

碎石骨材의 알칼리-실리카反應에 關한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Alkali-Silica Reaction of Crushed Stones

윤재환* 정재동** 이영수***
Yoon, Jai Hwan Jaung, Jae Dong Lee, Young Su

요 약

국내에서는 아직 알칼리-골재 반응으로 인한 피해가 보고되지는 않았지만, 해사와 쇄석의 사용이 증가하고 있어 이에 대한 연구가 시급히 진행되어야 할 것으로 사료되어, 화학법(KS F 2545, ASTM C 289)과 모르터바법(KS F 2546, ASTM C 227)을 중심으로 실험을 행하여 국내산 쇄석 1종과 국외산 쇄석 1종이 유해로 판정되었으며, 첨가알칼리량 및 종류를 달리하여 실시한 모르터바법 시험결과 첨가 알칼리로 NaCl사용시 가장 높은 팽창을 하였다. 또한, 모르터바의 표면 및 내부의 반응생성물을 SEM에 의한 관찰과 EDXA에 의한 성분분석을 실시하여 알칼리와 실리카성분으로 이루어진 알칼리 실리케이트 겔이 판명되어 국내에서 알칼리 반응성을 나타내는 골재의 존재가 처음으로 확인되었다.

Abstract

This study was performed to investigate the Alkali-Silica Reaction(ASR) of crushed stones using chemical analysis, polarization microscope, XRD, chemical method(KS F 2545, ASTM C 289), mortar-bar method(KS F 2546, ASTM C 227) and Scanning Electron Microscope(SEM) and Energy Dispersive X-ray Analysis(EDXA) of reaction products by ASR in the mortar bars and to investigate the influence on alkali content and kind of added alkali to the ASR.

Test results show that one kind of domestic crushed stone is estimated as deleterious by ASTM chemical method and mortar bar method, and reaction product is proved as alkali silicate gel by EDXA.

Keyword : Alkali-Aggregate Reaction(AAR), Alkali-Silica Reaction(ASR), aggregate content, alkali content, kind of added alkali, reactive aggregate, reaction products

1. 서 론

1940년 미국의 T. E. Stanton에 의해 처음 보고⁽¹⁾된 알칼리-골재 반응이라 하는 것은 콘크리트의 세공용액등에 존재하는 OH⁻이온과 골재의 어느

특정 성분과의 반응으로 인해 발생하는 것으로서 크게 알칼리-실리카 반응, 알칼리-탄산염암 반응, 알칼리-실리케이트 반응으로 구분하나 알칼리-실리카 반응을 제외한 반응들은 일부 특정 지역의 골재에 의한 반응으로서, 일반적으로 알칼리-골재 반응이라 함은 알칼리-실리카 반응을 가

* 정회원, 수원대학교 건축공학과, 부교수, 공박
** 정회원, 동양중앙연구소, 2차제품연구소장, 공박
*** 정회원, 수원대학교 대학원 출, 공학석사

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1994년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

리킨다. 주로 천연골재의 고갈로 채석을 사용하게 된 이후 발생한 알칼리-실리카 반응은 비결정질의 실리카를 함유한 특정골재와 시멘트의 알칼리 금속이온(Na^+ , K^+)이 수분의 존재하에서 반응하여 알칼리-실리카겔이 형성되는 반응을 일으키거나 심한 경우에는 콘크리트 구조물을 붕괴시키기도 한다.^(2,3) 채석의 사용이 증가하고 있는 국내^(4,5)에서도 알칼리-골재 반응에 대한 연구가 시급히 진행되어야 할 것으로 사료되어 본 연구를 실시하였다.

본 연구는 채석골재의 알칼리-실리카 반응에 관한 연구로서 광물학적, 화학적 및 물리적 시험 방법들로 실험적 연구를 실시하였다.

2. 실험개요

본 연구는 채석골재의 알칼리-실리카 반응성 판정을 위해 세계적으로 널리 사용되고 국내에서도 이미 규격화 된 화학법 및 모르타르바법을 중심으로 실험을 행하였으며, 모르타르바의 표면 및 내부의 반응생성물을 SEM(Scanning Electron Microscope)에 의한 관찰과 EDXA (Energy Dispersive X-ray Analysis)에 의한 성분분석을 하여 알칼리-실리카 반응성 판정에 신중을 기하였다. 모르타르바법은 알칼리-골재 반응성 판정 실험(series 1)과 알칼리-골재반응에 미치는 첨가 알칼리량 및 종류의 영향(series 2)으로 구분하였다.

