

알카리골재반응

이승현 (군산대학교 재료·화학공학부 교수)

알카리골재반응은 콘크리트 구조물을 노화시키는 현상의 하나이다. 그 특징은 열이나 철근구속방향으로 생성된 평행한 균열이다. 알카리골재반응이 나타나기 쉬운 장소는 장시간 햇볕이나 비바람을 받는 부분, 건습이 반복되는 부분, 즉 물이 쉽게 증발하여, 알카리 성분이 농축되기 쉬운 곳이다. 이러한 현상이 처음으로 보고된 것은 1930년대의 미국에서였고, 그 후 영국, 캐나다, 호주, 독일 등에서 알카리골재반응에 의한 구조물의 손상이 보고 되었다. 현재 쇄석골재를 사용하는 거의 모든 나라가 알카리골재반응 발생 위험지역이라 할 수 있게 되었다.

1. 알카리골재반응의 종류

알카리골재반응은 콘크리트 중에 존재하는 Na^+ 이온과 K^+ 이온과 같은 알카리 이온이 골재중의 반응성 암석 성분이 물의 존재 하에서 장기간에 걸쳐 반응하여 새로운 생성물을 만드는 것이다. 알카리골재반응의 생성물은 수분을 흡수하여 팽창하므로 콘크리트에 균열을 발생시키며 심할 경우에는 구조물을 붕괴시킨다. 알카리골재반응은 반응성광물과 반응기구에 의해 알칼리·실리카반응, 알칼리·탄산염반응, 알칼리·실리케이트반응으로 분류된다. 이 중 알칼리·실리카반응이 세계적으로 보고된 예가 가장 많고, 알칼리·탄산염반응 및 알칼리·실리케이트반응에 대해서는 몇 가지 예가 보고된 것에 불과하므로 현재까지 알칼리골재반응이라 하면 알칼리·실리카반응을 의미한다.

1) 알칼리·실리카반응

1940년 미국에서 발견된 이래로 1970년 유럽 각국에서 1983년에는 일본에서도 발견되었으며, 전 세계에 걸쳐 보고 되어 알카리골재반응의 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 콘크리트 중의 알카리 이온이 골재중의 비정질 실리카, 혹은 열역학적으로 불안정한 실리카 성분과 결합하여 알칼리-실리카 겔을 형성하고, 이 겔이 주위의 수분을 흡수하여 콘크리트 내부에 국부적인 팽창압력을 발생시켜 구조물에 균열을 발생시킨다.

이 반응을 일으키기 쉬운 물질로는 주성분으로 SiO_2 성분을 함유하고 있는 cristoballite, tridymite, opal, 화산성 유리, chert등이며, 이러한 물질을 함유하는 암석으로는 안산암, 응회암, 현무암, 혈암, 사암, 규질암, 이암 등이 있다. 이들 중에는 알칼리와 반응성이 높은 실리카나 화산성 유리 등을 함유

하고 있는 것이 많다.

2) 알칼리·탄산염반응

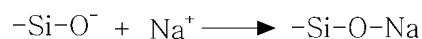
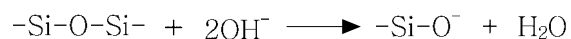
1955년 캐나다의 Ontario주의 Kingstone에서 발생하여 1957년 Swanson에 의해 처음으로 보고 되었다. Dolomite질 석회암이 알칼리 이온과 반응하여 그 생성물이 팽창하거나, 암석 중에 존재하는 점토 광물이 수분을 흡수하여 팽창하는 반응이다. 이 반응과 알칼리·실리카반응과 구분되는 것은 이 반응에서는 겔이 발견되지 않으며 알칼리·실리카반응을 억제하는 효과가 있는 포졸란 물질도 이 반응에 대해서는 팽창억제 효과가 없는 것으로 보고 되었다.

3) 알칼리·실리케이트반응

캐나다의 Nova Scotia 지방의 greywackes, agrillitues, phyllites 등의 골재를 사용한 콘크리트에서 발생하며 알칼리·실리카반응에 비해 장기간에 걸쳐 반응이 일어난다. 정확한 반응기구는 알려져 있지 않으나 암석 중 층상구조인 vermiculite가 알칼리 성분과 반응하여 수분을 흡수·팽창하는 것으로 여겨진다. 이 반응은 알칼리 실리카 반응과 비교하여 천천히 장시간에 걸쳐 진행되고 생성된 겔의 양이 적은 것이 특징이다.

