

콘크리트의 황산염침식 및 평가 기준

Sulfate Attack of Concrete and Its Evaluation Criteria

이 승 태*
Lee, Seung-Tae

김 성 수**
Kim, Seong-Soo

김 종 필***
Kim, Jong-Pil

ABSTRACT

It has been recognized for a long time that sulfate ions in seawater and soils can cause severe damage to concrete structures. There have been numerous field and lab. studies on the distress caused to concrete structures generated by sulfate attack. All these investigations emphasize that in order to understand the deterioration of concrete due to sulfate attack. Until now, however, it has been difficult to define the precise nature of the mechanism of sulfate attack because of its complex behavior.

Thus, this work dealt with the deterioration mechanism caused by sulfate attack and the evaluation criteria.

요 약

해수, 지하수 등과 같이 황산염이온이 포함된 환경에 콘크리트 구조물이 증가함에 콘크리트의 황산염침식 및 관련 메카니즘에 대한 관심이 증가하는 추세이다. 콘크리트의 황산염침식을 방지하기 위한 연구가 전세계적으로 여러 연구자들에 의하여 수행되었지만 침식 메카니즘의 복잡성 등으로 인하여 아직도 만족할 만한 성과가 가시적으로 나타나고 있지 않다.

따라서, 본 원고에서는 콘크리트의 황산염침식을 유발하는 반응생성물의 생성과정 및 평가방법 등에 대한 고찰을 실시하였으며, 황산염환경하에 노출된 콘크리트 구조물의 합리적 내구성설계를 위한 참고자료를 제공하고자 한다.

* 정회원, 군산대학교 토목환경공학부 조교수
** 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수
*** 정회원, 부천대학 토목과 강의전담교수

1. 서 론

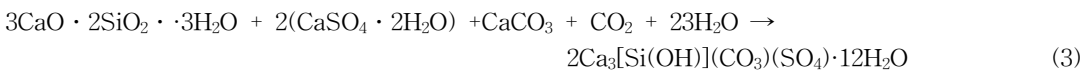
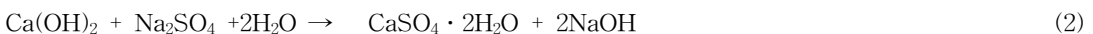
콘크리트의 내구성능을 저하시키는 요인으로는 대기 중의 이산화탄소의 급증에 의한 콘크리트의 중성화, 해양환경 하에서의 염화물 침투 및 황산에 의한 철근부식, 기온저하에 의한 동해 및 유해이온의 침투, 황산에 의한 화학적 침식 등이 있다. 특히, 여러 성능저하 요인 중 콘크리트가 SO_4^{2-} 이온이 함유된 환경에 접할 경우, 침식정도는 다른 내구성 저하요인에 비하여 상대적으로 크기 때문에 콘크리트 내부조직에서 발생하는 연화(softening), 팽창(expansion), 박리(delamination) 등과 같은 성능저하 현상이 나타나며, 이러한 내구성 저하에 관한 명확한 메커니즘을 이해하는 것이 매우 중요하다.

환경적 요인중 SO_4^{2-} 이온의 화학적 침식을 받은 콘크리트구조물은 내구성능 저하로 인한 공용연수가 감소할 뿐 만 아니라 콘크리트의 성능회복을 위한 보수 및 보강에 소요되는 비용이 막대하기 때문에 재료적 변수 등에 따른 침식정도를 정확하게 예측할 필요가 있다. 이와 같은 이유로 인하여, 선진 외국에서는 황산염침식에 의한 콘크리트의 내구성저하 문제를 심각하게 인식하여 관련 code 및 standard 제정에 많은 노력을 기울이고 있으며, 장기실험 및 잔존수명 예측을 위한 수치모델화 연구를 국가적인 차원에서 지원하고 있다. 그러나, 국내의 경우, 콘크리트에 유해한 인자와 관련하는 연구결과 및 데이터가 많이 부족하며, 관련연구도 상당히 한정되어 있기 때문에 황산염침식에 의한 콘크리트구조물의 성능저하 요인 분석 및 검토에 대한 체계적인 연구성과도 아직까지 극히 미비한 상황이다. 뿐만 아니라, 콘크리트구조물의 성능저하에 따른 적절한 보수·보강공법의 종류도 매우 제한되어 있어서 과도한 보수·보강 비용이 지출될 우려가 있으며, 향후 소요되는 유지관리 비용까지 고려한다면 막대한 경제적 손실을 가져올 수 있다.