2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 채석골재는 국내산 화성암계 3종(A, B, C)과 국외산 화성암계 2종(D, E)으로 하였으며, 시멘트는 보통포틀랜드시멘트로서 사체 알칼리량이 등가알칼리량(Na_2O eq. $=\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)으로써 0.553%($\text{Na}_2\text{O}=0.04$, $\text{K}_2\text{O}=0.78$) 및 0.724%($\text{Na}_2\text{O}=0.076$, $\text{K}_2\text{O}=0.985$)를 함유한 T사 제품을 사용하였다. Table 1에 본 실험에서 사용된 채석골재의 물리적성질을 나타내었다.

Table 1 The physical characteristics of aggregate

type of aggregate	specific gravity	absorption (%)
A	2.59	0.90
B	2.67	2.86
C	2.70	2.47
D	2.54	2.48
E	2.58	1.85

2.2 시험방법

각 골재에 대해 다음과 같은 시험방법을 적용하여 실험을 실시하였다.

(1) 광물학적 분석 : 화학분석(원자흡광분석 및 습식전분석), 분말XRD분석, 편광현미경(골재를 얇은 박편으로 제작하여 관찰)에 의한 관찰.

(2) 화학적 시험방법 : 골재의 알칼리 잠재 반응 시험방법(화학법)(KS F 2545, ASTM C 289).

0.15~0.3mm의 채석골재를 1N의 NaOH-용액과 반응시켜 HCl에 의한 적정으로 알칼리농도 감소량(Rc)을 측정하고, 중량법으로 용해실리카량(Sc)을 측정.

(3) 물리적 시험방법 : 시멘트와 골재의 배합에 따른 알칼리 잠재반응 시험방법(모르타르바법)(KS F 2546, ASTM C 227).

Table 2 Experimental conditions of mortar bar test(series 1)

type of aggregate	A,B,C	D,E	
W/C	0.4	0.6	
A/C*	0.75	2.0	
agg. content (%)**	30,50,100	25.0	19.2
Na ₂ O eq.(%)	2.0	1.0	
added alkali	NaOH		

Table 3 Experimental conditions of mortar bar test (series 2)

type of aggregate	B		C	
W/C	0.5			
A/C*	2.25			
agg. content (%)**	100			
added alkali and Na ₂ O eq.(%)	NaOH	0.8,1.2, 1.6,2.0	NaOH	1.2
	KOH	0.8,1.2, 1.6		1.6
	NaCl	0.8,1.2, 1.6		2.0

* aggregate ratio by cement weight

** used aggregate percentage in total aggregate content

series 1은 Table 2에 나타낸 바와 같이 국내산 골재의 경우 알칼리-골재 반응을 촉진하기 위하여 가혹한 조건으로 배합을 하였으며, 국외산 골재의 경우 同種의 골재로 실험하여 발표된 국외논문을 참고로 pessimum량과 critical alkali-silica ratio로 배합을 정하여 알칼리-골재 반응성 판정 실험을 하였다. Table 3의 series 2에서 사용된 골재는 광물학적 분석, 화학법 및 series 1의 실험결과 국내산 골재 중 알칼리-실리카 반응이 발생할 가능성이 높은 B골재와 C골재로서, 이 중 B골재의 경우, series 1결과에서 B골재로 제작된 모르타바가 가장 높은 팽창율을 나타내어 등가알칼리량 및 종류에 따른 모르타바의 팽창변화에 관한 실험을 하였으며, C골재의 경우, series 1의 결과 모르타바의 팽창율이 미소한 관계로 등가알칼리량만 변화를 주어 실험을 하였다.

Table 2와 Table 3의 배합조건으로 2.54×2.54×28.58cm의 모르타바를 제작하여 40℃, RH>95%의 밀폐저장용기에 저장하였으며, 모르타바의 길이팽창율은 2주마다 길이를 측정하여 계산하였다. 모르타바제작시 사용되는 골재의 입도를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Grading requirements

sieve size (mm)		weight %
passing	retained on	
4.75	2.36	10
2.36	1.18	25
1.18	0.60	25
0.60	0.30	25
0.30	0.15	15

(4) 알칼리-실리카 반응의 암석학적 시험방법 : 반응생성물의 SEM에 의한 관찰 및 EDXA에 의한 분석.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 광물학적 분석결과

3.1.1 화학분석

각 골재의 화학분석을 Table 5에 나타내었다.

국외산 골재가 SiO₂를 60%이상 함유하고 있어 화성암중에서 中性岩에 속하고 있으며, 국내산 골재는 SiO₂가 52%이하에 속하는 鹽基性岩임을 나타내고 있다. 특히 B골재의 경우 다른 골재보다 Fe₂O₃ 및 MgO의 함량이 높게 나타났다. 이는 다음 편광현미경에 의한 골재의 분석에서 감람석(4 [(Mg, Fe²⁺)₂ · SiO₄])이 관찰되어 이로 인한 것으로 판단된다.

