

บทที่ 3

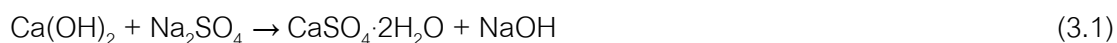
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การกระทำโดยซัลเฟต

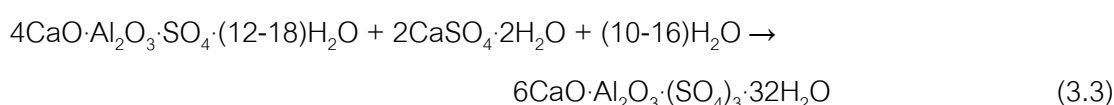
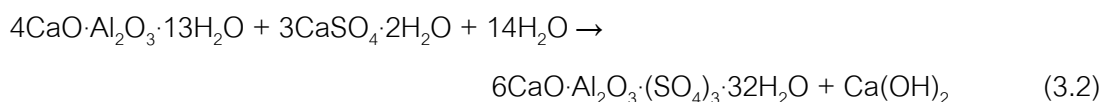
ไอออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยทำให้เพสต์เกิดการขยายตัวหรือการสลายตัวของโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ ลักษณะของคอนกรีตที่ถูกกัดกร่อนโดยซัลเฟตมักจะเริ่มเสียหายที่บริเวณขอบและมุมก่อน ตามด้วยการเกิดรอยแตกกว้างและพังทลายของคอนกรีต ซึ่งทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่พบบ่อยในธรรมชาติ และเป็นอันตรายต่อคอนกรีต อาทิเช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) (สมนึก, 2543) เป็นต้น ไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อยในดินบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่พบบ่อยที่สุดมักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือ แมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ยังอาจพบได้ตามน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือตามแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติด้วย ส่วนในน้ำทะเล หรือน้ำเค็มที่เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีอยู่มากซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนและสูญเสียการรับกำลัง (คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2536)

3.1.1 กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต

การกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ขึ้นอยู่กับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยกลไกความเสียหายเนื่องจากการกระทำซัลเฟตของคอนกรีตเริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ก่อให้เกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ (3.1) (Bendsted, J. and Barnes, P., 2002)



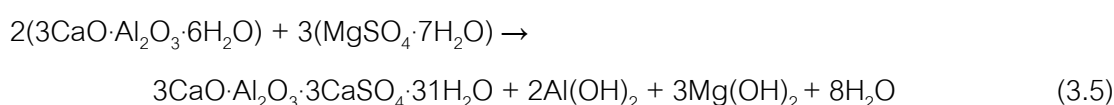
การทำปฏิกิริยากับสารประกอบของอะลูมิเนียม ((4CaO·Al₂O₃·13H₂O), (4CaO·Al₂O₃·(SO₄)₃·(SO₄)₃·(12-18)H₂O, (3CaO·Al₂O₃)) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบของเอ็ททริงไกท์ (6CaO·Al₂O₃·(SO₄)₃·32H₂O) ที่มีปริมาตรและความไม่เสถียรเพิ่มขึ้น จึงทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวดังแสดงในสมการที่ (3.2) ถึง (3.4)



ยิปซัม และเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่า ทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์โพสต์เทนแตกร้าว (Bendsted, J. and Barnes, P., 2002)

3.1.2 กลไกการกัดกร่อนโดยแมกนีเซียมซัลเฟต

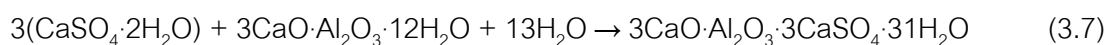
แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) จากน้ำทะเลทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตจากคอนกรีตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·31H₂O) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เอ็ททริงไกท์ (Ettringite) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) และน้ำ (H₂O) ดังสมการที่ (3.5) คือ (Mather B., 1966)



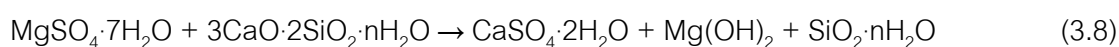
แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ได้เป็น แคลเซียมซัลเฟต หรือยิปซัม (CaSO₄·2H₂O) ดังสมการที่ (3.6) (Mather B., 1966)



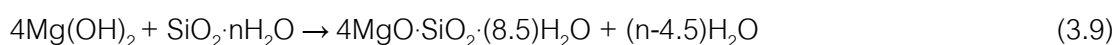
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต หรือเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ดังสมการที่ (3.7) (Mather B., 1966)



นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ (3.8) คือ (Mather B., 1966)



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ (3.8) สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ดังแสดงในสมการที่ (3.7) ได้อีก และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ (3.9)



ยิปซัมที่เกิดตาม สมการที่ (3.6) และ (3.8) และเอ็ททริงไกท์ที่เกิดตาม สมการที่ (3.5) และ (3.7) มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ (3.8) และ (3.9) ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมประสานต่ำ ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง (Mather B., 1966)

3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนโดยซัลเฟต

1. สภาพแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟต ตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต ถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงก็จะมีการทำลายที่รุนแรงมากขึ้น (Türker, F. et al., 1997)
2. ความพรุน คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้ความรุนแรงลดลง
3. ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ น้อยจะมีแนวโน้มที่จะต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มี

ปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ต่อไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ต่ำก็จะมีความต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น (สมนึก, 2543)

4. ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ถ้าสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตได้ก็จะช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยการใช่วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

