

# 인공경량골재의 알칼리골재반응

이 중 열 (쌍용양회 기술연구소 연구자문역)

콘크리트에서 알칼리골재반응은 일종의 암이라고 표현할 수 있다. 잠복기간이 길고, 균열이 나타나는 시기도 매우 오래 걸리기 때문이다. 이러한 현상이 1940년대 알려지면서, 미국 ASTM에는 1950년에 모르타르봉 시험방법이, 1952년에 화학법이 각각 시험방법 규격으로 제정되었다.

국내에서는 한국건설기술연구원, 대한주택공사, 한국지질자원연구원 등에서 화학법 및 모르타르봉 방법으로 연구한 결과, 화학법에서는 일부 골재가 반응성이 있는 것으로 보고되었으나, 모르타르봉 방법에서는 대상 골재에서 유해가능성이 낮은 것으로 보고되었다. 또한, 그동안 구조물에서 알칼리골재반응에 의한 피해사례도 보고되지 않았으며, 골재의 품질도 양호한 것으로 알려져 왔다. 그러나, 최근 서해안 고속도로 일부 구간에서 알칼리골재반응에 의한 포장노면에 균열 및 스폐링 등 심각한 피해사례가 보고되면서 관심이 점점 높아지고 있다.

특히 일본에서는 제63회 시멘트기술대회(2009년 5월 22일)에서 팽창기구의 재검토에 대한 이야기가 패널토의에서 제기되었고, 일부 시험방법의 이야기도 나오고 있다. 그동안의 골재는 현재의 규격만으로도 설명이 가능했는데, 최근의 골재들은 설명이 잘 안 되는 경우가 있다는 이야기다.

이런 측면에서 경량골재에 대한 알칼리골재반응 보고는 거의 없는 상태인데 마침 이에 관한 문헌이 보고되었기에 소개하기로 한다. 아울러 일본 (주)시멘트신문사에 매월 발간되는 콘크리트 테크노 저널

2009년 10월호에 게재된 내용을 번역한 것임을 밝혀둔다.

## 1. 서 론

알칼리실리카반응(Alkali-Silica Reaction, 이하 ASR로 약함)은 골재중의 반응성 실리카광물(크리스토파라이트, 토리시마이트, 오팔 등)과 콘크리트 중의 수산화 알칼리를 주성분으로 하는 세공용액과의 사이의 화학반응이다. 이 반응에 의해 골재주위에 생긴 ASR 겔이 흡수 팽창하는 것에 따라서, 콘크리트에 균열이나 뿔아웃트가 발생한다.

구조용 경량콘크리트골재(JIS A 5002)에 규정된 경량골재는, 팽창성 혈암 등의 원료를 소성해서 제조하는 인공경량골재 이외에 천연경량골재, 부산물 경량골재 등이 있다. 이들의 경량골재 중, 1950년 후반에 개발이 진행된 인공경량골재가 그 품질의 안정성 등의 면에서 주류를 이루고, 건축물의 슬래브나 외벽재, 교량의 빔이나 상판 등의 구조물로서 폭 넓게 적용되고 있다.

이 경량골재를 사용한 경량콘크리트의 ASR에 의한 열화사례는 거의 보고되고 있지 않지만, 근년에 되어서, ASR에 의한 열화가 의심이 있는 사례도 수 건 보고되고 있다. 그렇지만, 사례가 적고, 복잡한 요인에 의한 열화로도 생각할 수 있기 때문에, 열화의 주요인이 ASR에 의한 것이라고 특정하는 것은 어려운 현상이다.

한편, 인공경량골재의 ASR 시험방법에 관해서는 2, 3의 연구보고가 있을 뿐, 체계적인 연구가 거의 행해지지 않는 현상이다.

