

환경조건이 알칼리-실리카 반응에 의한 모르타르 봉 길이 팽창에 미치는 영향

Effect of Environmental Conditions on Expansion of Mortar-bar by Alkali-Silica Reaction

김성권	Kim, Seong Kwon	정회원 · 강원대학교 토목공학과 박사수료 (E-mail: kimskwon@kangwon.ac.kr)
윤경구	Yun, Kyong Ku	정회원 · 강원대학교 토목공학과 교수 (E-mail: kkyun@kangwon.ac.kr)
홍승호	Hong, Seung Ho	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구전략실 포장팀 책임연구원 (E-mail: hsh373@ex.co.kr)
강문식	Kang, Moon Sik	정회원 · 한국도로공사 설계처 녹색환경팀 팀장 (E-mail: kms5453@hanmail.net)

ABSTRACT

The possibility of ASR(alkali-silica reaction) for coarse aggregates had known to be low up to recently in Korea. But the distress of ASR was identified and reported by ASTM C 1260 test. The purpose of this paper was to identify the effect of environmental conditions on length expansion of mortar-bar by alkali-silica reaction with KS F 2546 and ASTM C 1260 test. The results of this study were as following; The result of KS F 2546 test for five kinds of aggregates shows that all of them are non-reactive. But that of ASTM C 1260 test shows that all of aggregates except Andesite-2 are over possible reactive because of environmental condition such as external alkali ion by 1N NaOH, high temperature and humidity. The result of variety of NaOH concentration on ASTM C 1260 using Siltstone indicates that length expansion rate increases highly as NaOH concentration increases. And, comparison results of KS F 2546 for Siltstone with that of 0.00N NaOH experiment indicates that length expansion rate increases as temperature and humidity increases.

KEYWORDS

alkali-silica reaction, mortar-bar test, environmental condition, KS F 2546 test, ASTM C 1260 test

요지

국내에서는 콘크리트 포장용 굵은 골재를 대상으로 화학적인 시험방법과 모르타르 봉 시험방법을 이용한 결과 알칼리-실리카 반응 유해 가능성이 낮은 것으로 알려져 왔으나, 최근에 알칼리-실리카 반응에 의한 파손이 발생되었고, ASTM C 1260을 이용한 결과 일부 골재에서 유해한 팽창이 발생된다고 보고되었다. 따라서 본 논문에서는 모르타르 봉 시험방법인 KS F 2546과 ASTM C 1260을 이용하여 길이 팽창 유도기간의 환경조건이 알칼리-실리카 팽창 반응 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. KS F 2546의 경우 대상 골재 모두 반응성 없음으로 판정되었으나 ASTM C 1260에서는 일부 골재에서 잠재 반응성 이상으로 판정되었다. 이는 외부로부터의 알칼리 이온의 공급, 온도 및 습도 차이에 의하여 발생한 것으로 판단된다. 또한 ASTM C 1260에서 NaOH의 농도변화 실험을 통하여 NaOH의 농도가 증가할수록 길이팽창이 현저하게 증가한다는 것을 확인하였으며, 온도 및 습도가 증가함에 따라 길이팽창이 증가한다는 것을 확인하였다.

핵심용어

알칼리-실리카 반응성, 모르타르 봉 시험방법, 환경조건, KS F 2546 시험방법, ASTM C 1260 시험방법

1. 서론

알칼리-실리카 반응성을 판정하는 방법에는 압중의 판단, 알칼리 함유량 분석, 팽창량 실험, 겔의 확인 등과 같

이 골재를 대상으로 하는 방법과 시멘트-골재 혼합물을 이용하는 방법 그리고 반응성 겔의 확인 방법으로 구분되어진다(김성수 외, 2010; Chang-Seon Shon, 2009).

화학적인 방법은 골재에 포함되어 있는 유해성분 분석을 통하여 평가하고 팽창량 실험은 시멘트-골재 혼합물을 이용하여 일정 기간 동안의 길이 팽창률을 측정하여 평가하는 것으로 한 가지의 방법만으로 알칼리-실리카 반응성을 판정하지 말고 두 가지 이상의 방법을 병행하여 판정하도록 권장하고 있다.