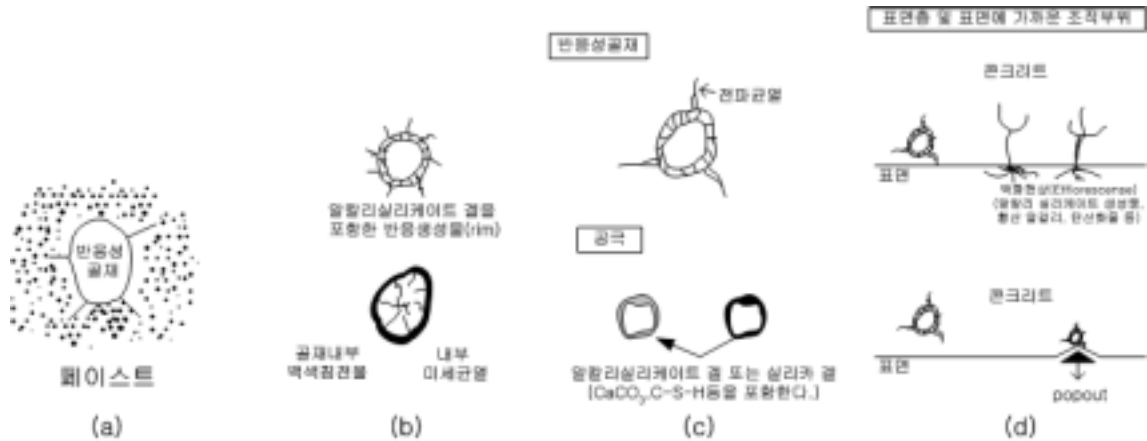
2. 알칼리·실리카반응의 팽창기구

시멘트 경화체의 공극에 존재하는 알칼리 용액 속의 OH^- 와 Na^+ 이온은 다음과 같은 반응에 따라 반응성 실리카와 반응한다.



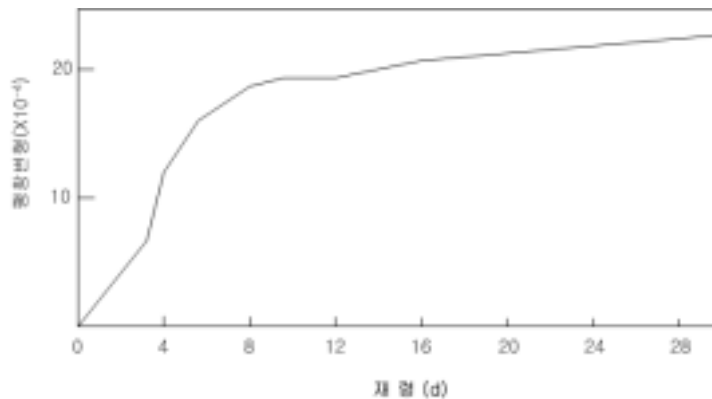
즉, OH^- 는 $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ 결합을 절단하고, 나아가 말단의 $-\text{Si}-\text{O}^-$ 는 Na^+ 이온과 결합하여 알칼리 규산염 겔을 생성한다. 이 겔은 점차 물을 흡수하여 팽창하고, 발생한 응력에 콘크리트가 견디지 못하게 되면, 변형이나 균열이 일어난다. 따라서 알칼리·실리카반응은 반응성 실리카가 함유되어 있는 골재를 높은 습도 하에서 사용하게 되면 충분히 알칼리골재반응이 일어날 수 있다. 이렇게 생성된 겔은 주위의 수분을 흡수하여 체적이 증가되는 성향을 갖으며 이로 인해 주위의 시멘트 경화체에는 내부압력이 작용하여 결국 콘크리트에는 <그림-1>과 같은 팽창(expansion), 균열(crack), 탈락(pop out : 골재가 떨어져 나오는 현상)을 하게 된다.

알칼리 골재반응에 의한 균열발생은, 반응에 의해 생성되는 팽창성 물질에 기인하며, 모르타나 콘크리트의 팽창율과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져



<그림-1> 알카리골재반응의 진행 모델의 예

있다. 반응성 골재 중 비정질 실리카로 이루어진 opal을 사용한 모르터의 팽창율을 측정해 보면, <그림-2>와 같이 되어, 재령 8일까지의 팽창속도가 두드러짐을 볼 수 있다. 비정질 실리카는 모르터 내에서 알칼리와 반응하면서 흡수 팽창하여, 균열을 발생시킨다.