3.1.2 XRD분석

각 골재의 XRD분석을 Fig.1과 Table.6에 나타내었다.

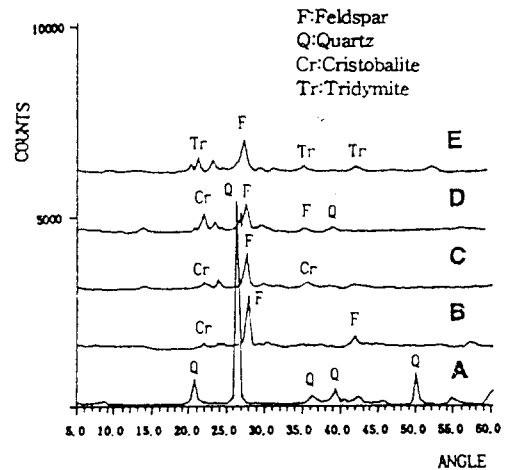


Fig.1 Result of XRD analysis of aggregates

Table 5 Chemical compositions of aggregates

(unit : wt.%)

comp. agg.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
A	50.92	19.76	13.74	7.33	4.18	-	1.43	0.13
B	53.62	11.58	15.87	8.09	6.55	0.13	0.57	2.30
C	50.94	19.42	13.43	6.82	3.82	0.11	1.75	3.04
D	64.86	17.90	5.80	5.05	1.64	0.31	0.06	0.13
E	68.60	16.50	2.65	2.03	1.09	0.39	0.10	0.13

Table 6 Result of XRD analysis of aggregates

agg. mineral	A	B	C	D	E
Quartz	●	-	-	◎	-
Tridymite	-	-	-	-	○
Cristobalite	-	○	○	◎	-
Feldspar	-	●	◎	◎	◎

note : ● 1000 cps upper

○ 500 ~ 100 cps

◎ 1000 ~ 500 cps

- not detectable

A골재는 석영이 주성분을 이루고 있었으며, B, C 및 D골재에서는 알칼리-실리카 반응성 광물인 Cristobalite가 검출되었다. 그리고 E골재에서는 다른 골재에서는 검출되지 않은 Tridymite라고 하는 반응성 광물이 검출되어 A골재를 제외한 B~E골재가 알칼리-실리카 반응을 발생시킬 가능성이 높게 나타났다.

3.1.3 편광현미경에 의한 골재의 관찰

각 골재의 편광현미경에 의한 분석을 Photo 1~Photo 5에 나타내었다.



Photo 1 Polished section of aggregate A



Photo 2 Polished section of aggregate B

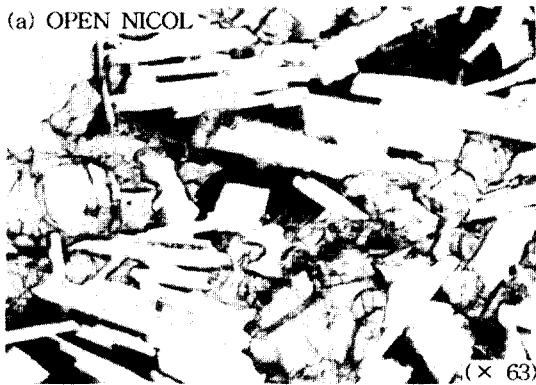


Photo 3 Polished section of aggregate C

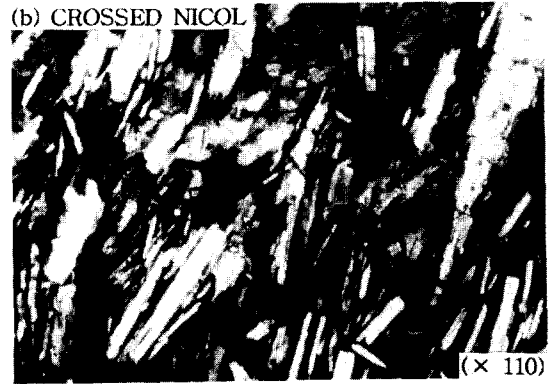
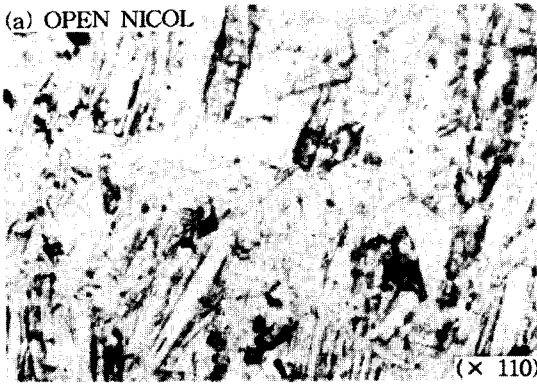


