

쇄석골재의 알칼리-실리카 반응에 관한 실험적 연구

(제3보 : 무해골재 치환량 및 포졸란물질이 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향)

An Experimental Study on the Alkali-Silica Reaction of Crushed Stones (Part 3 : The Influence of the Innocuous Aggregate Content and Pozzolanic Materials to the Alkali-Silica Reaction)

이 양 수* 정 재 동** 노 재 호* 조 일 호*** 윤 재 환**** 이 영 수*****
Lee, Yang Soo Jaung, Jae Dong Noh, Jae Ho Cho, Il Ho Yoon, Jai Hwan Lee, Young Su

ABSTRACT

Recently, the use of crushed stones is increased due to the shortage of natural aggregates. In the previous papers of part 1 and 2, we got the conclusions that some of crushed stones have the characteristic of alkali-silica reaction(ASR). And these reactions are influenced by the amount and type of alkali in cement.

The purpose of this paper is how to prepare for the prevention against alkali-silica reaction. As a solution of problems, We have conducted the experiments of two methods. One was the replacement of innocuous aggregates instead of reactive aggregates, the other was the addition of various pozzolanic materials.

As a result, We found that the expansion by alkali-silica reaction in mortar bar could be effectively decreased by upper methods .

1. 서론

콘크리트 구조물의 내구력을 저하시키는 요인으로는 반응성골재의 사용에 따른 알칼리-골재 반응, 탄산가스의 침입에 의한 중성화, 염분의 작용에 의한 철근부식 및 동결융해작용 등 다양하며 이들 요인들의 작용에 의해 콘크리트구조물이 장기적으로 균열 및 누수, 심한 경우에는 구조물의 붕괴로 나타나기도 한다.

특히 최근 강자갈, 강모래등 천연골재의 고갈로 쇄석의 사용이 증가함에 따라 알칼리-골재반응에 의한 피해의 예가 세계 각지에서 보고되고 있어 국내에 있어서도 대책이 마련되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에 앞서 발표된 바 있는 제 1¹⁾, 2²⁾보에서, 국내의 일부 쇄석 골재가 특정 조건하에서 알칼리-실리카 반응성이 있음을 광물학적 방법, 화학법 및 모르타르바법 등을 통하여 확인하였고, 이들 반응성 골재를 대상으로 알칼리량 및 알칼리 종류가 알칼리-실리카반응성에 미치는 영향에 관하여 보고한 바 있다. 또한, 시멘트, 혼화제 및 혼합수 등으로 부터 유입되는 알칼리는 콘크리트 내의 수분의 이동에 따라 부분적으로 농축될 가능성이 있어, 콘크리트내에 전체적인 알칼리량이 적더라도 반응성 골재의 존재하에서는 앞서 보고된 바와 같은 조건이 되어 반응이 일어날 수도 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 알칼리-실리카 반응의 억제를 위하여 유해골재를 무해골재로 치환 첨가하는 방법과 시멘트에 포졸란 물질을 혼합하는 방법에 대한 실험을 실시하였다.

* 단체회원, 동양중앙연구소, 주임연구원

** 정회원, 同, 연구실장, 工博

*** 단체회원, 同, 연구원

**** 정회원, 수원대학교 부교수, 工博

***** 정회원, 수원대학교, 석사과정

◆ 본 연구는 동양중앙연구소와 수원대학교가 공동연구한 결과의 일부임.

2. 실험개요

본 연구에서는 전보에서 알칼리-실리카 반응

성이 확인된 골재를 대상으로 반응을 억제하기 위하여 반응성 골재 대신 무해골재(주문진 표준사)를 치환 첨가하거나 시멘트에 포졸란 활성을 갖고 있는 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흙등을 첨가하여 ASTM C 227(모르타바법)의 실험방법에 준하여 실험적 연구를 실시 하였다.

2.1 실험재료

본 연구에서는 제 1보에서 알칼리-실리카 반응에 대해 유해하다고 판정된 골재 B를 사용하였으며 시멘트는 자체 알칼리량 0.74%의 T사 제품으로 그 화학분석 결과는 표 1과 같다. 또한 혼합재로서 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흙의 물리, 화학적 특성을 표 2에 각각 나타내었다. 이때 플라이애쉬와 고로슬래그의 분말도는 Blaine 시험값이고 실리카흙의 분말도는 BET에 의한 측정값이다.

