

국내 일부 쇄석골재의 알칼리·실리카 반응성에 관한 연구

An Experimental Study on the Alkali Silica Reactivity of Several
Domestic Crushed Stones

노재호*·조일호·이양수·정재동 이영수·윤재환

〈동양시멘트(주) 동양중앙연구소〉

〈수원대학교 건축공학과〉

반응 발생 방지대책을 마련하기 위한 연구로서 실시
되었다.

1. 서 론

최근 여러 외국에서는 쇄석골재 사용 콘크리트 구조물의 알칼리·골재반응에 의한 조기 성능저하가 큰 문제로 등장하여 사회문제가 되고 있다. 이러한 배경에는 천연골재 고갈에 따라 수십년전부터 사용해진 쇄석골재가 그 원인으로 이웃 일본에서도 최근 알칼리·골재반응에 의한 피해가 계속 발생하고 있다.

알칼리·골재반응에 의한 콘크리트 구조물의 피해는 1940년 미국의 T. E. Stanton에 의해 처음 보고¹⁾된 이후, 1970년대에 유럽 각국에서, 그리고 1983년에는 일본에서 발견되었다.

1940년대 이후, 알칼리·골재반응에 의한 콘크리트 구조물 성능저하 현상에 대하여 광범위한 조사와 연구가 이루어져 팽창 메커니즘, 반응성 광물 및 암석, 반응성 골재 판정시험법, 반응 영향인자, 방지대책 및 보수방법 등에 관하여 광범위한 연구가 행해져 왔다.

국내에서는 아직 알칼리·골재반응에 의한 피해가 보고된 적이 없으나 천연골재 고갈로 내구성 검증을 거치지 않은 쇄석골재 사용이 증가^{2,3)}하고 있으므로 알칼리·골재반응 발생에 대비하여 시멘트중의 알칼리량 저감과 콘크리트중의 총 알칼리량 규제, 반응성 골재 판별 등과 같은 충분한 대책이 마련되어야 할 것이나 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구는 당사 기존 연구결과를 토대로 국내 일부 쇄석골재에 대한 알칼리·골재 반응성 판정을 실시하여 국내의 쇄석골재에 의한 알칼리·실리카

2. 실험방법

본 연구는 「국내 쇄석골재의 알칼리·실리카 반응성 판정에 관한 실험적 연구(1), (2)」^{4,5)}를 토대로 반응 위험성이 있는 것으로 판정된 국내산 골재 3종류와 외국에서 반응성이 있다고 판정된 골재 2종류에 대하여 알칼리·실리카 반응성의 유무를 확인하기 위하여 실시되었다. 실험순서는 다음 그림 1과 같다.

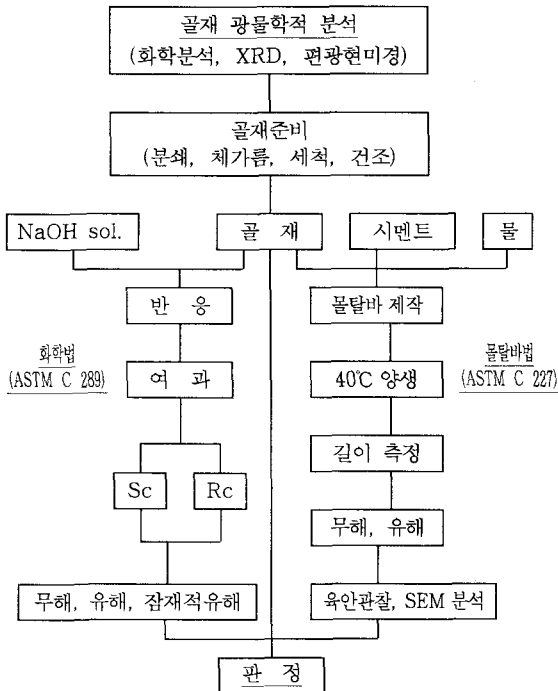
본 연구에서 실시한 알칼리·실리카 반응성 골재 판정의 자세한 순서는 다음과 같다.