Photo 4 Polished section of aggregate D

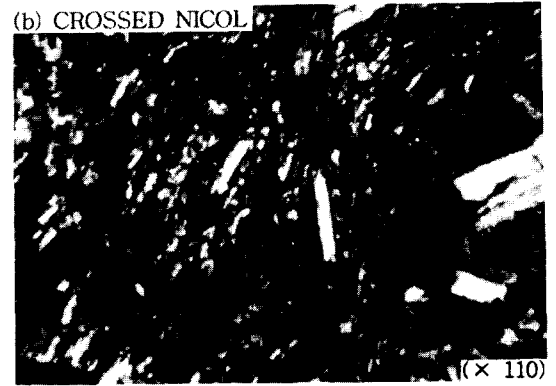


Photo 5 Polished section of aggregate E

A골재는 석영이 주성분을 이루고 있으며, B골재 및 C골재는 비정질의 화산Glass 속에 장석(Feldspar : $8[WZ_4O_8]$, W : K, Na, Ca, Ba, Z : Si, Al, Al/Si = $1/3 \sim 1$), 감람석(Olivine : $4[(Mg, Fe^{2+})_2 SiO_4]$) 등이 散在되어 있는 斑狀組織임을 알 수 있다.

D골재는 班晶으로서 장석을 함유한 반면, 石基는 細粒, 流狀構造의 長石, 輝石, 單斜紫蘇輝石, 감람석 및 이들의 사이에 火山Glass를 볼 수 있었으며, 또한, 石基에 非顯晶質로 있는 Cristobalite가 존재하는 것을 알 수 있었다.

E골재는 班晶에 있어서 장석, 휘석을 함유하고, 石基에 있어서는 반경의 細粒광물들을 실리카 광물이 메우고 있었으며, 또한, 분홍색의 균질이 낮은 細粒인 Tridymite가 관찰되었다.

3.2 화학법

각 골재의 화학법 시험결과를 Fig.2에 나타내었다.

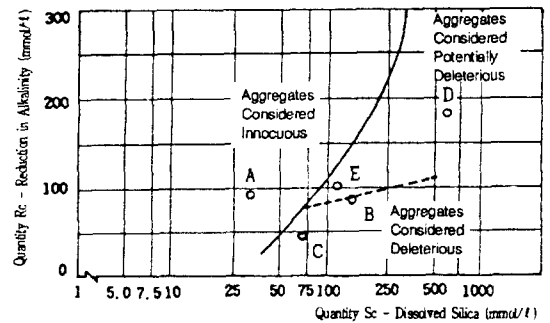


Fig. 2 Potential reactivity of aggregates by chemical method (ASTM C 289)

XRD의 결과와 마찬가지로 A골재를 제외한 나머지 골재들은 잠재적유해 또는 유해로 판정되어 알칼리-실리카 반응성이 높은 것으로 나타났다.

3.3 모르터바법

3.3.1 series 1

모르터바법에 의한 골재의 알칼리-골재 반응성 판정시험결과와 골재의 혼입율이 모르터바의 팽창에 미치는 영향에 관한 기초적 실험결과를 Fig.3에 나타내었다.

A골재의 경우 화학법과 마찬가지로 무해로 판정되었다. B골재의 경우 골재혼입율 30%, 50% 및 100% 모두 6개월(26주) 이내에 길이팽창을 0.1%를 넘어 알칼리-실리카 반응성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 C골재 중 골재혼입율 100%의 경우는 모르터바법 유해판정 기준인 3개월에 팽창을 0.05%를 넘었으나, 6개월에 0.1% 미만의

팽창을 보임으로 화학법 결과와는 달리 무해로 판정된다. B골재로 제작된 모르터바의 팽창률 결과를 보면 골재의 혼입률이 증가할 수록 팽창이 증가함을 볼 수 있다. D골재와 E골재의 결과를 보면 D골재의 경우 유해로 판정되나 E골재는 C골재의 골재혼입율 100%의 경우와 마찬가지로 무해로 판정된다.

3.3.2 series 2

1) 등가알칼리량의 영향

등가알칼리량에 따른 모르터바의 팽창변화를 Fig.4와 Fig.5에 나타내었다.