<그림-2> Opal 함유 골재를 사용한 경우의 모르터의 팽창특성
(시멘트:골재:물=1:0.75:0.4, Opal:표준사=1:9, 38℃ 양생)

알칼리·실리카반응에 의한 균열은 다습하거나 습윤 상태가 유지되고, 온도가 비교적 높으며, 구조적 구속이 작은 경우에 발생하기 쉽다. 알칼리골재반응의 팽창압으로 발생된 균열로 인해 구조물이나 부재의 내력이 바로 저하되는 것은 아니지만 진행성 균열로써 환경적 침해, 즉 동해나 화학적 침식에 대해 저항성이 저하되고 콘크리트 중에 있는 철근이 부식될 가능성이 매우 높게 된다. 균열형태로는 철근의 구속이 없는 경우에는 거북등 모양의 망상균열이 생기고 철근 구속이 있는 경우에는 구속철근의 축 방향으로 균열

이 발생한다. 알칼리 골재 반응에 의해 피해 확인은 균열의 형태에 의해 판단하는 것 이외에도 코아를 채취하여 겔(대부분이 백색)의 존재 및 공극 내부 충전 유무, 이상 팽창의 발생 유무, 골재입자의 둘레에 검은색의 반응환 발생 등으로 추정한다. 또한, 일반적으로 이 반응이 일어난 경우에는 압축강도 및 탄성계수도 낮게 측정되는 것이 보통이다.

알칼리골재반응의 진행에서 필수적인 세 요소는 반응성 골재, 알칼리 성분의 존재 및 물의 공급이다. 또한 이 반응에서는 건조의 반복과 온도 변화가 존재하면 이 반응에 부가적 요소로 작용한다고 알려져 있다. 따라서 알칼리골재반응에 의한 균열을 미연에 방지하려면 이 반응을 일으키는데 필요한 조건 중에서 한 가지를 제거하는 것이 효과적이다.

3 알칼리골재반응 시험법

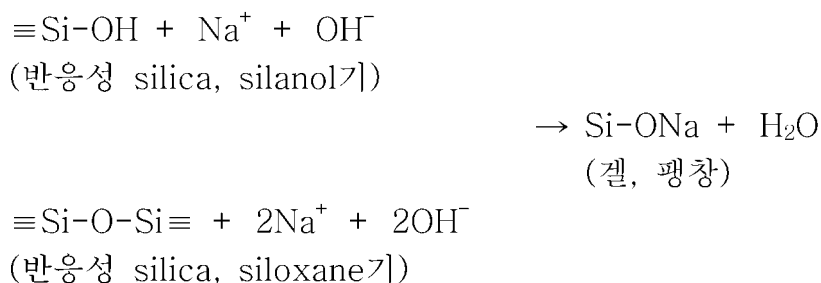
알칼리골재반응의 시험법은 반응성 광물에 주안점을 둔 광물학적 방법 (KS F 2458, ASTM C 295), 반응 생성물에 주안점을 둔 화학적 방법 (KS F 2545, ASTM C 289), 반응에 의해 발생한 팽창에 주안점을 둔 모르타르 붕 방법 (ASTM C 227, KS F 2546, 비속법 : ASTM C 1260) 등이 있다.

1) 광물학적 방법 (콘크리트용 골재의 암석학적 시험방법)

암석의 물리적 및 화학적 시험방법으로 반응성 광물의 종류와 함유량을 구하는 것으로, 암석의 분류식 검사를 통하여 알칼리·실리카반응, 알칼리·탄산염반응이 일어날 수 있는 성분을 정량적으로 구한다. 그러나 알칼리골재반응의 유해, 무해를 판정하지는 않는다.

2) 화학적인 방법 (골재의 잠재적 반응성 시험방법)

골재 중에 함유되어 있는 반응성 실리카를 수산화나트륨 용액과 고온에서 다음과 같은 반응을 신속하게 진행시켜 용해 실리카 양과 알칼리 농도 감소량을 측정하여 골재의 잠재적 알칼리 반응성을 판정하는 방법이다.



시험방법은 다음과 같다. 시료를 채취(0.3mm체를 통과하고, 0.15mm체 위에

걸러지는 시료 25.00±0.5g)하고 NaOH 용액(1.000N NaOH 25cc)를 첨가한다. 밀봉 용기 중에서 80±1℃, 24시간 유지하고 여과한 후, 알카리 농도 감소량(Rc, mMol/L)을 염산에 의한 적정으로 측정하고, 용해 실리카량(Sc, mMol/L)을 중량법 혹은 광도측정법으로 구한다. Sc와 Rc는 다음과 같은 의미가 있다.