일부 연구기관에서 화학적인 시험방법과 모르타르 붕 시험방법을 이용하여 알칼리-실리카 반응성에 대한 연구 결과 화학적인 방법에서 일부 골재가 반응성이 있는 것으로 나타났으나 모르타르 붕 시험방법에서는 유해 가능성이 낮은 것으로 보고되었고 KS F 2546 모르타르 붕 시험방법에서는 KS F 2545 화학적인 시험방법에서 유해하다고 판정된 골재에서도 모르타르 붕 방법에서 무해하다고 판정된 경우에는 후자를 우선하는 것이 좋다고 언급하고 있어 그 동안 국내 골재의 알칼리-실리카 반응 유해 가능성이 낮은 것으로 보고되었으며 골재의 품질도 양호한 것으로 알려져왔다(강원대학교, 2008; 농어촌연구소, 1994; 삼표산업, 1997; 윤경우 외, 2008; 홍승호, 2006; KS F 2546, 2002). 그러나 국내에서도 2000년대에 들어와 알칼리-실리카 반응에 의한 망상형 균열 및 스폴링 등의 심각한 균열이 발생되어 그 피해사례가 보고되었으며 국내 골재를 대상으로 ASTM C 1260 촉진 모르타르 붕 시험방법을 수행한 결과 일부 골재에서 유

해한 팽창이 발생된다고 보고되었다(강원대학교, 2008; 윤경우 외, 2008; 홍승호, 2006).

따라서 골재 자체를 대상으로 한 평가보다는 시멘트-골재 혼합물을 대상으로 알칼리-실리카 반응성을 평가하는 것이 바람직하다고 판단되므로 본 논문에서는 국내 콘크리트 포장용 굵은 골재를 대상으로 모르타르 붕을 이용하는 시험방법을 활용하여 길이 팽창 유도기간의 환경조건이 알칼리-실리카 팽창 반응 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 개요

국내 콘크리트 포장용 굵은 골재의 알칼리-실리카 반응성을 판정하기 위하여 보령 폐석산에서 골재 샘플 5종을 채취하였으며, 모르타르 붕 시험을 이용하는 KS F 2546(모르타르 붕 시험방법)과 ASTM C 1260(촉진 모르타르 붕 시험방법)을 활용하였다(KS F 2546, 2002; ASTM C 1260, 2002).

2.2. 실험재료

2.2.1. 시멘트

시멘트는 국내 S사에서 생산되어 판매되는 1종 보통

표 1. Physical Properties of cement

Type	Time of Setting(h:m)		Compressive strength(MPa)			Blain (cm ² /g)	Autoclave expansion (%)	lg. loss (%)	Specific gravity
	initial	final	3-day	7-day	28day				
OPC	260	7:00	30	42	58	3,400	0.02	1.02	3.15

표 2. Chemical compositions of cement

Composition	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	Na ₂ Oeq(%)		TiO ₂ (%)
							K ₂ O	Na ₂ O	
OPC	21.54	5.60	3.38	62.59	2.70	1.96	0.74		-
							1.05	0.05	

표 3. Lithological properties of coarse aggregates

CompositionType	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	total(wt.%)
실트암 (Siltstone)	60.48	19.61	0.85	7.83	0.05	1.76	0.38	0.82	3.79	0.15	3.64	99.34
미암 (Mudstone)	54.66	22.77	0.69	9.51	0.05	1.52	0.41	0.37	4.95	0.26	4.17	99.36
규장질유리질응회암 (Felsic vitric tuff)	73.04	14.30	0.16	1.76	0.03	0.72	0.72	0.72	0.73	5.07	0.05	99.67
안산암-1 (Andesite-1)	69.35	15.37	0.33	2.00	0.03	0.88	2.01	4.04	4.05	0.08	1.18	99.33
안산암-2 (Andesite-2)	54.32	16.80	1.17	8.16	0.21	3.15	4.26	5.24	1.01	0.47	5.20	99.98

포틀랜드 시멘트 제품으로서 등가 알칼리 함량이 0.74%인 고알칼리 시멘트를 사용하였다. 표 1과 표 2는 시멘트의 물리적인 특성과 화학적인 특성을 나타낸 것이다.

2.2.2. 골재

골재는 알칼리-실리카 반응에 의한 대규모 파손이 발생한 서해안 고속도로 콘크리트 포장 구간 근처에 위치한 충남 보령의 폐석산에서 5종을 샘플링하여 사용하였다. 사용된 골재의 암석학적인 분석 결과는 표 3과 같다.