B골재로 제작된 NaOH첨가 모르터바(이하 NaOH로 표기), KOH첨가 모르터바(이하 KOH로 표기) 및 NaCl첨가 모르터바(이하 NaCl로 표기)는 Na_2O eq. = 0.8 ~ 2.0% 모두 6개월이전에 0.1%이상 팽창을 하여 유해로 판정을 할 수 있다. 그러나 C골재로 제작된 모르터바의 경우 Na_2O

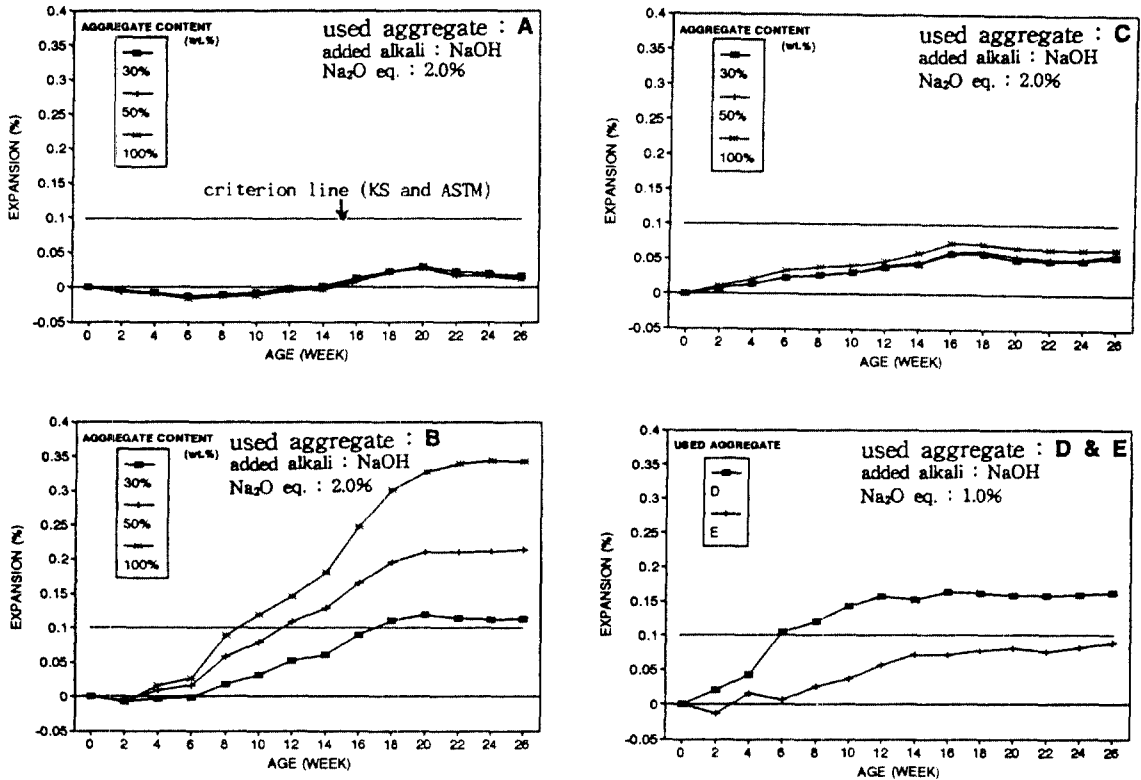


Fig.3 Length change of mortar bar (series 1)

eq.가 증가할 수록 팽창이 증가하나 그 양이 미소하고 6개월에 0.1%미만의 팽창을 보임으로 1차 실험결과와 마찬가지로 무해로 판정된다.

Fig.4에서 NaOH, KOH 및 NaCl의 경우 critical Na_2O eq.를 구하려 했으나 Na_2O eq.=0.8%에서도 6개월에 0.1%이상의 길이팽창을 했으므로 그 정확한 값은 알 수가 없다. 그러나 자체의 Na_2O eq.가 높은 시멘트의 사용으로도 알칼리-실리카 반응으로 인한 이상팽창이 발생할 가능성이 높을 것으로 사료된다.

또한 Fig.5에서 낮은 알칼리량에서는 서서히 팽창하여 반응속도가 느리게 나타나나 3개월(13주) 이후, 6개월까지도 계속 팽창량이 증가함을 알 수 있다. 그러나 알칼리량이 많아지면 반응속도가 빨라 초기에 높은 팽창량을 보이거나 약 5개월(21주) 이후는 팽창이 거의 멈춘상태를 나타낸다.

B골재를 함유한 모르타바의 팽창에 비해 C골재를 함유한 모르타바의 팽창이 적은 이유는, Fig.2의 ASTM C 289(화학법)에 따른 시험결과, 용해 실리카(Sc)의 양을 B골재에 비해 C골재가 적게 함유하고 있으므로 나타난 결과라고 추정된다.

