

-shotcrete용 급결제의 알칼리-실리카 반응성 검토



원종필
건국대학교
사회환경시스템공학과
교수



최보라
건국대학교
사회환경시스템공학과
대학원생



박해군
삼성물산(주)
건설부문 토목ENG팀
차장

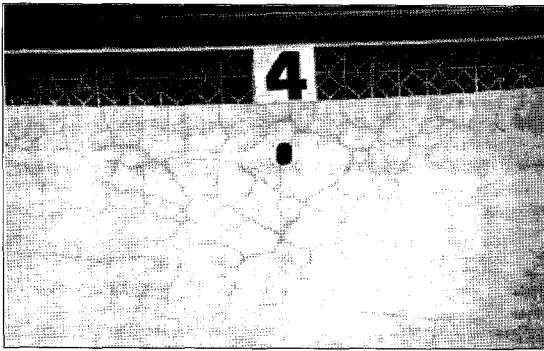
1. 서론

shotcrete를 시공하는데 있어 작업 능률을 높이고 조기 강도의 발현 및 리바운드 저감을 위해서 사용하는 것이 급결제이다⁽¹⁾. KS F 1004에서는 급결제를 시멘트의 수화 반응을 빠르게 하고 응결시간을 현저하게 단축시키기 위해 사용하는 혼화제로 정의하고 있으며 shotcrete에서 그 사용은 필수적이라 할 수 있다. 급결제는 형상에 따라 액상형과 분말형 성분에 따라 경화촉진체계, 무기염계, 알칼리프리계 및 시멘트 광물계로 구분된다⁽¹⁾.

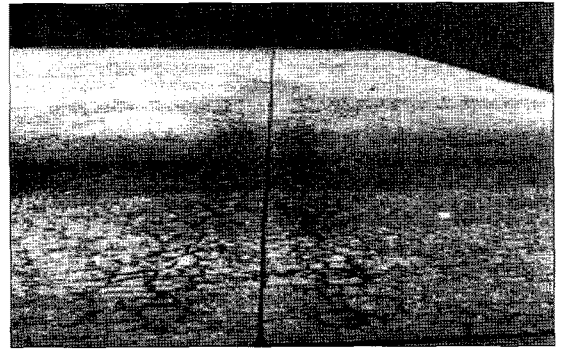
최근 들어 전 세계적으로 댐, 교량, 빌딩 등과 같은 여러 가지 콘크리트 구조물에서 알칼리-실리카 반응(ASR)으로 인한 피해 사례가 보고되고 있다⁽²⁾⁻⁽⁵⁾. 그림 1의 (a)는 수영장 (b)는 콘크리트 포장에서 발생한 알칼리-실리카 반응의 모습으로 map 형태의 불규칙한 균열의 형태를

띠고 있음을 알 수 있다.

알칼리-실리카 반응은 반응성 실리카 성분, 알칼리 성분 및 수분이 존재할 때 발생하는 화학적 반응으로 팽창성 알칼리-실리카 겔을 형성하여 콘크리트 구조물에 균열을 야기시킨다⁽⁶⁾. 알칼리-실리카 반응의 정도는 반응성 실리카의 양, 알칼리의 양, 골재 입자의 크기, 온도, 상대 습도 등에 따라 달라지는데 알칼리의 경우 제설제 등과 같은 첨가물질에 의해서도 제공될 수 있음이 밝혀지면서 시멘트계 재료의 알칼리 함유량에 대한 관심이 높아지고 있다^{(6),(7)}. shotcrete용 급결제의 경우에도 그것이 함유하고 있는 알칼리 양의 차이로 알칼리-실리카 반응에 대한 논란이 있는 실정이다. 따라서 shotcrete용 급결제를 사용하였을 때 이것의 알칼리 함유량이 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향을 검토해 보았다.