표 1. 시멘트의 화학성분

(단위:wt%)

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	In Sol.	Ig loss
21.43	3.04	6.07	63.67	2.47	2.3	0.08	0.99	0.13	0.75

표 2. 혼합재의 물리 및 화학적 특성

항 목	플라이애쉬	슬래그	실리카흙	
화	SiO ₂	59.90	36.13	93.48
	CaO	1.75	41.14	0.51
	Fe ₂ O ₃	4.59	0.94	2.89
학	Al ₂ O ₃	27.94	14.11	0.01
	MgO	1.08	6.91	1.08
성	SO ₃	-	0.09	-
	Na ₂ O	2.58	0.29	0.35
	K ₂ O	0.70	0.49	0.96
	Ig. loss	4.82	0.01	2.15
물리적 특성	비 중	2.17	2.92	2.24
	분말도 (cm ² /g)	2,613	6,080	180,200

2.2 실험방법

알칼리-실리카반응에 미치는 무해골재 및 포졸란효과의 판정은 ASTM C 227(모르타바법)에 준하여 실시하였으며, 이때의 배합조건을 표 3에 나타내었다. 각 조건마다 1×1×1¼ inch.의 모르타바를 세개씩 제작하여 40℃, RH>95%의 조건을 만족하는 밀폐저장용기에 저장하여 2주마다 모르타바의 길이를 측정하여 길이 변화율을 계산하였다. 또한 등가 알칼리량은 시멘트

자체에 있는 등가 알칼리량(0.74%)을 제외한 나머지 알칼리를 NaOH로 첨가하였다.

표 3 배합조건

항 목	분 류	시리즈 I	시리즈 II
골 재		B*	
무해골재 치환율		0, 20, 40, 60, 80, 100%	-
포졸란 물질 치환율	플라이 애쉬		0, 10, 20, 30, 40%
	고로 슬래그		0, 30, 40, 50%
	실리카 흙		0, 10%
W/C		0.5	
A/C		2.25	
첨가 알칼리		NaOH	
Na ₂ O eq.		1.2%	1.6%

* 제 1보 참조

** 무해골재는 주문진 표준사임.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 무해골재 치환량의 영향

반응성골재를 무해골재로 치환함에 따라 반응성 성분의 절대량 감소에 따른 길이 팽창을 저하를 예상할 수 있으며, 이를 그림 1에서 확인할 수 있었다.