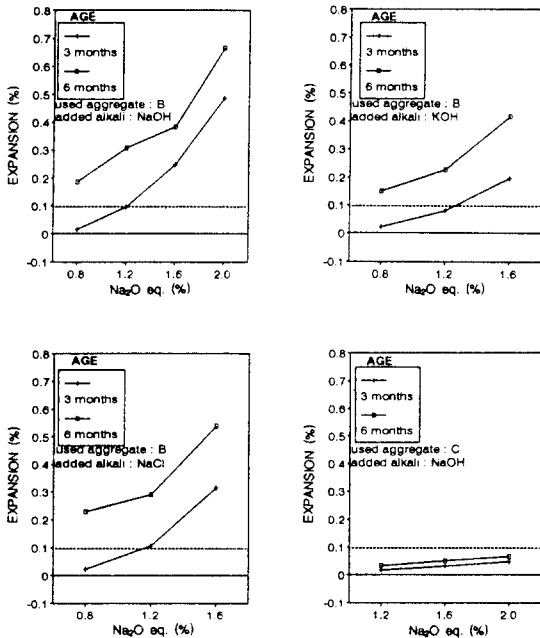


Fig.4 The influence of kind of added alkali and alkali content on mortar bar expansion

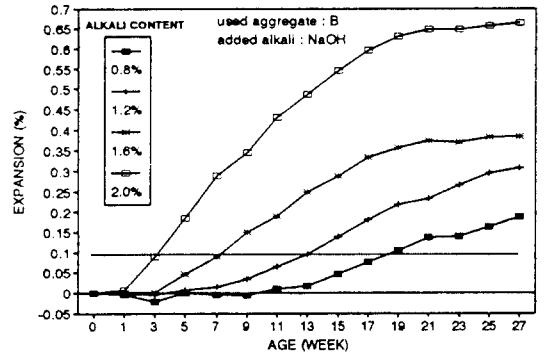
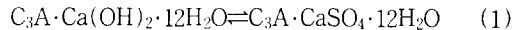


Fig.5 The influence of alkali content on mortar bar expansion

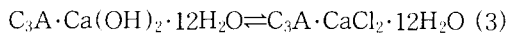
2) 첨가알칼리의 영향

등가알칼리량을 조정하기 위해 첨가되는 알칼리의 종류가 모르타바의 팽창에 미치는 영향에 대한 실험결과를 Fig.6에 나타내었다.

같은 Na_2O eq.일 경우 대체적으로 NaCl이 NaOH나 KOH보다 팽창량이 많음을 볼 수 있다. 여기에 대한 이론으로서 가장 유력한 것은 CaSO_4 와 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 함유한 C_3A 의 시멘트페이스트의 수화과정에 있어서 다음 식(1)에 따라 mono sulphate와 $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 가 반응하여 고용체를 생성한다는 것이다.



따라서 NaCl이 첨가되면 Cl^- 이온이 고정화되고 OH^- 이온이 증가하는 다음과 같은 이온치환반응에 의한 것으로 추론된다. 다시 말하면 Cl^- 이온은 고정화 되고 Na^+ 이온은 고정화되지 않아 다음 식(2)에 따라 CaCl_2 이 생성되고 식(1)에서와 마찬가지로 CaCl_2 이 다음 식(3)에 나타낸 것처럼 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 이온치환에 의해 부염인 Freidel鹽을 생성함으로써 인해 OH^- 이온이 증가되어 알칼리-실리카 반응을 촉진시키는 것으로 고려된다. (6, 7, 8)



Na_2O eq.=1.6%에서 NaCl이 NaOH나 KOH보

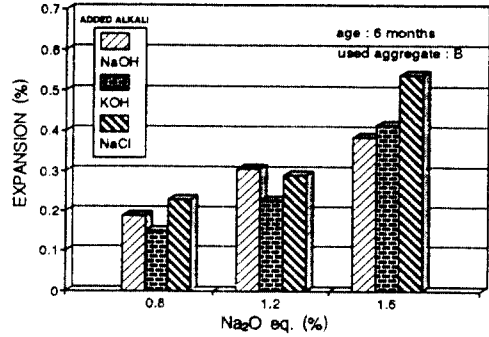
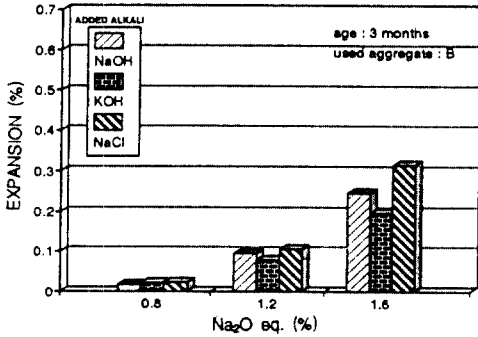


Fig. 6 The influence of kind of added alkali on mortar bar expansion

다 높은 팽창을 보이고 있으며, NaOH와 KOH를 비교하여 보면 재령 3개월에서 KOH보다 NaOH가 더 많은 팽창을 보이고 있으나, 그 이후 KOH가 급속한 팽창을 하여 재령 6개월에서 NaOH보다 KOH가 높은 팽창을 보이고 있다. 재령 3개월의 Na₂O eq. = 1.2%에서는 NaOH가 NaCl에 비해 적은 팽창을 보이나 재령 6개월에서는 NaOH가 NaCl보다 조금 높게 팽창했음을 알 수 있다.