3.1.4 แนวทางการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

1. ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และอัตราส่วนไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ต่อไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ต่ำ นั่นคือใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือที่เรียกว่า ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (Sulfate resisting cement) ซึ่งมีปริมาณ C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 ได้กำหนดไว้

2. การใช้สารปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังสามารถช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตด้วย

3. ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำ และป้องกันไอออนของซัลเฟตโดย

- ใช้สารหรือวัสดุกันซึมเข้ามาช่วยสกัดการซึมผ่านของน้ำและไอออนของซัลเฟต
- ปรับปรุงส่วนผสมให้มีความทึบน้ำ

4. ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสตีไม่มากเกินไป

3.1.5 การพิจารณาสถานะการสัมผัสกับซัลเฟต

ในตารางที่ 3.1 จะเป็นตารางที่แสดงระดับสถานะการสัมผัสกับซัลเฟต ซึ่งเป็นเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน อเมริกา แคนาดา และยุโรป (Neville A., 2004)

ตารางที่ 3.1

เกณฑ์กำหนดสำหรับออกแบบคอนกรีตที่สัมผัสกับซัลเฟต

มาตรฐาน	สภาวะการสัมผัสกับ สารละลายซัลเฟต	ปริมาณซัลเฟต (SO ₄)		
		ในน้ำ (ส่วนในล้านส่วน)	ในดิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ในดิน (ส่วนในล้านส่วน)
ACI 201.2R และ ACI 332R	น้อยมาก	0-150	0.00-0.10	-
	ปานกลาง	150-1500	0.10-0.20	
	รุนแรง	1500-10,000	0.20-2.00	
	รุนแรงมาก	มากกว่า 10,000	มากกว่า 2.00	
ACI 318	น้อยมาก	0-150	0.00-0.10	-
	ปานกลาง	150-1500	0.10-0.20	
	รุนแรง	1500-10,000	0.20-2.00	
	รุนแรงมาก	มากกว่า 10,000	มากกว่า 2.00	
US Bureau	น้อยมาก	0-150	-	น้อยกว่า 1,000
	ปานกลาง	150-1500		1,000-2,000
	รุนแรง	1,000-2,000		2,000-5,000
	รุนแรงมาก	มากกว่า 2,000		มากกว่า 5,000
Canadian Standard A23.1.94	ไม่รุนแรง	150-1,500	0.10-0.20	-
	รุนแรง	1500-10,000	0.20-2.00	
	รุนแรงมาก	มากกว่า 10,000	มากกว่า 2.00	
European Standard EN206-1	ไม่รุนแรง	200-600	-	2,000-3,000
	รุนแรง	600-3,000		3,000-12,000
	รุนแรงมาก	3,000-6,000		12,000-24,000

ที่มา: “The confused world of sulfate attack on concrete,” by Neville, A., 2004, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, Issue 8, pp.1275-1296.

3.2 การกักกร่อนโดยคลอไรด์

คลอไรด์ที่กระทำกับคอนกรีตมี 2 รูปแบบ คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) และคลอไรด์ที่ถูกจับยึดไว้ (Fixed chloride) โดยคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในช่องว่างของคอนกรีต และสามารถเคลื่อนที่ไปตามความเข้มข้นที่แตกต่างกันได้เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ส่วนที่เหลือที่ถูกจับโดยคอนกรีตเรียกว่า คลอไรด์ที่ถูกจับยึด เมื่อแพร่ไปถึงตำแหน่งของเหล็กเสริมจะมีผลทำให้ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) รอบเหล็กเสริมลดลงเป็นผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมผุกร่อนเป็นสาเหตุให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กพังทลาย

3.2.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือ น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว และได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (วสท. 1014-40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลจากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี ดังต่อไปนี้ (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

1. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary - suction)
2. การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต
3. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำโดยทั่วๆ ไปแล้ว แหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อการก่อสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเลสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจนถึงแม้คลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้จึงไม่เป็นปัญหา

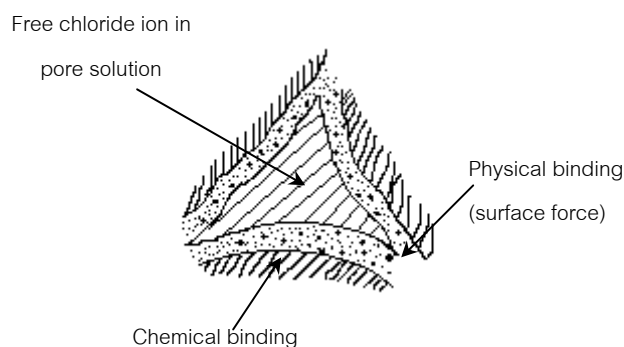
3.2.2 สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

เมื่อคลอไรด์อยู่ในคอนกรีตจะมีคลอไรด์บางส่วนถูกจับยึด (Fixed chloride) โดยเกิดขึ้นได้ดังกล่าวดังต่อไปนี้

1. Bound chloride คือคลอไรด์ (ในบางส่วน) ส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของแคลเซียมคลอโรอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium chloraluminat hydrate (Friedel's salt)) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของภายในเจล (gel pores) ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่มีผลต่อกระบวนการเกิดสนิม

2. Physical bonding คือ คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม ถึงแม้จะมีปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถที่จะแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นหากสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)



ภาพที่ 3.1 การกักเก็บคลอไรด์ด้วยการดูดซับทางกายภาพโดยแรงดึงดูดที่ผิวและการกักเก็บคลอไรด์ด้วยการดูดซับทางเคมี (Funahashi, M., 1990)