Sc : 골재가 알카리-실리케이트 겔을 생성하는 양의 대소의 지표이며, Sc가 클수록 겔 생성량은 크다.

Rc : 생성한 겔의 폴리머의 척도이며, Sc가 같은 값인데 Rc가 큰 것은 실리카의 중합도가 적은 것을 나타낸다. 또 Sc/Rc의 비가 큰 것이 실리카의 중합도가 크므로 유해하다.

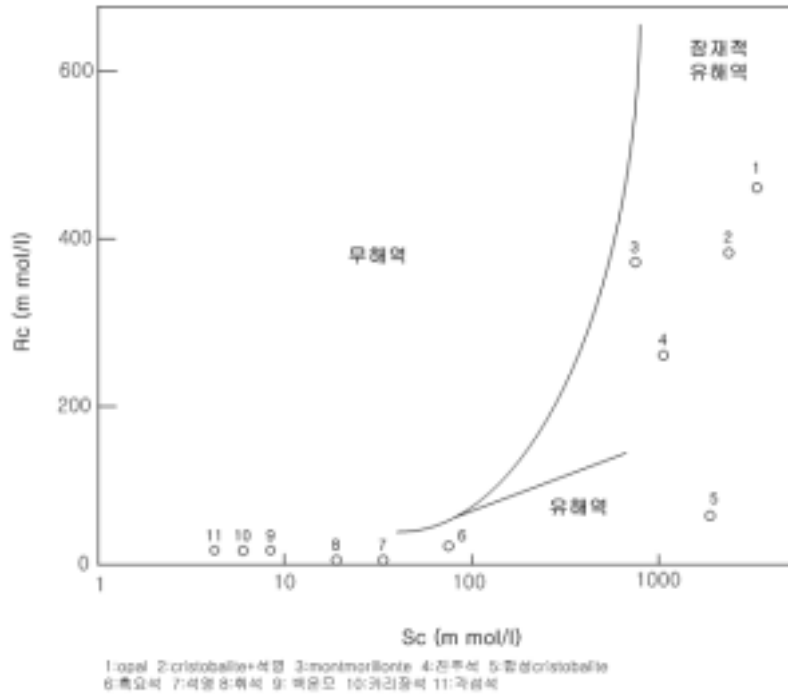
이와 같이 Sc가 큰 골재는 Rc의 대소에 의해 유해한 성질로 변화하므로 Rc의 측정에 특히 신중하여야 한다.

화학적 방법에 의한 Sc와 Rc의 관계로부터 <그림-3>에 나타난 바와 같이 유해, 잠재적 유해, 무해의 세 가지로 구분된다. <그림-3>에 골재를 구성하는 암석의 실험 예를 삽입하면, 대략 세 부분으로 구분하여 판정할 수 있다. 3차원 망목구조인 석영, 장석, 2차원 층상구조인 운모, 긴 쇄상의 휘석 등은 모두 Sc와 Rc가 작아 무해하지만, 이들에 비하여 결정 구조의 규칙성이 낮은 opal, 진주석, cristobalite, 반응성이 큰 점토 (montmorillonite) 등은 Sc와 Rc 모두 커서 잠재적 유해라고 판정된다. 이와 같은 결과로부터 반응성 골재를 사용하지 않으면 알카리 골재 반응은 막을 수 있지만, 골재 사정이 매우 좋지 않기 때문에, 반응성 실리카나 규산염을 함유하는 골재를 사용하지 않을 수 없는 경우가 많다. 이러한 경우에는 콘크리트에 공급되는 알카리 양을 억제하는 방법 밖에 없다.

3) 모르터 붕 시험방법 (시멘트와 골재의 조합에 의한 잠재적 알카리 반응성에 대한 시험)

ASTM C 227, KS F 2546에 의하면 세골재는 소정의 입도로 조정하고, 조골재의 경우는 분쇄하여 조정한다. 시멘트와 모래의 비를 1:2.25로 하여 모르터를 만들고 온도 38.7℃의 조건으로 시멘트 중의 알카리와 반응성 실리카를 반응시켜 겔의 팽창에 의해 모르터의 크기를 측정하여 반응성을 시험하는 방법이다. 이 시험방법은 생성하는 겔의 양에 의해 판정하는 것으로 겔 양은 반응성 실리카의 양과 알카리 양에 의존한다. 화학적 방법에서는 골재에 대하여 사용하는 NaOH 양은 일정한 값으로 규정되어 있지만, 모르터 붕 방법은 반응에 관여하는 알카리 양은 시멘트로부터 공급되므로 시멘트 중에 포함되는 알카리 양에 의해 겔 생성량이 달라진다. 즉 모르터 붕 방법은 사용하는 시멘트의 종류에 의해 알카리 양이 달라지므로 같은 골재를 이용하더라도 측정결과가 달라질 수 있다. 그래서 ASTM에서는 가능하면 알카

리 양이 많은 시멘트로 시험할 것을 장려하고 있다. 잠재적 알카리 반응성 판정 기준은 재령 6개월 팽창에서 0.1% 이상 이며, 간이적으로는 3개월에서 0.05% 이상 팽창이다.