(a) 수영장



(b) 콘크리트 포장

그림 1. 알칼리-실리카 반응 발생 사례^{(3),(5)}

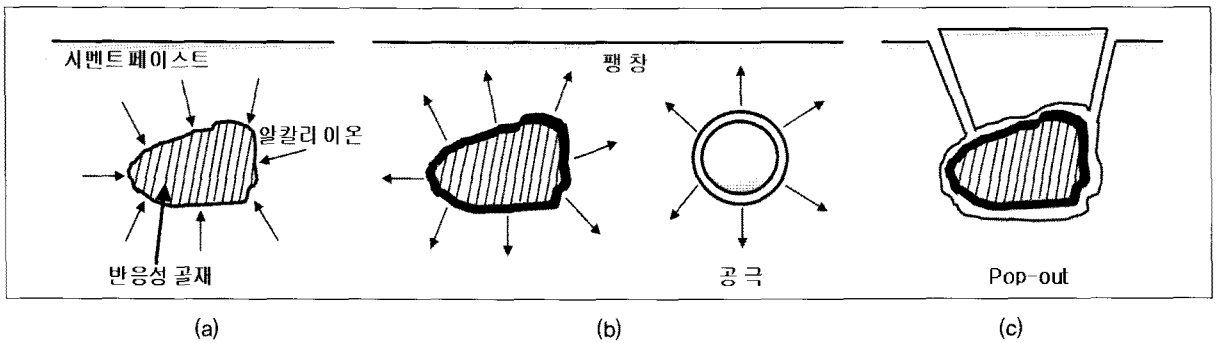
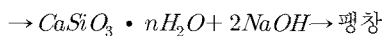
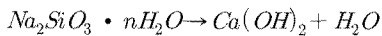
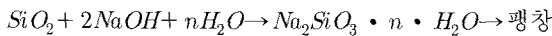


그림 2. 알칼리-실리카 반응의 진행 과정

2. 알칼리-실리카 반응 메커니즘

알칼리-실리카 반응의 메커니즘은 다음과 같은 식으로 요약할 수 있으며⁽⁸⁾ 진행 과정은 그림 2와 같다.



(a) 시멘트의 알칼리 성분이 반응성 골재 내부로 확산되며 수산화이온 (OH^-)에 의해 골재 내부의 실록

산 (Siloxane) 구조가 붕괴된다.

(b) 반응 결과 알칼리-실리케이트 겔(alkali-silicate gel)이 형성되며 골재 주변에는 겔의 반응층인 검은색 반응환이 형성된다. 생성된 겔은 유동성이 있어 골재 내부 혹은 공극으로 흘러들어가 주변의 물을 흡수하여 팽창하게 된다. 반응이 콘크리트 표면에서 발생한 경우에는 표면에 백색의 생성물 형태로 나타난다.

(c) 겔의 팽창은 콘크리트 내부에 국부적인 팽창압력을 발생시키게 되고 그 결과 구조물에 균열을 야기한다. 알칼리-실리카 반응에 의한 균열은 거북이등껍질 무늬나 망상 구조 등 여러 가지 형태로 나타난다.

표 1. 시멘트 및 급결제의 등가알칼리 함유량

구분	등가알칼리 함유량 (%)
시멘트	0.81
알루미늄이트계 급결제	18.81
시멘트 광물계 급결제	13.52
알칼리프리계 급결제	0.52

3. 숏크리트용 급결제의 알칼리-실리카 반응성 시험

3.1 사용 재료

골재는 반응성 유무에 따라 분류하여 사용하였다. 따라서 국내산 강모래를 비반응성 골재로 국내산 안산암을 반응성 골재로 사용하였다. 시멘트는 국내 8개 회사의 1종 포틀랜드 시멘트를 등가알칼리 함유량에 따라 구분하였을 때 가장 적은 알칼리를 함유하고 있는 것을 선택하였다. 숏크리트용 급결제로는 현장에서 가장 많이 사용되는 알루미늄이트계, 시멘트광물계 및 알칼리프리계를 선택하였으며 각각 시멘트량의 5%, 5%, 7%를 혼입하였다. 시멘트 및 급결제의 등가알칼리 함유량 ($Na_2O + 0.658K_2O$)은 표 1과 같다. 여기에서 주목해야 할 점은 알칼리-실리카 반응을 방지하기 위한 ASTM의 등가알칼리 함유량이 0.6%로 규정되어 있다는 사실이다⁹⁾. 하지만 표 1에서 알 수 있듯이 국내산 1종 시멘트의 경우 가장 적은 알칼리를 함유하고 있는 것을 선택했음에도 불구하고 이미 이 규정을 초과하고 있었으며 알루미늄이트계 및 시멘트 광물계 급결제의 경우 상대적으로 많은 양의 알칼리를 함유하고 있음을 알 수 있다.