일본에서는, 골재의 알칼리실리카 반응성시험으로서, 화학법(JIS A 1145-2001년) 및 모르타르 bar 법(JIS A 1146-2001년)이 규정되어 있다. 그러나 양 시험법의 기준에서는 적절히 판정할 수 없는 종류의 골재가 있다는 것이 지적되고 있다. 또, 인공경량골재에는, 양 시험법의 해설 중에 화학법 및 모르타르 bar 법이 적용할 수 없다고 기술하고 있다. 이 이유는, 골재의 ASR 시험에서는 골재는 파쇄해서 세골재의 입도형태로 이용되지만, 경량골재에서는 파쇄한 것과 파쇄하지 않은 것(원골재)에서는, 골재의 물리적·화학적 성질이 크게 다르기 때문이다. 더욱이, 고온에서 소성된 인공경량골재나 화산 조약돌로부터 된 천연경량골재 중에는, 알칼리실리카 반응성을 갖는 광물이 함유된 가능성이 높지만, 인공경량골재 중의 반응성광물에 관한 암석·광물학적 검토는 거의 실시되지 않았다.

또, 인공경량골재의 ASR 시험법에 관해서, 시험체의 상세한 제작방법이나 그 판정기준의 당위성은 언급되고 있지 않고, 실제로 JIS A 1146에 준거한 질량배합에서 모르타르 bar를 제작하면, 골재용적이 증대하기 때문에 모르타르의 혼련이나 타설이 곤란하게 되는 문제점이 거론되고 있다. 또, 콘크리트 bar 법에서는, 경량골재 및 경량조골재를 이용해서, 알칼리실리카 반응성을 평가하기 때문에, 현실을 감안한 판정방법이라고 말할 수 있지만, 축진환경하에서도 판정에는 6개월부터 1년을 요한다고 하는

점이 문제이다.

본고에서는, 경량골재의 알칼리실리카 반응성의 확인과 그 시험방법을 개발하기 위하여, 일본에서 사용되고 있는 2종류의 인공경량골재 및 1종류의 천연경량골재를 대상으로, 일련의 ASR 시험방법(화학법, 모르타르 bar 법 및 콘크리트 bar 법)을 실시한 것에 관해서 정리한 것이다.

## 2. 사용재료

실제로 사용한 경량골재(시판품)는 2종류의 인공경량골재와 1종류의 천연경량골재(구개악産 화산 조약돌)이다. 또한, 반응성골재로서 후지산현 常願寺川産 강자갈(안산암 입자를 약 30% 함유하는, 화학법(JIS A 1145):Sc/Rc=5.2, Sc=353mmol/l, Rc=68mmol/l, 모르타르 bar 법(JIS A 1146):0.443%(제령 6개월))을 이용했다. 사용골재의 물리적 성질 및 화학적 성분은 <표-1>, <표-2>에 나타내었다. 한편, 경량골재의 밀도는 절건 밀도로, 흡수율은 출하시의 함수상태로 표시했다.

세골재로서 사용하기 위해 출하시 함수상태의 세골재를 물라밀에서 분쇄한 후, 5mm 이하의 범위에서 모르타르 bar 법 시험용 입도(JIS A 1146-2001에 준거)로 조정했다. 또, 모르타르 bar 법에는, 보통 포틀랜드시멘트(밀도:3.16g/cm<sup>3</sup>, Blaine:3,330cm<sup>2</sup>/g, 등가 알칼리량:0.68%)를 사용했다. 콘크리트 bar 법에는, 세골재로서 비 반응성의 쓰루미산 석회석 쇄사(밀도:2.69g/cm<sup>3</sup>, 흡수율:0.70%, 조립율:2.70)를 이용했다.

<표-1> 골재의 원료 및 물리적 성질

골재명	주원료	세골재		조골재	
		밀도(g/cm <sup>3</sup> )	흡수율(%)	밀도(g/cm <sup>3</sup> )	흡수율(%)
조립형 팽창혈암계	팽창혈암	1.38	15.7	1.28	29.4
비조립형 팽창혈암계	팽창혈암	1.33	18.1	1.26	34.7
천연경량	화산력	1.37	27.6	0.92	59.9
반응성골재	강자갈	-	-	2.60	1.7

〈표-2〉 경량골재의 유리상의 주요한 화학성분(wt%, SEM-EDX 분석)