(1) 암석학적 방법으로 암석 분말시료에 대하여 화학분석 및 X선 회절분석을 실시하여 구성결정 성분을 파악한다. X선 회절분석에 의해 비결정물질은 검출되지 않으므로 골재시료로 박편을 제작하여 편광현미경에 의하여 구성광물과 암석의 판정을 행한다.

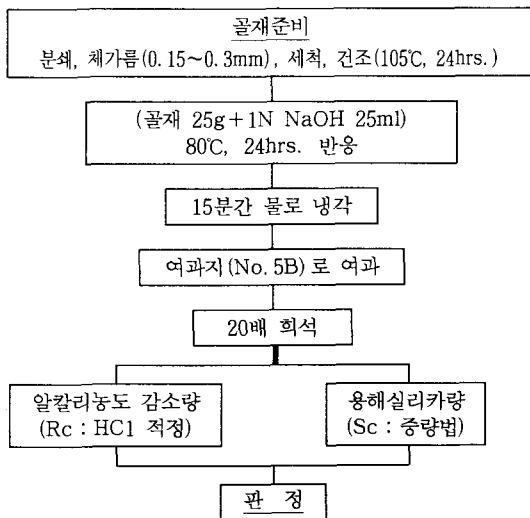
(2) X선 회절분석과 편광현미경에 의해 반응성이 있다고 사료되는 시료에 대하여 ASTM C 289(화학법)에 의하여 반응성의 유무를 판단한다. 화학법은 신속 판정이 가능하나 판정 신뢰성이 약간 부족하며 화학분석 설비와 숙련된 분석기술을 필요로 한다.

(3) 반응성 유무의 최종적인 판단은 화학법 결과, 유해 또는 잠재적 유해로 판정된 시료에 대하여 ASTM C 227(몰탈바법)에 의한 실험을 실시하여 확정한다.

(4) 또한 본 연구에서는 팽창이 발생한 몰탈바의 외부를 육안관찰하고 내부를 주사전자현미경으로 관찰하여 팽창의 원인이 알칼리·실리카반응에 의한 것임을 확인하였다.



<그림-1> 실험과정 개요



<그림-2> 화학법 개요 (ASTM C 289)

2-1 광물학적 연구방법

쇄석골재중의 알칼리·실리카 반응성 광물의 존재를 판단하기 위하여 각 골재에 대해 화학분석, X선 회절분석 및 편광현미경에 의한 관찰을 실시하였다<그림-1>.

2-1-1 화학분석

원자흡광분석기에 의해 정량된 알칼리(Na₂O, K₂O)를 제외한 나머지 성분에 대하여는 습식전분석을 실시하여 화학분석을 행하였다.

2-1-2 분말 X선 회절분석

미분쇄한 각 골재시료를 2θ : 5~60°, Cu Kα (Ni filter), 40kV, 30mA, 주사속도 3°/min, full scale : 500~6,000cps의 조건으로 X선 회절분석하여 정성분석하였다.

2-2 화학법

화학법은 ASTM C 289 규정에 의해 다음<그림-2>의 순서에 따라 실시하였다<그림-2>.

