SF+NP)	CA (10 mm)	CA (5 mm)	S	C	NP	SF	SP (L)	W
1	0.35	995.0	115.0	740.0	400.0	-	-	10	140
2 ^a	0.35	992.0	112.0	740.0	400.0	-	-	10	140
3	0.35	955.0	106.1	707.4	400.0	20	20	10	154
4	0.35	943.1	101.5	676.6	400.0	40	40	10	168
5	0.35	871.6	95.8	645.6	400.0	60	60	10	182

CA: coarse aggregate, S: sand, C: cement, NP: natural pozzolan, SF: silica fume, SP: superplasticizer, W: water.
^aMix 2 only contains commercially produced portland pozzolana cement; Mixes 1,3,4,5 contain ordinary portland cement.



รูปที่ 7 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบกำลังอัดของตัวอย่างแต่ละส่วนผสมในแต่ละสภาวะ

บทสรุปของงานวิจัย

- 1.) หลังจากแช่ตัวอย่างมอดาร์ในสารละลายซัลเฟตและในน้ำทะเลที่สภาวะต่างๆ พบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 15% และสารปอซโซลานธรรมชาติ 15% มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้สูงสุด (Mix 5)
- 2.) HPC ที่ผสมซิลิกาฟูมและสารปอซโซลานธรรมชาติ มีความเหมาะสมทั้งในด้านกำลังอัดและความทนทาน แนะนำให้ใช้กับคอนกรีตในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังและความทนทานสูง
- 3.) HSC ที่มีเฉพะปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาประเภทที่ 1. มีความทนทานต่อซัลเฟตและน้ำทะเลต่ำ
- 4.) ความต้านทานต่อซัลเฟตของคอนกรีตในน้ำทะเลจากทะเลเดดซี (Dead Sea) เป็นเรื่องที่น่าสนใจและสมควรที่จะศึกษาวิจัยในลำดับต่อไป

② Young-Shik Park, Jin-Kook Suh, Jae-Hoon Lee, Young-Shik Shin(1999)[4]; ทำการวิจัยเรื่อง “Strength Determinate of high-strength concrete in sulfate environment” โดยออกแบบส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้า 7 ส่วนผสม โดยนำตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 50 ตัวอย่างไปแช่ในน้ำสะอาด, สารละลาย **MgSO₄ 10%**, **NaSO₄ 10%** และสารละลายผสมระหว่าง **MgSO₄ 10%** และ **NaSO₄ 10%** ที่ PH=7 เป็นเวลา 270 วันแล้วนำไปทดสอบกำลังอัดได้ผลสรุปดังนี้

- 1.) MgSO₄, NaSO₄ เป็นสาเหตุของความสึกกร่อน แต่อย่างไรก็ตาม MgSO₄ ก็เป็นสาเหตุหลักในการทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำ

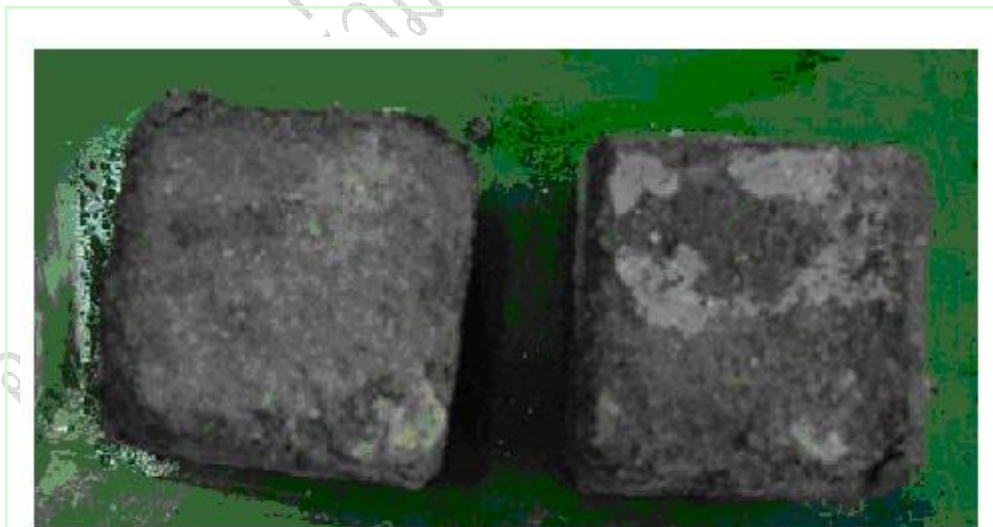
2.)ในการกักร่อนจาก NaSO_4 , ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีสาร Superplasticizer และ ซิลิกาฟุ้ง มีความทนซัลเฟตต่ำและมีแนวโน้มที่จะมีกำลังอัดต่ำลง เนื่องจากมีความพรุนสูงเพราะมี w/c สูง