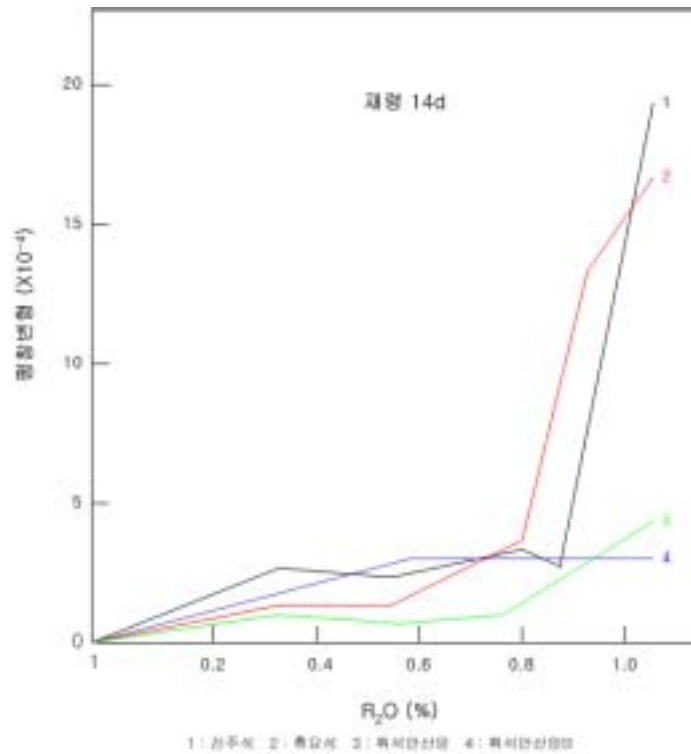


<그림-3> Rc와 Sc와의 관계

비속법으로는 ASTM C 1260이 있다. 이 방법에 의하면 모르터 봉은 물/시멘트=0.47, 모래/시멘트=2.25로 제작하고, 24시간 표준양생과 24시간 80℃의 물에 저장한 후 시료들은 밀폐된 1N NaOH 수용액 안에 저장한다. 길이 변화의 측정은 저장된 용기에서 꺼낸 후 측정표면을 말린 후 바로 측정기를 이용하여 측정한다. 밀폐된 1N NaOH 수용액 안에서의 재령 14일을 기준으로 다음과 같이 판정을 내린다.

- ①0.10% 보다 팽창이 작으면 대부분의 경우 무해하다.
- ②0.20% 보다 팽창이 크면 잠재적으로 유해하다.
- ③0.10—0.20% 사이의 팽창은 무해성과 유해성을 포함하고 있기 때문에 충분한 데이터를 가지고 평가하여 한다.

<그림-4>는 비속법으로 측정한 것으로, 시멘트내의 알카리 양과 모르터의



<그림-4> 시멘트 중의 알카리 양과 모르터의 팽창과의 관계

팽창율의 관계를 나타내고 있다. <그림-4>에서 보듯이 알카리 양이 0.6% 이하라면, 알카리 골재반응에 의한 콘크리트의 손상은 대부분 방지할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

4. 맺는말

현재 우리나라의 골재 수요는 연간 4억 톤에 이르고 있어 천연 골재로는 도저히 수요를 충족시킬 수 없어, 공급량 중 약 20%만 하천 모래나 자갈이고, 나머지는 쇄석, 육지 자갈, 산사, 해사 등으로 채우고 있다. 아직 국내에서는 알카리골재반응에 의한 실제 구조물의 피해 예가 보고된 바는 없으나 일부지역의 골재가 최근 반응성 골재로 판별됨으로써 사용상의 주의가 요망된다. 그리고 국내에서도 점차 천연골재의 고갈과 함께 쇄석의 사용이 증가하고 있으므로 알카리골재반응의 위험성이 외국의 경우와 같이 사회 문제화될 가능성이 있다.