3.4 반응생성물의 SEM관찰 및 EDXA

모르타마 1차실험에서 B골재 및 D골재로 제작된 모르타바중 가장 높은 팽창을 보인 모르타바를 절단하여 건조시킨 후 SEM에 의해 관찰한 결과 Photo 6~7에 보이는 반응생성물이 관찰되어, 그 성분을 분석한 결과 알칼리금속이온(Na⁺, K⁺)과 실리카가 검출됨으로서 알칼리-실리카 반응에



Photo. 7 Scanning electron micrograph and energy-dispersive spectrum of reaction product within mortar bars made with the D aggregate

의한 반응생성물 즉, alkali-silicate gel임을 알 수 있다.

Photo 6은 2차반응생성물(spongy gel)로서 Photo 7에서와 같은 1차반응생성물(massive gel)이 변형된 것이다.

Photo 8은 모르타마 2차실험에서 모르타마(KOH)의 표면에 나타난 균열로서 無筋콘크리트에서 나타나는 전형적인 지도모양의 균열 즉, Map crack을 나타내고 있다.

Photo 9~11은 B골재를 함유한 모르타바중에서 각 첨가알칼리별로 가장 높은 팽창을 보인 모르타바의 표면으로 검출되거나 내부의 세공으로 스며든 반응생성물을 SEM촬영한 것이다. 이 반응생성물을 분석한 결과 NaOH와 NaCl에서 관찰된 반응생성물은 Na⁺, Si⁴⁺, K⁺ 및 Ca²⁺이 검출되었으나 KOH에서 관찰된 반응생성물에서는 Na⁺은 검출되지 않고 Si⁴⁺, K⁺ 및 Ca²⁺이 검출되어 첨

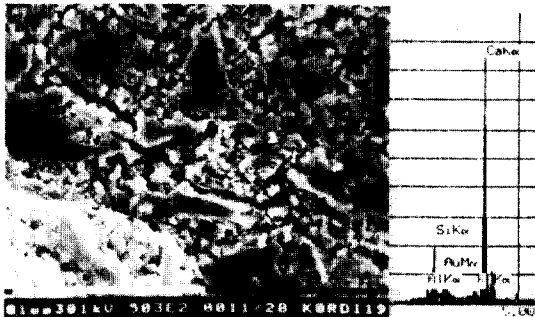


Photo. 6 Scanning electron micrograph and energy-dispersive spectrum of reaction product within mortar bars made with the B aggregate

가 알칼리에 따라 그 성분이 달리 나타남을 알 수 있다. 그러나 앞에서와 마찬가지로 알칼리 금속이온과 실리카가 검출됨으로써 알칼리-실리카 반응에 의한 반응생성물임을 알 수 있다.

Photo 9는 2차반응생성물인 spongy gel을 나타내고 Photo 10과 Photo 11은 1차반응생성물인 massive gel을 나타내고 있다.

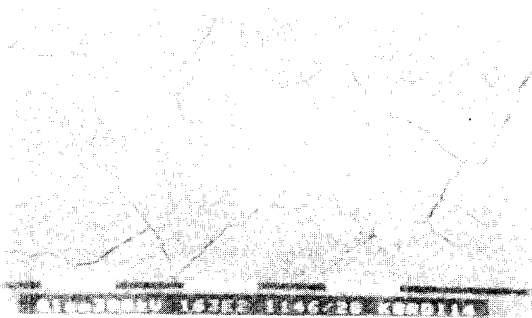


Photo.8 Crack of mortar bar surface (KOH)

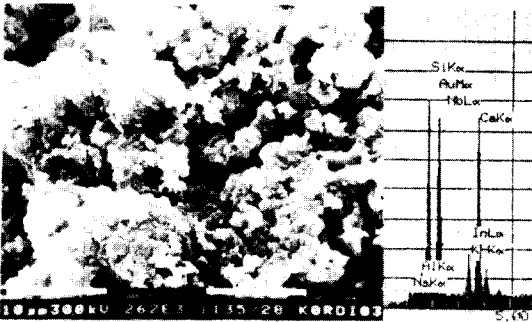


Photo.9 Scanning electron micrograph and energy-dispersive spectrum of reaction product within mortar bars (NaOH)