3.2 시험 방법

알칼리-실리카 반응성 판정을 위한 팽창 시험은 ASTM C 1260 촉진 모르타르 붕 시험 규정에 따라 실시

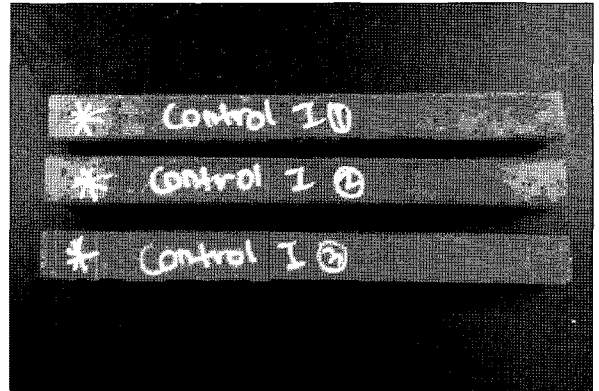


그림 3. 모르타르 붕 시험 샘플

표 2. 각 배합의 명칭

구분	명칭
급결제를 혼입하지 않은 배합	Control
알루미늄이트계 급결제	AM
시멘트 광물계 급결제	CM
알칼리프리계 급결제	AF

하였다. 물/시멘트 비는 0.47, 시멘트와 골재의 비는 1 : 2.25로 25 × 25 × 285 mm 크기의 시편을 제작하였으며 길이변화 측정을 위해 시편의 양 끝에는 그림 3과 같이 스티드를 설치하였다. 시편은 제작 후 대기 중에 23℃로 24시간 양생한 뒤 탈형하여 초기길이를 측정하고 다시 24시간 동안 80±2℃로 수중 양생을 실시하였다. 24시간 후 수중 양생된 시편을 꺼내어 영점 길이를 측정하였으며 1N NaOH 용액에 넣어 80±1℃를 유지하며 3, 6, 9, 12, 14, 21, 28일 동안 길이 변화를 측정하였다. 각 배합의 명칭은 표 2와 같다.

4. 시험 결과

4.1 팽창 시험 결과

ASTM C 1260 규정에 의하면 영점길이를 측정할 날로

부터 14일 후 시편의 팽창률이 0.1% 미만일 경우 알칼리-실리카 반응에 무해한 것으로, 0.1 ~ 0.2%이면 알칼리-실리카 반응 가능성이 있는 것으로, 그리고 0.2% 이상이면 유해한 팽창을 하는 것으로 판정한다.

그림 4는 비반응성 골재를 사용하였을 때 28일 동안 시편의 팽창을 관찰한 결과이다. 그 결과 14일 후 모든 배합의 팽창률이 0.1% 미만으로 알칼리-실리카 반응에 무해한 것으로 밝혀졌다. 이는 28일 후에도 마찬가지로 나타났다. 이로써 비반응성 골재를 사용하였을 경우 급결제 혼입 여부에 상관없이 알칼리-실리카 반응에 무해한 것

으로 밝혀졌다.

반응성 골재를 사용하였을 때 시편의 팽창을 관찰한 결과는 그림 5와 같다. 그 결과 14일 후 모든 배합의 팽창률이 0.1%를 초과하여 알칼리-실리카 반응 가능성을 나타내었으며 28일 후에는 Control을 제외한 모든 시편의 팽창률이 0.2%를 초과하여 유해한 팽창을 하는 것으로 밝혀졌다. 팽창의 크기는 시간이 흐름에 따라 Control, 알칼리프리계, 시멘트 광물계, 알루미늄에이트계 급결제 모두 증가하였다. 이처럼 14일 이후에도 팽창이 지속되는 것으로 보아 반응성 골재를 사용하였을 경우에는 장기적인 관찰이 필요할 것으로 생각된다.

4.2 표면 분석 결과

알칼리-실리카 반응이 시편의 표면에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 편광 현미경 분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

비반응성 골재를 사용한 경우에는 수화작용으로 인해 모난 형태를 띠고 있던 골재가 침식되어 둥글게 변하기는 하였으나 반응생성물이나 균열 등과 같은 현상은 발견되지 않았다. 이는 비반응성 골재를 사용하였을 때 알칼리-실리카 반응이 발생하지 않았다는 앞의 팽창 시험 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

하지만 반응성 골재를 사용한 경우에는 그림 6과 같이 전형적인 알칼리-실리카 반응의 모습을 관찰할 수 있었다. 골재는 수화작용에 의해 침식되어 둥글게 변해갔으며 주변에는 백색의 반응 생성물이 나타났다. 또한 골재 주변에는 검은색 반응환이 형성되었으며 균열 및 공극 내부에서는 백색의 투명한 겔 형태의 반응 생성물이 관찰되었다. 이러한 반응 생성물은 팽창하여 골재와 시멘트 페이스트의 경계 및 공극을 중심으로 균열이 형성되었다. 이처럼 반응 생성물, 반응환, 균열 등 전형적인 알칼리-실리카 반응의 모습이 발견되어 반응성 골재를 사용하였을 때 알칼리-실리카 반응이 발생하였다는 앞의 팽창 시험 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