그러므로 황산염침식에 의하여 성능저하된 콘크리트구조물을 위한 적절한 보수·보강공법의 선정과 유지관리의 체계적인 방안을 확립하기 위해서는 콘크리트 구조물의 침식특성, 성능저하 요인 및 합리적 평가규준의 정립이 필요하다.

2. 콘크리트의 황산염침식과 성능저하

콘크리트의 황산염침식에 의하여 생성되는 반응물질은 ettringite, gypsum, M-S-H, brucite, thaumasite 등이 있으며, 콘크리트의 강도,내구성 등의 성능저하를 유발하게 된다. 식 (1) - (3)은 황산염침식에 의하여 콘크리트 중에 생성되는 반응생성물의 화학반응식을 나타낸 것이다.



콘크리트가 황산염환경에 노출되면, 외부로부터 유입되는 황산염이온의 침식작용으로 인하여 식 (1)과 같이 ettringite가 생성되며, 콘크리트의 팽창균열을 유발하게 된다. 또, 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)은 식 (2)와 같이 SO_4^{2-} 이온과 반응하여 gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)을 생성하게 되어 콘크리트의 강도손실 및 연화작용(softening reaction)을 유발한다. 특히, 콘크리트 중의 ITZ(interfacial transition zone)에서 gypsum이 생성되면, 체적팽창이 ITZ의 제한공간을 초과하게 되어 콘크리트 조직의 갑작스런 붕괴를 일으키기도 한다.

또, 황산염침식으로 인하여 생성되는 반응생성물 중 thaumasite는 조직구조학적으로 ettringite와 매우 유사하여 두 물질을 구별하는 것은 매우 어렵다고 인식되어 왔다. 그러나, 최근 기기분석학의 발달로 인하여 thaumasite는 콘크리트의 황산염침식의 주요 원인 중 하나인 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 thaumasite는 비교적 저온(<5°C)의 조건에서 탄산질의 콘크리트 재료가 사용되었을 경우 주로

지배적으로 생성된다고 보고되어 왔다. 그러나, 온난지역인 미국 남부 캘리포니아에 위치한 콘크리트 구조물에 대한 현장조사를 통하여 상온에서도 thaumasite의 생성이 가능성이 입증되었다¹⁾ 식 (3)에 의하면, thaumasite가 생성되기 위해서는 탄산칼슘 및 이산화탄소가 존재하는 조건에서 C-S-H가 직접적으로 반응에 참여하게 된다. Gypsum 및 ettringite의 생성 조건과는 다르게 C-S-H가 직접 침식을 받기 때문에 콘크리트의 경도 및 강도저하가 심하게 나타나며, 투수성이 급격히 증가하는 성능저하 현상을 나타내게 된다.

표 1은 황산염침식에 의하여 생성된 ettringite, gypsum 및 thaumasite의 SEM 사진을 나타내고 있다. 또, SO_4^{2-} 이온과 결합하는 양이온의 종류에 따른 콘크리트의 황산염침식 정도는 다르게 나타나게 된다. 그림 1 및 그림 2는 황산염 종류에 따른 성능저하 메커니즘을 각각 도식화한 것이다. 특히, 그림 2에 의하면, 콘크리트가 지속적으로 황산마그네슘 침식을 받게 될 경우, 이중층과 내부의 탈탄산화(decalcification)된 1차 또는 2차 C-S-H와의 결합력이 약하게 되어, 콘크리트 표면으로부터 이중층의 탈락이 야기된다. 결국, 황산마그네슘 환경에 직접 노출된 탈탄산화된 C-S-H는 식 (4)과 같이 마그네슘이온과의 치환반응으로 인하여 비결정질의 M-S-H로 변환되어 심각한 강도저하 현상이 발생하게 된다.¹⁶⁾