3.)ในการกักร่อนจาก MgSO_4 , HSC ที่ผสมสาร Superplasticizer และ ซิลิกาฟุ้ง มีความสามารถที่แย่ และมีแนวโน้มที่จะให้กำลังอัดที่ต่ำลง ซึ่งหมายถึง HSC ที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟุ้ง จะทนต่อการกักร่อนของซัลเฟตและการกักร่อนจาก MgSO_4 และการกักร่อนจะลดลงต่อเมื่อมีการเพิ่มซิลิกาฟุ้งในส่วนผสมไม่น้อยกว่า 10 %

4.)ในส่วนผสมที่มีซิลิกาฟุ้งสูง จะมีการขยายตัวของตัวอย่างทดสอบต่ำในการกักร่อนจาก NaSO_4 แต่จะมีการขยายตัวสูงในการกักร่อนจาก MgSO_4

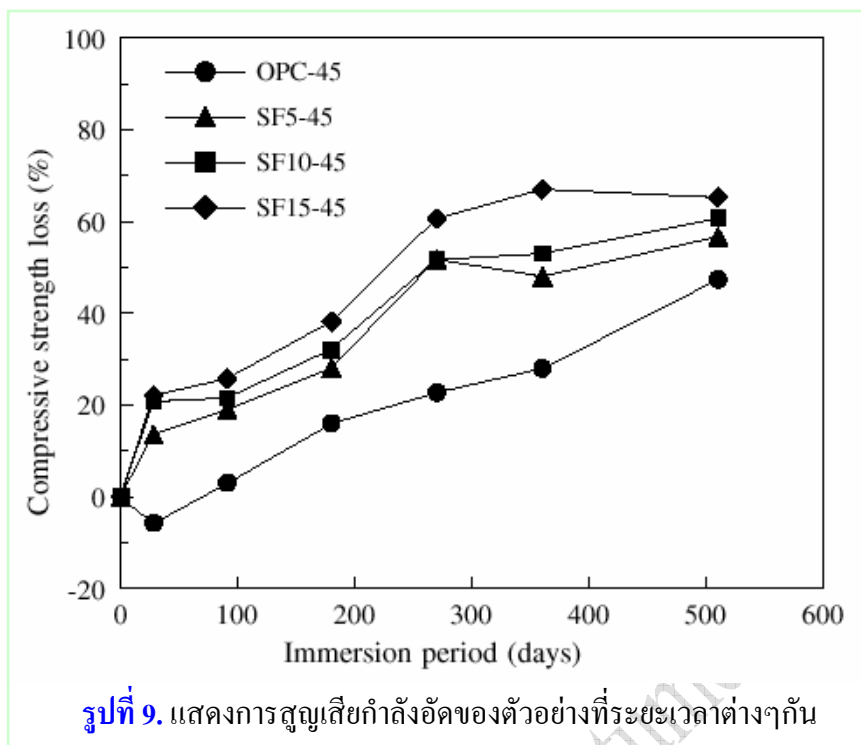
5.)น้ำหนักของตัวอย่างที่ 90 วันที่ถูกกร่อนโดย NaSO_4 จะลดลงน้อยมาก แต่น้ำหนักที่ลดลงของจากการกักร่อนโดย MgSO_4 มีนัยสำคัญโดยเฉพาะที่ส่วนผสมที่มีซิลิกาฟุ้ง 15%

③ S.T.Lee, H.Y.Moon, R.N.Swamy(2003)[3]; ทำการศึกษาเรื่อง "Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss" โดยออกแบบส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้า 8 ส่วนผสม แล้วนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลาย MgSO_4 5% และสารละลายผสมระหว่าง MgSO_4 5% และ NaSO_4 5% เป็นเวลา 510 วัน จากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัดและทำ X-ray Diffraction(XRD) สรุปได้ว่าตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ้ง 10-15% มีการสูญเสียกำลังอัดเพียง 20% ในขณะที่ไม่ผสมจะสูญเสียถึงประมาณ 70% ที่ระยะเวลา 510 วัน



SF10-45 mortar cubes immersed in 5% magnesium sulfate solution for 510 days.