2.3. 시험방법

2.3.1. KS F 2546 모르타르 봉 시험방법

KS F 2546에 의한 알칼리-골재 반응성의 판정은 공시체 3개의 평균 팽창률이 시편 제작 후 6개월 이후 0.1% 미만이면 “반응성이 없음”으로 판정하고 0.1% 이상이면 “반응성이 있음”으로 판정한다. 다만, 3개월에서 0.05% 이상의 팽창을 보인 경우에는 그 시점에서 “반응성이 있음”으로 판정할 수 있다. 그러나 3개월에 0.05% 미만의 것은 그 시점에서 “반응성이 없음”으로 판정하지 말고, 6개월까지 시험을 지속한 후 알칼리-골재 반응성을 판정해야 한다.

몰드의 규격은 KS L 5107의 3.3(틀)에 규정하는 25.4×25.4×254mm를 사용한다. 시편 저장은 용기 내의 온도가 38.0±2.0℃를 유지하도록 규정하고 있다. 시멘트는 KS L 5201에 규정하는 포틀랜드 시멘트로서 등가 알칼리 함량이 0.6% 이상이고, 0.85mm체를 통과하는 것을 사용한다.

모르타르의 배합은 질량비로써 시멘트 1, 물 0.47, 절건 상태의 잔골재 2.25로 한다. 1회 혼합하는 시멘트, 잔골재 및 물의 양은 표 4와 같으며, 잔골재의 입도분포는 표 5와 같다.

시험 공시체의 초기 저장 및 측정은 각 몰드가 채워진 후 몰드는 습윤실에 바로 옮겨 놓고 24±2시간 후 공시체가 건조되지 않도록 주의하면서, 공시체에 번호 및 측정 시의 상하와 방향을 기록하여 탈형한다. 모든 측정값은 0.002mm까지 측정하고 기록한다. 연속적인 저장 및 측정은 공시체가 저장 용기의 수면과 떨어진 위쪽에 있도록 하여야 하며, 수면과 접촉해서는 안 된다. 38±2℃의 온도로 유지된 저장실 내에 12일간 용기를 밀봉하여 두어야 한다. 재령 14일이 되면, 저장실에서 저장 용기와 내용물을 꺼낸 후 그 길이를 측정한다. 용기를 열고 재령 14일 계측을 하기 전에 최소 16시간 동안 20

표 4. Mortar mixture design for KS F 2546 test

Type	Content
Water	141±1mL
Cement	300±1g
Fine aggregate(Absolute dried)	675±1g

표 5. Grading requirement for KS F 2546 test

Sieve size(mm)		Mass(%)
Passing	Retained on	
5	2.5	10
2.5	1.2	25
1.2	0.6	25
0.6	0.3	25
0.3	0.15	15

±3℃로 저장 용기와 내용물의 온도를 유지시켜야 한다. 재령 14일의 시험을 한 후, 38±2℃ 저장 상태로 공시체를 환원시키고, 후에 추가로 측정하여 추가 자료를 얻을 수 있다. 재령 1개월, 2개월, 3개월, 4개월, 5개월, 6개월, 9개월과 12개월 그리고 필요하다면 최소한 6개월마다 측정해야 한다.

2.3.2. ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험방법

ASTM C 1260 시험방법은 시편 제작 후 16일 후 길이 변화를 측정하여 0.1~0.2% 이면 알칼리-실리카 반응의 잠재성이 있는 것으로 판정하고, 0.2% 이상이면 알칼리-실리카 반응성이 있는 것으로 판정하고 있다.

시험에 사용되는 모르타르 봉의 배합은 시멘트 440g, 혼합골재 990g 및 물 206.8g이다. 배합에 사용된 물-시멘트 비는 47%이며 잔골재의 입도분포는 표 6과 같다. 모르타르 봉은 25.4×25.4×285mm 규격으로 3개/조로 제작하였다. 모르타르 봉의 양 끝단에는 길이 변화 측정을 위한 스티드를 설치한다.

표 6. Grading requirement for ASTM C 1260 test

Sieve Size(mm)		Mass(%)
Passing	Retained on	
4.75(No.4)	2.36(No.8)	10
2.36(No.8)	1.18(No.16)	25
1.18(No.16)	0.6(No.30)	25
0.6(No.30)	0.3(No.50)	25
0.3(No.50)	0.15(No.100)	15

모르타르 봉 제작은 몰드에 모르타르를 타설한 후 23℃가 유지되는 항온·항습기에서 몰드 상태로 24시간 동안

양생한다. 1일 양생된 모르타르는 몰드에서 시편을 분리하여 모르타르의 길이를 0.002mm까지 측정한다. 모르타르 붓의 양 끝단에 설치된 스톱트까지의 길이를 그림 1과 같이 다이얼게이지가 설치된 길이변화 측정기로 습윤 양생 전 길이를 측정한다.