골재명	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	계
조립형 팽창혈암계	52.3	18.6	4.1	3.1	4.0	8.7	2.0	0.1	92.9
비조립형 팽창혈암계	59.1	17.0	1.7	0.1	3.2	10.4	1.9	0.3	93.7
천연경량	65.9	12.9	1.1	1.5	2.0	11.8	1.0	0.5	96.7
반응성골재	61.7	17.2	1.7	4.6	0.5	7.8	3.0	0.8	97.3

### 3. 골재의 알칼리실리카 반응성

#### 가. 화학법

경량골재의 화학법(JIS A 1145)에 의한 판정결과를 〈그림-1〉에 나타내었다. 인공경량골재는 실리카분(SiO<sub>2</sub>) 및 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 합계를 70~80%, 알칼리성분(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)을 10% 정도 함유하는 화학조성이며, 석영 및 장석이 주 광물조성으로 되어 있다. 이 화학성분 및 광물조성으로부터 화학법에 의한 판정은 「무해하지 않음」이라는 결과를 얻었다. 〈그림-1〉에 나타낸 바와 같이, 화학법의 판정결과는 경량골재의 종류에 따라 변화하지만, 어느 경우의 경량골재도 「무해하지 않음」으로 판정되었다. 화학법(JIS A 1145)의 해설에서는 「인공경량골재를 파쇄해서 시험에 이용하면, 콘크리트중과 다른 조건이 되기 때문에 본 골재는 본 실험방법의 적용범위 외로 했다」고 기술하고 있다. 경량골재에 화학법을 적용할 때에는, 경량골재의 기공 중에 알칼리 용액이

흡착되기 때문에, 분석용의 액량이 일정하게 되지 않는 것과, 흡인 통과시간을 길게 할 필요가 있는 것이 문제점으로 거론되고 있다. 이 때문에, 화학법의 측정정도 자체가 낮게 되는 것도 주의가 필요하다.

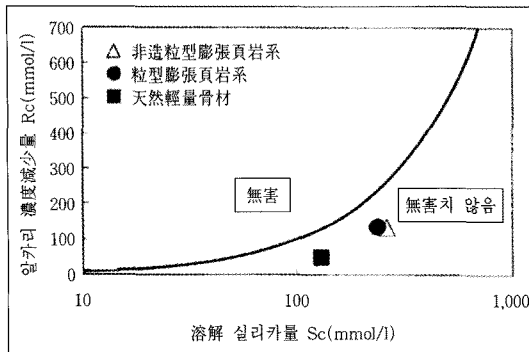
#### 나. 모르타르 bar 법

〈그림-2〉에 비조립형 팽창혈암계의 인공경량골재를 이용한 모르타르 bar 법의 시험결과를 나타내었다. 모르타르 배합은 물:시멘트:골재=0.5:1:2.25이며, 사용 시멘트의 등가 Na<sub>2</sub>O 량을 수산화나트륨용액을 첨가하여 1.2%로 조정하고, 모르타르bar-(40×40×160mm)를 제작했다. 타설 후(타설 후 24시간)의 길이를 基長으로 하여, 온도 40℃, 상대습도 100%의 조건하에서 길이변화를 6개월간 측정했다. 또한, 측정치는 3개의 평균으로 했다.

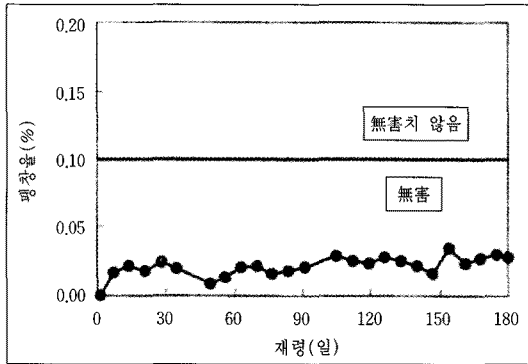
JIS A 1146에서는, 0.05% 이상(3개월 재령) 또는 0.1% 이상(6개월 재령)의 팽창량을 「무해하지 않음」으로 판정했다. 인공경량골재는 「무해」라고 하는 판정결과로 되어 있다.