รูปที่ 8. แสดงการกักร่อนโดยสารละลาย MgSO_4 5% ที่ระยะเวลา 510 วัน



④ Kazuyuki Torii and Mitsunori Kawamura(1993)[1]; ทำการศึกษาเรื่อง “Effects of Fly ash and silicafume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack” ทำการทดสอบตัวอย่าง โดยการแทนที่ส่วนผสมด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูม จากนั้นนำไปแช่ในกรดซัลฟูริก(H_2SO_4 2%), $NaSO_4$ 10% และ $MgSO_4$ 10% เป็นเวลา 3 ปี ผลปรากฏว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและซิลิกาฟูม มีประสิทธิภาพในการต้านทานกรดซัลฟูริกและสารละลายซัลเฟต

⑤ E.E.Hekel, E.Kishar, H.Mostafa[1]; ทำการศึกษาเรื่อง “Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances” โดยทำการออกแบบส่วนผสมทั้งหมด 11 ส่วนผสม ที่ได้จากซิลิกาฟูม, Slag และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้ $w/c = 0.3$ โดยนำตัวอย่างที่ได้หลังจากบ่มในน้ำที่ 28 วัน ไปแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ 10% เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 วัน ที่สภาพต่าง ๆ กัน ได้แก่ ที่อุณหภูมิห้อง, ที่ $60^\circ C$ และที่ $60^\circ C$ ภายใต้วัฏจักรแบบเปียกสลับแห้ง ได้ผลปรากฏว่า Slag และแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถปรับปรุงความต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1.(OPC) ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม 10-15% ไม่ได้เป็นการปรับปรุงการทนซัลเฟตให้ดีขึ้นของ hardened blended cement pastes และที่ $60^\circ C$ ภายใต้วัฏจักรแบบเปียกสลับแห้ง จะเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟตได้เร็วยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] E.E.Hekel,E.Kishar,H.Mostafa,*Magnesium sulfate attack on hardend dlended cement pastes under different circumstances*, Cement and Concrete Research 32 :1421-1427 ,2002
- [2] Kazuyaki Torii and Mitsunori Kawamura,*Effects of Fly ash and silicafume on the resistance of mortar tosulfuric acid and sulfate attack*,Cement and Concrete Reserch,Vol.24 No.2,1994
- [3] M.J.Shannag ,H.A.Shania, *Sulfates Resistant of High-performance Concrete*, Cement and Concrete Composites25 :363-369 ,2003
- [4] S.T.Lee,H.Y.Moon,R.N.Swamy,*Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss*, Cement and Concrete Composites,2004
- [5] Young-Shik Park,Jin-Kook Suh,Jae-Hoon Lee,Young-Shik Shin, *Strength Determinate of high-strength concrete in sulfate environment*, Cement and Concrete Composites29 :1397-1402 ,1999
- [6] Jan skalny,Jacques Marchand,Ivan Older,*Sulfate Attack on Concrete*,London,Spon Press,2002
- [7] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, *ปูนซีเมนต์และคอนกรีต*,กรุงเทพฯ;สมาคมคอนกรีตไทย ,2547
- [8] S.C.B.Engineering CO.,LTD , *การวิบัติของอาคารและการแก้ไขโครงสร้างคอนกรีตโดยไม่ทำลาย*”กรุงเทพฯ,ม.ป.ป.,2545
- [9] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร,*คอนกรีตเทคโนโลยี,กรุงเทพฯ*,บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด ,พิมพ์ครั้งที่ 10 ,2544
- [10] บริษัท ซีก้า(ประเทศไทย) จำกัด ,*เอกสารเผยแพร่ เล่มที่1/2537 เรื่อง ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับงานคอนกรีต*,กรุงเทพฯ,ฝ่ายคอนกรีต บริษัท ซีก้า(ประเทศไทย) จำกัด,2537