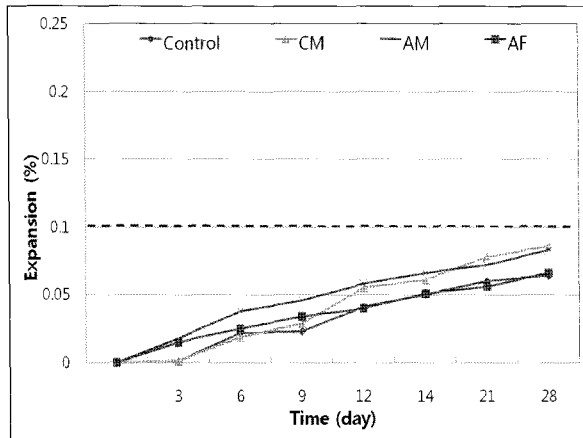


그림 4. 비반응성 골재를 사용한 시편의 팽창률

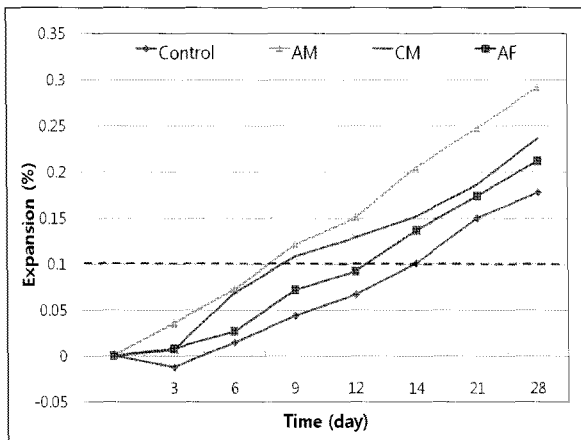
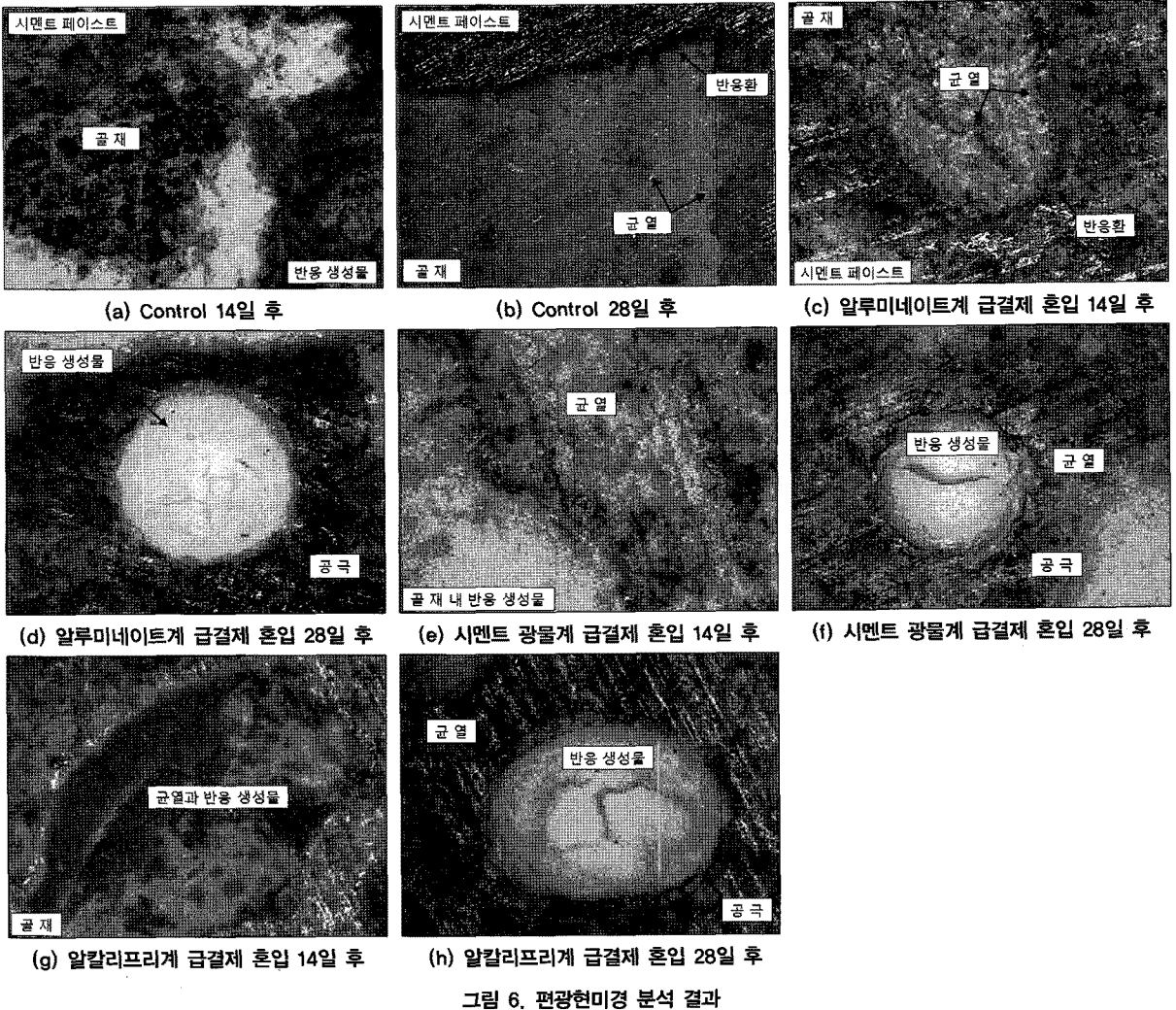