초기 측정이 완료된 시편은 폴리프로필렌 밀폐 용기에 시편이 완전히 잠기도록 증류수를 채워 밀폐 시킨 후 80℃가 유지되는 항온기에서 24시간 수중 양생을 하였다. 24시간 경과 후 수중 양생된 시편은 영점 길이 변화 측정을 위하여 밀폐 용기에서 꺼낸 후 물기를 제거하고 초기 길이 변화를 15초 이내에 측정 완료한다.

초기 길이 변화를 측정된 모르타르 붓 시편은 1N NaOH 수용액이 담겨 있는 밀폐용기에 수침시켜 80℃가 유지되는 항온수조에서 길이 변화를 유도한다. 영점 길이 변화 측정 후 모르타르 붓 시편의 길이 변화를 7, 14 및 28일에 측정하였으며, 모르타르 붓의 변화상태 및 균열 발생 여부를 육안으로 관찰한다.

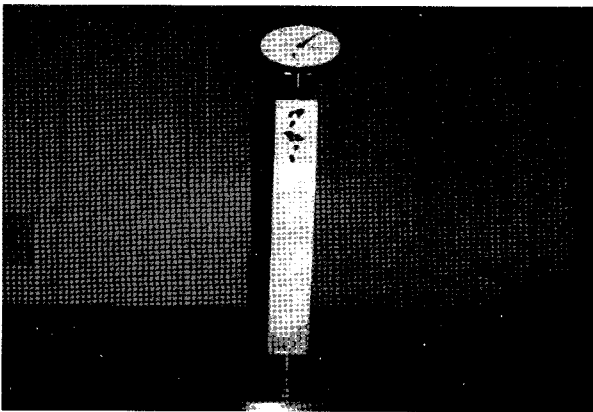


그림 1. Comparator length reading

3. 실험결과 및 고찰

3.1. KS F 2546 시험결과 및 고찰

국내 콘크리트용 굵은 골재 5종에 대한 KS F 2546 모르타르 붓 시험방법을 이용한 알칼리-실리카 반응성 평가 결과는 표 7과 같다.

재령 90일까지의 길이 팽창 측정 결과 5종 골재 모두 0.05% 미만으로 측정되었으며, 재령 180일에서도 5종 골재 모두 0.1% 미만으로 측정되어 “반응성 없음”으로 판정되었다. 일부 시편에서는 재령에 따라 모르타르 붓의 길이가 줄어들어 수축하는 현상을 보이고 있으며 이는 건조수축에 의한 영향으로 판단되어진다.

표 7. Expansion result for types of aggregates by Ks F 2546 test

Types of Agg.	Percent Expansion						
	0-d	14-d	28-d	56-d	90-d	120-d	180-d
Siltstone	0.000	0.011	0.014	0.018	0.007	0.009	0.011
Mudstone	0.000	0.004	0.004	0.011	0.004	0.010	0.011
Felsic vitric tuff	0.000	0.007	0.014	0.014	-0.014	0.007	0.004
Andesite-1	0.000	-0.002	0.000	0.007	-0.018	0.002	0.011
Andesite-2	0.000	0.002	-0.002	0.000	-0.028	-0.009	-0.025

3.2. ASTM C 1260 시험결과 및 고찰

국내 콘크리트용 굵은 골재 5종에 대한 ASTM C 1260 촉진 모르타르 붓 시험방법을 이용한 알칼리-실리카 반응성 평가 결과는 표 8과 같다.

표 8. Expansion result for types of aggregates by ASTM C 1260 test

Types of Agg.	Percent Expansion			
	0-day	7-day	14-day	28-day
Siltstone	0.000	0.350	0.425	0.568
Mudstone	0.000	0.158	0.227	0.359
Felsic vitric tuff	0.000	0.072	0.147	0.292
Andesite-1	0.000	0.072	0.149	0.311
Andesite-2	0.000	0.028	0.045	0.084