알칼리량 1.2%에서 반응성골재만을 사용한 모르타바의 길이 팽창율은 3개월과 6개월에서

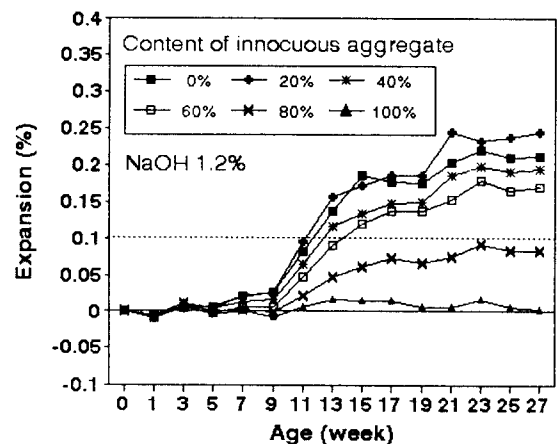


그림1. 무해골재의 치환첨가량을 달리한 모르타바의 재령에 따른 길이팽창율

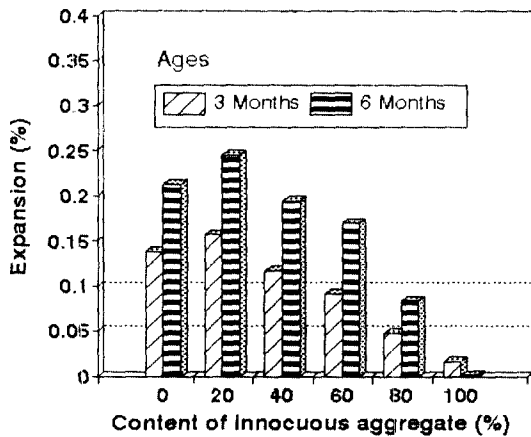


그림 2. 무해골재 치환첨가량에 따른 3개월과 6개월에서의 길이팽창율

각각 0.1%와 0.2%이상으로 나타났고 이 반응성 골재대신 무해골재를 치환하여 3개월과 6개월에서 각각 0.05%와 0.1% 이하의 팽창율로 되는 무해골재 치환량은, 본 실험조건하에서, 80% 이상이어야 함을 알 수 있었다. 그림 2는 재령 3개월과 6개월에서 무해골재 치환율에 따른 길이 팽창율을 나타낸 것으로서 무해골재 치환율이 20%일 때가 가장 높은 팽창율을 보이고 있다. 무해골재에 반응성골재를 치환첨가한 경우 어느 첨가량에서 최대의 팽창량을 나타내는데, 이때의 첨가량을 Pessimum량이라 하여 尹, 岸谷³⁾ 등은 최대의 팽창량을 나타내는 critical alkali-silica ratio (알칼리량/반응성골재량)가 존재한다고 보고한 바 있다. 또한 이 비는 반응성골재의 종류, 모르타의 배합, 시멘트의 알칼리량 등에 따라 변화한다는 것이다. 또한 池崎浩三⁴⁾ 등은 이러한 pessimum량이 무해골재의 반응성(특히 알칼리 농도 감소량(R_c))에 따라서도 달리 나타난다고 보고하였다.

따라서 본 실험에 사용된 골재의 Pessimum값은 무해골재로 주문진 표준사를 20% 정도 치환 첨가하였을 때 나타나지만 반응성골재 및 무해골재가 달라질 경우에는 다른 값을 가질 수 있다고 사료된다. 이러한 Pessimum량이 생기는 현상은 시멘트의 수산화 알칼리와 반응성 골재의 실리카 성분이 반응하는 양은 정해져 있으므로 그 이상과 이하에서는 서로 상반된 작용 때문에 팽창량이 적게 나타나 적정조건, 즉 Pessimum량이 존재하는 것으로 생각된다. 따라서 유해골재의 반응성 억제를 위하여 무해골재를 치환첨가

하는 경우, 원래의 반응성을 증가시키는 역작용을 일으킬 수도 있으므로 충분한 실험을 통하여 검토해야 할 것으로 판단된다.

3.2 포졸란 물질 첨가의 영향

알칼리-실리카 반응에 의한 이상 팽창을 억제 시키기 위한 방안의 하나로 포졸란 물질을 첨가하는 방법이 있다. 포졸란 물질이란 자체적으로는 물과 반응하지 않지만 시멘트와 혼합하여 물과 반응 시키면 시멘트 중의 수산화 칼슘 등과 반응하여 시멘트 수화물과 비슷한 조성의 수화물을 생성하는 성질을 가진 물질을 말한다.

본 연구에서는 화력발전소에서 부산되는 플라이애쉬, 제철공장에서 부산되는 고로슬래그, 그리고 실리콘 제조공장에서 집진된 실리카흄 등을 시멘트에 치환 첨가하여 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창을 억제하고자 하였다. 우선 플라이애쉬를 첨가한 경우를 그림 3과 4에 나타내었다. 플라이애쉬의 첨가율이 증가할수록 모르타 바의 길이 증가율이 저하하는 것을 볼 수 있다. 특히 플라이애쉬 20% 이상 첨가시 그 경향은 현저하였고 3개월에서 0.05%, 6개월에서 0.1% 이하의 팽창율을 나타내어 알칼리-실리카 반응이 억제되고 있음을 알 수 있었다. 이와같이 반응이 억제되는 이유는 시멘트의 일부가 포졸란 물질로 치환되어 알칼리량이 감소되었고 시멘트 수화시 발생하는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)의 소비에 의한 수산이온(OH^-)농도의 감소 뿐만 아니라 장기적으로는 플라이애쉬의 수화로 인한 조직의 치밀화 때문(경화체 내의 공극수의 감소로 인한 반응억제)인 것으로 사료된다.