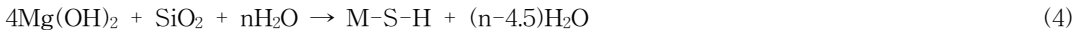


표 1. 황산염침식에 의한 반응생성물

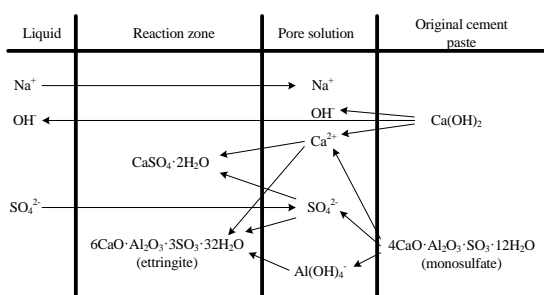
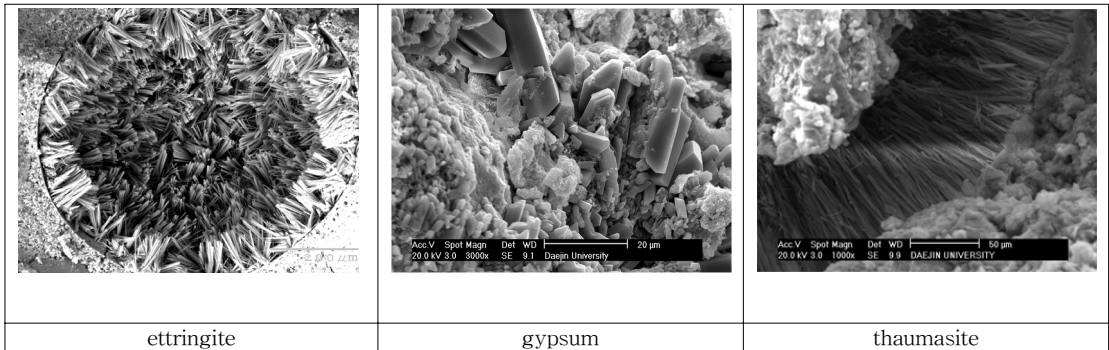


그림 1. 황산나트륨침식 메커니즘

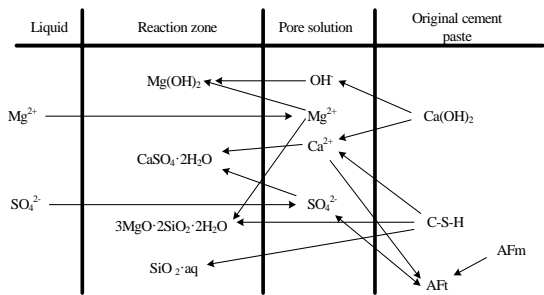


그림 2. 황산마그네슘침식 메커니즘

3. 황산염침식 평가방법 및 규정

3.1 평가방법

콘크리트의 황산염침식 저항성을 평가하기 위한 여러 가지 평가방법이 연구자들에 의하여 제안되었으나, 표준화된 방법은 많지 않다. 주로 ASTM C 452(내적침식 평가법) 및 ASTM C 1012(외적침식

평가법)에 의한 시멘트 경화체의 길이변화량을 재량별로 측정하므로써 시멘트질 재료의 황산염침식 저항성을 간접적으로 추정하였다. 그러나, 언급한 두 방법이 콘크리트가 실제적으로 노출될 수 있는 황산염환경을 정확하게 모사하는지에 대한 의문이 제기된다. 앞서 언급하였다시피, 콘크리트의 역학적, 미세구조적 성능저하는 황산염 노출환경에 매우 의존적이며, 이러한 요인들을 고려한 실험방법의 개발이 필요하지만 연구자들의 경험을 토대로 한 실험방법이 황산염침식 평가를 위하여 주로 이용되고 있다.