재령 14일(시편 제작 후 16일)의 알칼리-실리카 반응에 의한 길이 팽창 측정 결과 실트암과 이암의 경우 각각 0.425%와 0.227%로 측정되어 “반응성 있음”으로 판정되었으며, 규장질유리질응회암과 안산암-1의 경우에는 각각 0.147%와 0.149%로 측정되어 “잠재 반응성”으로 판정되었으나, 안산암-2의 경우에는 0.045%로 측정되어 “반응성 없음”으로 판정되었다. 또한, 추가적으로 재령 28일의 길이 팽창 측정 결과 규장질유리질응회암과 안산암-1의 경우에는 재령 14일 길이 팽창 측정 결과 “잠재 반응성”으로 판정되었던 골재가 각각 0.292%와 0.311%로 측정되었으며, 최대 실트암의 경우 0.568%, 최소 안산암-2의 경우 0.084%로 측정되었다.

모든 골재에서 동일하게 재령이 경과함에 따라 알칼리-실리카 반응에 의한 길이 팽창이 증가하는 것으로 나타나 잠재적으로 알칼리-실리카 반응에 대한 유해요소를 포함하고 있는 것으로 판단되어지므로 재령 28일 까지 또는 그 이후까지 측정하여 알칼리-실리카 반응에 의한 길이 팽창 특성을 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.3. 시험방법에 따른 비교·분석

KS F 2546 모르타르 봉 시험방법과 ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험방법에 의한 알칼리-실리카 반응성 평가 결과를 표 9에 나타내었다. 안산암-2를 제외한 다른 골재에서는 시험방법에 따라 알칼리-실리카 반응성 평가 결과가 서로 다르게 나타났다.

표 9. Comparison of reactivity for types of aggregates between KS F 2546 test and ASTM C 1260 test

Types of Agg.	Evaluation of Alkali-silica reactivity	
	KS F 2546 test	ASTM C 1260 test
Siltstone	non-reactive	reactive
Mudstone	non-reactive	reactive
Felsic vitric tuff	non-reactive	possible reactive
Andesite-1	non-reactive	possible reactive
Andesite-2	non-reactive	non-reactive

KS F 2546 모르타르 봉 시험방법과 ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험방법에서 동일한 골재를 대상으로 동일한 등가알칼리함량의 시멘트, 배합비 그리고 골재의 입도분포 조건에도 불구하고 서로 다른 결과를 도출한 이유는 평가기간의 차이로 인한 길이팽창을 유도하는 환경조건의 영향으로 판단되며 표 10에 시험방법을 나타내었다.

표 10. Difference of environmental conditions between KS F 2546 test and ASTM C 1260 test

Name	KS F 2546 test	ASTM C 1260 test
Content		
Type of test	Mortar-Bar	Mortar-Bar
Testing	Expansion	Expansion
Type of Particle	Fine or crushed coarse	Fine or crushed coarse
Size of specimens(mm)	25.4×25.4×254	25.4×25.4×285
Temperature(°C)	38±2	80±2
Alkali content(% Na ₂ O _{eq}) L: Limit UL: Unlimited	L: above 0.6% Na ₂ O _{eq} of cement	UL: immersed in 1N NaOH
Humidity	Specimens is over water between 25mm in container	Immersed in NaOH solution
Criteria	Reactive if expansion>0.1% after 6months (Reactive if expansion>0.05% after 3months)	Varying in the range of 0.1~0.2%
Time	6months	14days

KS F 2546 모르타르 봉 시험방법의 경우 저장온도가 38±2°C, 습도는 수치화된 기준은 없으며 외부에서의 알칼리 이온 공급은 없는 상태이나 ASTM C 1260의 경우에는 저장온도가 80±2°C, 습도는 1N NaOH 수용액에 수침된 상태이므로 상대습도가 100%를 유지한다는 것과 외부로부터의 알칼리 이온이 지속적으로 공급된다는 차이점을 나타내고 있다.

3.3.1. 외부로부터의 알칼리 이온 공급에 따른 영향

ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험결과에서 최대 팽창을 보인 실트암을 대상으로 NaOH의 농도 변화에 따른 실험을 실시하였으며, 길이팽창 특성을 분석한 결과는 표 11과 같다.

표 11. Expansion results for Variety of NaOH Concentration on ASTM C 1260 test using the Siltstone

Concentration of NaOH	Percent Expansion			
	0-day	7-day	14-day	28-day
1.00N NaOH	0.000	0.350	0.425	0.568
0.75N NaOH	0.000	0.179	0.271	0.351
0.50N NaOH	0.000	0.067	0.133	0.165
0.25N NaOH	0.000	0.032	0.046	0.049
0.00N NaOH	0.000	0.028	0.028	0.035

NaOH의 농도가 1.00N에서 0.00N로 낮아질수록 재령 14 및 28일에 측정된 길이팽창이 현저하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 0.25N NaOH의 경우에는 재령 14일에 0.046% 재령 28일에는 0.049%로 측정되어 '반응성 없음'으로 나타났다.