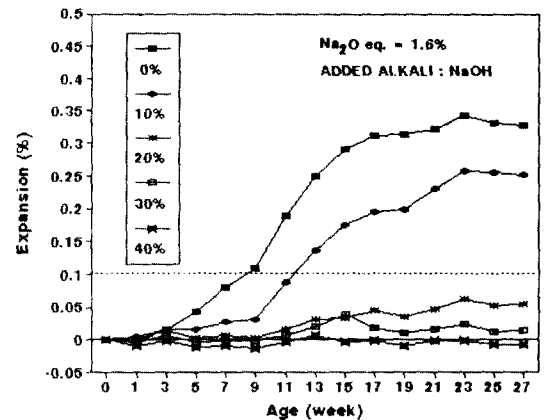


그림 3. 플라이애쉬첨가 모르타바의 재령에 따른 길이 팽창율

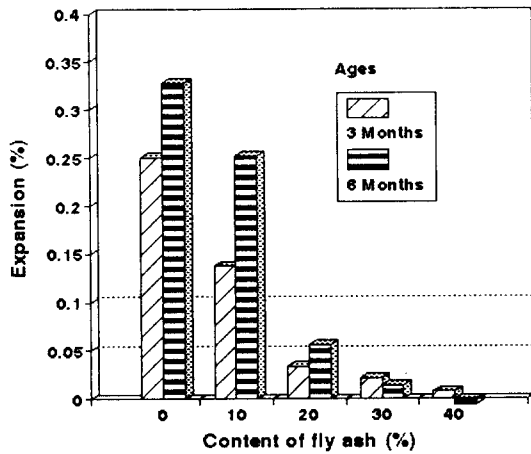


그림. 4 플라이애쉬의 첨가량에 따른 재령 3개월과 6개월에서의 길이 팽창율

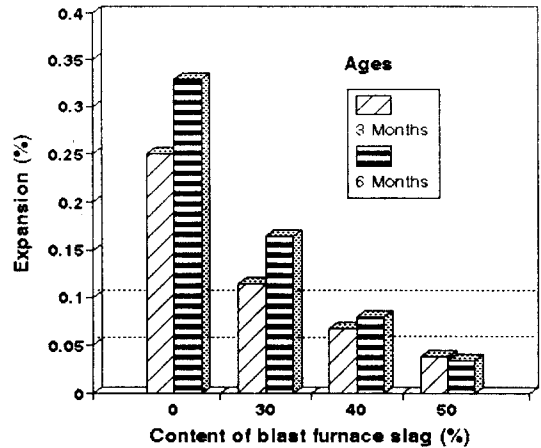


그림. 6 고로슬래그 첨가량에 따른 재령 3개월과 6개월에서의 길이 팽창율

고로슬래그 미분말(그림 5, 6)과 실리카흙(그림 6, 7) 첨가의 경우, 각각 40%와 10% 이상 첨가시 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창이 충분히 억제 됨을 볼 수 있었다. 슬래그와 실리카흙의 반응성 억제 기구는 앞의 플라이애쉬와 같이 설명할 수 있으나 두 포졸란 물질이 미분말이라는 점 때문에 시멘트 중의 골재사이의 공간을 메꾸어 (filler effect) 공극중의 공극수가 감소하게 되고, 이것은 알칼리-실리카 반응에 없어서는 안될 수분의 감소를 의미하게 되므로 알칼리-실리카 반응성 억제에 효과적이라고 생각된다. 그러나 이러한 포졸란 물질의 첨가로 알칼리-실리카 반응성을 억제시키는 데는 효과가 있었으나 모르터나 콘크리트 물성에 미치는 영