인공경량골재를 사용한 모르타르의 알칼리골재반응에 의한 팽창거동은 밀실한 반응성골재의 경우와는 크게 다른 것이라고 예측된다. 바꾸어 말하면, 모르타르 bar 법에서는, 파쇄모래를 사용하는 것이 되기 때문에, 내부공극을 많이 포함한 골재의 기공부분과 시멘트페이스트가 접촉하는 것이 된다.

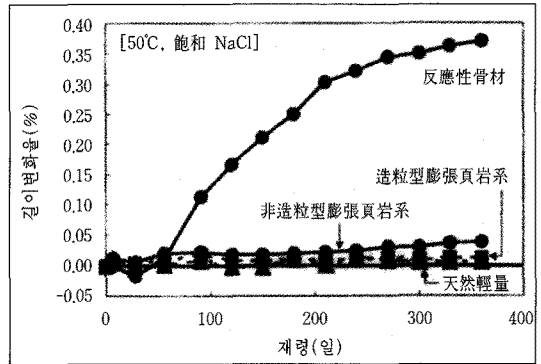
이 때문에, 생성한 ASR 겔은 골재의 기공 중에 침투하여, 貯留되기 때문에, ASR에 의한 팽창압이 완화되는 것으로 추측된다. 이것은, AE 콘크리트에서 연행공기가 역할하는 팽창억제효과와 같은 것으로



〈그림-1〉 화학법 시험결과



〈그림-2〉 모르타르 bar 법 시험결과



〈그림-3〉 콘크리트 bar 법 시험결과

로 생각된다. 이것으로부터, 인공경량골재의 알칼리골재 반응성은, 파쇄골재가 아니고, 실제로 사용하는 상태에서 시험이 실시 가능한 콘크리트에 의한 평가에 해당한다.

#### 다. 콘크리트 bar 법

〈그림-3〉에 콘크리트 bar 법의 시험결과를 나타내었다. 콘크리트 bar 법에는, ① 콘크리트 내부에 알칼리를 첨가해서, 알칼리골재반응을 촉진시키는 방법(JCI 법, 캐나다법 등)과, ② 외부로부터 알칼리(NaOH, NaCl 등)를 공급시켜 알칼리골재반응을 촉진시키는 방법(ASTM 법, 덴마크법 등)이 있다.

여기에서는, 외부로부터 알칼리가 항상 공급되는 가혹한 양생조건 하에서의 시험인 덴마크법에 의해 평가를 하였다.

이 시험은, 공시체 탈형 후 50°C, 포화 NaCl 용액 중에 침투시키는 방법이다. 공시체 치수는 75×75×400mm 크기로, 공시체는 3개로 했다.

반응성골재가 재령 2개월 이후에 급격히 팽창을 개시하여, 공시체 표면에 거북 모양의 균열이 발생했다. 또, 질산은용액에 의해 염분침투 깊이를 확인

한바, 모든 공시체에서 NaCl 용액이 중심부까지 침투하고 있었다. 그러나 어느 경우의 경량골재도 거의 팽창은 발생하지 않았다.

#### 4. 결 론

(1) 화학법(JIS A 1145)에서는 경량골재의 알칼리실리카 반응성은 모두 「무해하지 않다」라고 판정되었지만, 모르타르 bar 법(JIS A 1146)에서는 큰 팽창은 발생치 않고, 경량골재의 알칼리실리카 반응성은 모두 「무해」로 판정되었다.

(2) 콘크리트 bar 법(포화 NaCl 용액에 침투시켜 양생)에 있어서도, 반응성골재에서는 재령 2개월 이후 급격히 팽창을 개시하여 공시체 표면에 거북 모양의 균열이 발생했지만, 경량골재(전재령)에서는 재령 1년까지에 있어서도 거의 팽창은 발생하지 않았다.

이상과 같이, 인공경량골재는 화학법에서는 「무해하지 않다」로 판정되었지만, 모르타르 bar 법 및 콘크리트 bar 법에서는 팽창거동을 나타내지 않아서, 인공경량골재의 알칼리골재 반응성은 문제가 없다고 판단된다. ▲