특히, Santhanam은 황산염 농도가 증가하면 황산염침식에 의한 성능저하가 증가되어 침식 메카니즘이 변화게 되며, 황산염 농도는 콘크리트의 성능저하 및 내구수명을 결정하는 주요변수 중의 하나로 지적하였다.²⁾

황산나트륨 침식의 경우 황산나트륨용액의 농도에 따라 침식 메카니즘이 두가지 형태로 구분된다. 저농도(0.12% 이하 즉 SO₃ 농도가 830 mg/l 이하 - 이 한계에서 포틀랜드시멘트의 C_A 함량이 변함)에서 콘크리트의 침식 형태는 ettringite에 의한 성능저하이므로, SO₄ 농도가 큰 경우의 침식 메카니즘은 gypsum 생성에 따른 성능저하가 큰 것으로 보고하였다. 황산마그네슘 침식은 황산이온의 농도가 4000 ppm 이하의 저농도에서는 ettringite가 주로 생성되며, 4000 ppm 이상 7500 ppm 이하의 중간농도에서는 ettringite와 gypsum의 생성이 성능저하의 주요 원인인 것에 비하여, 고농도 (7500 ppm 이상)에서는 칼슘실리케이트수화물(C-S-H)의 탈탄산화(decalcification) 및 마그네슘이온의 침식작용이 시멘트 경화체의 성능을 크게 저하시킨다고 한다.

3.2 관련 규정

ACI Building Code 318(표 2)은 콘크리트구조물이 노출되는 환경을 SO₄²⁻ 이온의 농도별로 규정하고 있으며, BS Code 및 BRE 규정도 각각 나라마다 다른 노출환경을 등급별로 제안하고 있다. 뿐만 아니라, 일본, 독일, 덴마크, 캐나다 및 중동지역 국가 등도 고유의 황산염 노출환경을 규정하여 콘크리트의 내구성 설계에 반영하고 있다. 우리나라의 경우는 아직까지 황산염침식과 관련한 현장 및 실내 실험 데이터가 그다지 많지 않은 관계로 합리적인 황산염침식 관련 규정이 존재하고 있지 않으며, 황산염환경에 노출된 콘크리트의 성능저하 예측을 위하여 ACI 규정을 임의로 반영하고 있는 실정이다.

표 2. 콘크리트 노출조건에 따른 농도규정(ACI Building Code 318)

Sulfate exposure	Water soluble sulfate (SO ₄), % by mass	Sulfate (SO ₄) in water, ppm	Cement type
Negligible	0.00 ≤ SO ₄ ≤ 0.10	0 ≤ SO ₄ ≤ 150	-
Moderate*	0.10 ≤ SO ₄ ≤ 0.20	150 ≤ SO ₄ ≤ 1,500	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)
Severe	0.20 ≤ SO ₄ ≤ 2.00	1,500 ≤ SO ₄ ≤ 10,000	V
Very severe	SO ₄ ≥ 2.00	SO ₄ ≥ 10,000	V + pozzolan **

* Seawater

** Pozzolan that has been determined by test or service record to improve sulfate resistance when used in concrete containing Type V cement.

참고문헌

- 1 Diamond, S. (2003). "Thaumasite in Orange Country, Southern California: an Inquiry into the Effect of Low Temperature", Cement and Concrete Composite, Vol. 25, pp. 1161-1164.
2. Santhanam, M., Cohen, M. D., Olek, J. (2001), "Sulfate Attack Research", Cement and Concrete Research. Vol. 31, pp. 845-85.