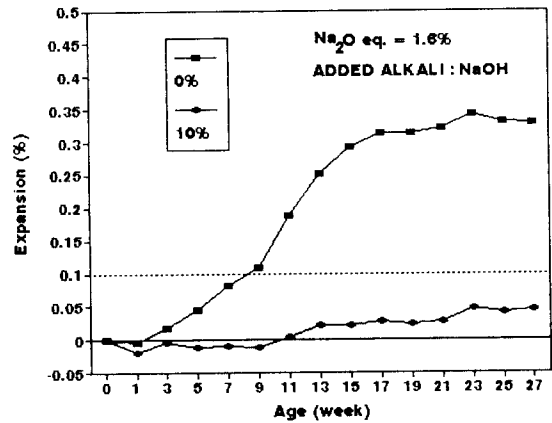


그림. 7 실리카흙첨가 모르터바의 재령에 따른 길이 팽창율

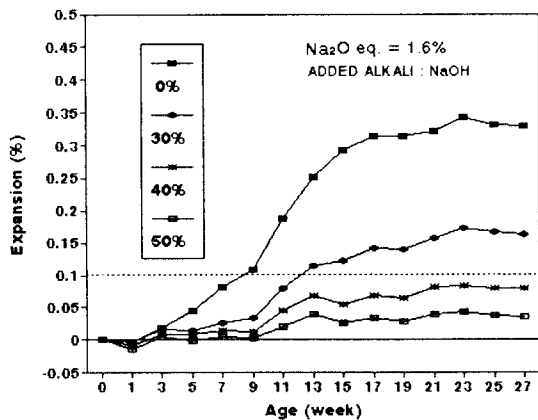


그림. 5 고로슬래그첨가 모르터바의 재령에 따른 길이 팽창율

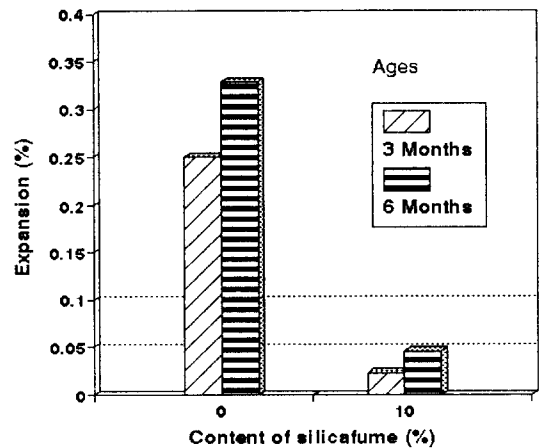


그림. 8 실리카흙 첨가량에 따른 재령 3개월과 6개월에서의 길이 팽창율

항 및 경제성도 함께 고려하여 첨가량을 결정하여야 할 것이다.

알칼리-골재 반응의 방지책의 기본은 알칼리 함유량이 적은 시멘트와 반응성 실리카 성분이 없는 골재를 사용하는 것이고, 이러한 재료의 사용이 어려울 경우 반응성 억제에 효과가 있는 포졸란 물질의 첨가가 바람직할 것으로 사료된다. 이웃 일본에 있어서는 알칼리 골재 반응이 사회적으로 문제가 된 바 있고 알칼리 골재반응 억제에 대해서 JIS A 5308과 建設省 通達에 규정하여 1987년 부터 시행하고 있다.⁵⁾ 여기에 제시된 억제 방법은 ① 모르타바법과 화학법을 실시한 결과 무해로 인정되는 골재의 사용 ② 저 알칼리형 시멘트(Low Alkali Portland Cement)의 사용 ③ 고로시멘트(B 또는 C종)의 사용 ④ 콘크리트 중의 알칼리 총량이 3.0 kg/m³ 이하 ⑤ 알칼리-실리카반응과 염해의 우려가 있는 경우는, 도장(塗裝) 등의 조치를 취하는 것 등이다.

4. 결론

알칼리-실리카 반응을 억제시키기 위하여 첨가한 무해골재와 포졸란 물질이 모르타바의 팽창에 미치는 영향에 관한 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반응성골재 대신 무해골재의 치환 첨가량이 증가할수록 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창이 억제 되었고, 치환첨가량 80% 이상에서 6개월간 팽창량이 0.1% 이하로 되었다.
- 2) 본 실험에 사용된 반응성 골재가 최대팽창량을 나타내는 Pessimum 량은 80% 였다.
- 3) 시멘트 대신 포졸란 물질의 첨가량이 증가할수록 알칼리-실리카에 의한 모르타바의 팽창이

감소하였고 본 연구의 범위내에서는 플라이애쉬 20%, 고로슬래그 40%, 실리카흄 10% 이상에서 기준(6개월간 길이팽창율 0.1% 이하)을 만족하였다.

4) 국내에서는 아직까지 알칼리-실리카 반응에 의한 심한 피해에는 보고된 바 없지만, 천연골재의 고갈로, 채석의 사용량이 증가하는 경향에 따라 알칼리-실리카 반응이 발생할 가능성이 높기 때문에 국내 채석 골재의 특성에 맞는 억제 대책이 다각적이고 구체적으로 마련되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 윤재환 외4, "채석골재의 알칼리-실리카 반응에 관한 실험적 연구 (제1보 : 반응성 골재의 판정과 골재혼입율이 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향)", 한국콘크리트학회학술발표논문집, 제5권 2호, 1993
- 2) 윤재환 외5, "채석골재의 알칼리-실리카 반응에 관한 실험적 연구 (제2보 : 첨가 알칼리량 및 종류가 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향)", 한국콘크리트학회학술발표논문집, 제5권 2호, 1993.
- 3) 尹在煥, 岸谷孝一, "유리질사방휘석 안산암의 알칼리-실리카 반응성", 대한건축학회학술발표논문집, 5권2호, 435, 1985.
- 4) 池崎浩三, 山田 優, "骨材のアルカリ反應試驗におけるモルタルバ-法と化學法の關係", 骨材資源, 通卷 No. 77, 10~17, 1988.
- 5) 船戶己知雄, 田代利明, 콘크리트의耐久性と化學의基礎, 세멘트新聞社, 171, 172, 1992.