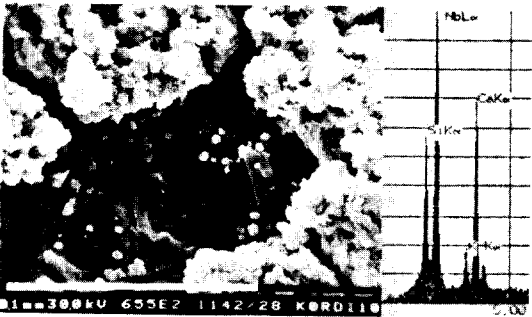


Photo. 10 Scanning electron micrograph and energy-dispersive spectrum of reaction product within mortar bars (KOH)



Photo. 11 Scanning electron micrograph and energy-dispersive spectrum of reaction product within mortar bars (NaCl)

4. 결 론

국내산 화성암계 쇄석골재 3종과 국외산 화성암계 쇄석골재 2종에 대하여 알칼리-골재 반응성 시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) A골재를 제외한 B, C, D 및 E골재가 광물학적 시험결과 알칼리-골재 반응성 광물(Tridymite 또는 Christobalite)을 함유하고 있었으며, 화학분석시험결과에서도 유해 또는 잠재적 유해로 나타났다. 그러나 모르터바법 시험결과 국내산 B골재와 국외산 D골재가 유해한 팽창을 나타내었다.

2) 알칼리-골재 반응에 미치는 첨가알칼리량 및 종류의 영향에 관한 실험결과 알칼리량이 증가할수록 팽창율도 증가하였다. 또한, NaCl을 첨가하여 제작된 모르터바가 NaOH나 KOH가 첨가된 모르터바보다 높은 팽창율을 나타냈다.

3) 모르터바 실험에서 B골재 및 D골재로 제작된 모르터바의 표면 및 내부의 세공으로 스며든 반응생성물을 SEM 관찰한 결과 1차 및 2차 반응생성물이 관찰되었으며, 그 반응생성물을 EDXA에 의해 성분분석한 결과 알칼리 금속이온(Na^+ , K^+)과 실리카가 검출되어 알칼리-실리카 반응에 의한 반응생성물, 즉 알칼리-실리카이트 겔임을 알 수 있었다.

4) 알칼리-실리카 반응성 골재로 판명된 B골재를 굵은 골재로 사용하고 염분을 함유하고 있는 해사를 잔골재로 사용할 경우 알칼리-실리카 반응으로 인한 이상팽창이 발생할 가능성이 높을 것

으로 사료되어, 앞으로 국내에서도 알칼리-골재 반응에 관한 연구가 활발히 진행되어 이에 대한 대책을 강구해야 되겠다.

참 고 문 헌

1. T. E. Stanton, "Influence of Cement and Aggregate on Concrete Expansion", Engineering News Record, 1940
2. T. C. Powers, H. H. Steinour, "An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction, Part 1-The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion", Journal of The ACI, Feb. 1955
3. D. W. Hobbs, "Expansion of concrete due to alkali-silica reaction : an explanation", Magazine of Concrete Research, Vol.30, No. 105, Dec. 1978
4. 尹在煥, "전국의 콘크리트용 골재에 관한 실태조사결과", 레미콘誌, 통권제12호, 1987
5. 최민수 외1, "시멘트, 골재의 수급현황 및 유통구조", 콘크리트학회지, 제5권 3호, 1993
6. 米澤敏男 외2, "セメント水和物によるモルタル細孔溶液中のCl⁻ 固定のメカニズム", 콘크리트工學年次論文報告集 10-2, 1988, pp475~480.
7. T. Yonezawa, V. Ashworth, R.P.M. Procter, "The Mechanism of Fixing Cl⁻ by Cement Hydrates Resulting in the Transformation of NaCl to NaOH", 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989, pp153~160.
8. 二村誠二 外1, "鹽素イオンがアルカリ反應に及ぼす影響", 콘크리트工學年次論文報告集 12-1, 1990, pp789~794.
9. 朝倉悅郎 外2, "アルカリ骨材反應におけるナトリウムとカリウムの膨脹效果", セメント技術年報, No.40, 1986, pp312~315.
10. 川村滿紀 外2, "外部から供給される鹽化ナトリウムのアルカリ シリカ反應に及ぼす影響", セメント技術年報, No.42, 1988, pp327~330.
11. 森野奎二, "アルカリ骨材反應と反應生成物の顯微鏡觀察", セメント技術年報, No.38, 1984, pp114~117.
12. 森野奎二, "アルカリ反應性骨材の岩石學的考察" 第6回 콘크리트工學年次講演會論文集, pp241-24
13. A. Shayan and G.Quik. "Microstructure and Composition of AAR products in Conventional standard and new accelerated testing," Proceedings of 8th international conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989. pp 475-482.

(접수일자 : 1993. 12. 30)