또한, 0.00N NaOH와 1.00N NaOH의 길이 팽창률을 비교하여 보면 반응성이 없는 골재에서도 외부로부터의 알칼리 이온 공급이 이루어지면 길이 팽창이 유발되어 '반응성 있음'으로 판정될 수 있다는 우려를 내포하고 있다.

3.3.2. 온도 및 습도에 의한 영향

표 7의 실트암 길이팽창 결과와 표 11의 0.00N NaOH 길이팽창 결과를 살펴보면 KS F 2546의 경우에는 38°C, 시편은 저장용기 내에서 수면과 25mm거리를 두고 거치한 상태이고 ASTM C 1260의 NaOH 농도변화 실험의 경우에는 80°C, 시편을 수침한 상태이므로 온도 및 습도의 차이에 의하여 ASTM C 1260의 NaOH 농도변화 실험에서 재령 28일의 시편이 약 2.5배 정도 길이 팽창이 증가한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문은 국내 콘크리트 포장용 굵은 골재 5종을 대상으로 모르타르 봉 시험방법의 환경조건이 알칼리-실리카 팽창 반응 특성에 미치는 영향에 대하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. KS F 2546 모르타르 봉 시험방법을 이용한 알칼리-실리카 반응성 평가 결과 대상 골재 모두 “반응성 없음”으로 판정되었다.
2. ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험방법을 이용한 알칼리-실리카 반응성 평가 결과 실투암과 이암은 “반응성 있음”으로 판정되었고, 규장질유리질응회암과 안산암-1은 “잠재 반응성”으로, 안산암-2는 “반응성 없음”으로 판정되었다.
3. KS F 2546 모르타르 봉 시험방법과 ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험방법의 결과는 서로 상관성이 떨어지며 길이 팽창을 유도하는 환경조건의 차이점에 의한 영향으로 판단된다.
4. ASTM C 1260 촉진 모르타르 봉 시험방법에서 NaOH의 농도변화에 따른 실험결과 ‘반응성 없음’의 경우가 NaOH의 농도가 증가할수록 즉, 외부로부터의 알칼리 공급에 의하여 ‘반응성 있음’으로 평가되어질 가능성을 내포하고 있다.
5. 동일한 골재를 이용한 모르타르 봉에서 온도 및 습도가 증가할수록 길이팽창이 증가한다는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- 강원대학교(2008) “최종보고서 : 알칼리-골재 반응 억제용 혼화재 물리적인 특성 및 반응성 골재 DB 구축 연구”, 한국도로공사 도로교통연구원
- 김성수, 류재석, 이승태, 정호섭 공저(2010) “토목재료학”, 구미서관, pp.91-84
- 농어촌진흥공사 농어촌연구소(1994) “콘크리트용 대체골재 개발에 관한 연구”, 94-05-19
- 삼표산업(1997) “콘크리트용 부순모래의 실용화 연구”, 대한주택공사 주택연구소
- 윤경구, 김성권, 홍승호, 한승환(2008) “시험방법에 따른 국내 골재의 알칼리-실리카 반응성 평가”, 한국콘크리트학회 논문집, 제20권 6호, pp.689-696
- 윤경구, 홍승호, 한승환(2008) “ASTM C 1260 실험에 의한 국내 골재의 알칼리-실리카 반응 팽창 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제20권 4호, pp.413-437
- 홍승호(2006) “국내 콘크리트의 알칼리-실리카 반응에 대한 조사 및 억제 방안”, 공학박사학위논문, 강원대학교
- KS F 2546(2002) “골재의 알칼리 잠재 반응 시험 방법(모르타르 봉 방법)”, 지식경제부 기술표준원
- ASTM C 1260(2002) “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates(Mortar-Bar Test)”, American Society for Testing and Materials
- Chang-Seon Shon(2009) “Sulfate Attack, Alkali-Silica Reaction, & FlyAsh in Concrete”, 한국건설기술연구

접 수 일 : 2010. 11. 11
심 사 일 : 2010. 11. 16
심사완료일 : 2011. 6. 21