그림 5. 반응성 골재를 사용한 시편의 팽창률



5. 맺음말

본 시험은 숏크리트용 급결제(알칼리프리기계, 시멘트 광물계, 알루미늄네이트계)가 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실시하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 비반응성 골재를 사용한 경우 14일 팽창률이 모두 0.1%

미만으로 알칼리-실리카 반응에 무해한 것으로 밝혀졌다. 따라서 숏크리트 배합에 앞서 비반응성 골재를 사용할 경우에는 알칼리-실리카 반응에 대한 문제는 발생하지 않을 것으로 보인다.

(2) 반응성 골재를 사용한 경우 14일 팽창률이 모두 0.1%를 초과하여 급결제와는 상관없이 알칼리-실리카 반응이 발생하는 것으로 나타났으며 팽창률은 시간이 흐름에 따라 증가하였다. 따라서 반응성 골재를 사용

할 경우에는 반응을 저감시킬 수 있는 다른 대안이 필요할 것으로 생각된다.

- (3) 시편의 표면을 편광 현미경으로 분석한 결과 비반응성 골재를 사용한 경우에는 눈에 띄는 변화는 관찰할 수 없었다. 하지만 반응성 골재를 사용한 경우에는 반응 생성물, 반응환, 균열 등 전형적인 알칼리-실리카 반응의 형태가 나타남으로써 알칼리-실리카 반응이 발생하였다는 팽창 시험 결과를 확인할 수 있었다.

결론적으로 슛크리트용 골재를 사용하기 전에 반응성 유무를 검사하여 반응이 없는 골재를 사용한다면 급결제 종류에 상관없이 알칼리-실리카 반응에 대한 염려는 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 원종필, 성상경, 박해군, 이명섭, C12A7계 광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 내구특성, 대한토목학회 논문집, 제 25권 제 3C호, 2005, pp. 235-240.
2. Patrice Rivard, Gérard Ballivy, Clemon Gravel, Francois Saint-Pierre, Monitoring of an hydraulic structure affected by ASR: A case study, Cement and Concrete Research, Vol. 40, Issue 4, 2010, pp. 676-680.
3. Moses Karakouzian, Mehmet N. Okuyan, Nick Hudyma, Alkali-silica reaction - possible cause of map cracking in gunite, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 17, Issue 3, 2003, pp. 118-125.
4. K. E. Kurtis, P.J. M. Monteiro, Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control, Journal of Materials Science, Vol. 33, 2003, pp. 2027-2036.
5. Donald A. St John, A. B. Poole and I. Sims, Concrete petrography - A handbook of investigative techniques, ARNOLD, 1998, pp. 289-290.
6. Lyndon D. Mitchell, James J. Beaudoin, Patrick Grattan-Bellew, The effects of lithium hydroxide solution on alkali-silica reaction gels created with opal, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 641-649.
7. M. A. Bérubé, J. Duchesne, J. F. Dorion, M. Rivest, Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali silica reactivity, Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 1215-1227.
8. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트공학, 사단법인 한국콘크리트학회, 2007, pp. 400-403.
9. ASTM C 150 / C 150M - 09 Standard Specification for Portland Cement.