2-3 몰탈바법

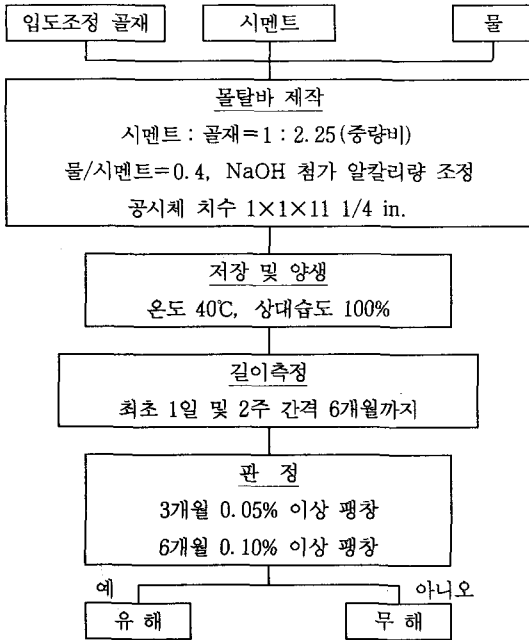
몰탈바법 배합은 국내 골재는 골재와 알칼리와의 반응촉진을 위해 수산화나트륨(NaOH)를 첨가하여 등가알칼리량을 2.0%, A/C(골재/시멘트) = 0.75, W/C(물/시멘트) = 0.4로 하고 골재혼입율에 따른 길이변화 관찰을 위해 골재와 표준사의 비율 30 : 70, 50 : 50 및 100 : 0으로 변화시켜 실험을 실시하였다. (<표-1> 및 <그림-3> 참조)

알칼리량 증가는 골재중의 실리카(SiO₂)와 콘크리트의 세공용역중의 알칼리 금속이온(Na⁺, K⁺)과의 알칼리·실리카반응에서 저알칼리의 사용보다 알칼리·규산염겔(alkali·silicate gel)을 더 많이

몰탈바법 공시체 제조조건

<표-1>

체 눈금크기 (mm)	중량백분율 (%)
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



〈그림-3〉 몰탈바 실험 개요 (ASTM C 227)

생성하여 팽창을 증가시킨다.

국외산 골재는 기존의 연구를 토대로 Na_2O eq. = 1.0%, A/C=2, W/C=0.6으로 하고 골재와 표준사와의 비는 D골재가 25 : 75이고, E골재는 19.2 : 80.8로 실험을 실시하였다. 이는 최대팽창을 나타내는 페시멈 (passimum) 량을 고려하여 정한 것이다.

본 실험에 사용된 모든 골재는 〈표-2〉의 입도로 조정되어 〈그림-3〉에 나타난 순서대로 〈표-1〉의 배합으로 1x1x11inches의 몰탈바를 제작하여 40°C의 저장용기에 보관하여 2주에 한번씩 길이 변화를 측정하였다.

2-4 팽창 몰탈바 관찰

2-4-1 육안관찰

각 골재의 몰탈바의 외관을 관찰하여 균열 및 휨 등을 조사한다.

2-4-2 SEM에 의한 관찰

몰탈바에서 높은 팽창을 나타낸 B골재로 만든 몰탈바 (No. 6)를 절단하여 건조시킨 후 주사전자현미

몰탈바법에 사용된 골재의 입도

〈표-2〉

공시체 번호	골재 종류	골재혼입율 (%)	A/C	W/C	Na ₂ O eq. (%)
1	A	30	0.75	0.4	2.0
2		50			
3		100			
4	B	30			
5		50			
6		100			
7	C	30	2.0	0.6	1.0
8		50			
9		100			
10	D	25			
K	E	19.2			

경 (SEM : scanning electron microscopy) 으로 시멘트경화체 내부에 존재하는 알칼리·실리카 반응생성물 관찰을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 광물학적 연구결과

3-1-1 화학분석 결과

각 골재에 대한 화학분석 결과를 다음 〈표-3〉에 나타내었다.

국내산 골재의 경우 국외산 골재보다 알칼리성분은 많이 검출이 되었으나, 실리카 성분은 적게 검출이 된 것을 알 수 있다.

동일한 SiO₂ 성분도 존재하는 광물에 따라 알칼리·실리카 반응성이 달라지며 다음의 X선 회절분석 결과, A골재 이외는 반응성 성분인 트리디마이트 (trydimite) 와 크리스토팔라이트 (cristobalite) 로 구성되어 있다는 것이 확인되었다. B골재의 경우 산화철, 산화칼슘, 산화마그네슘 등의 성분이 다른 골재에 비해서 많이 검출되었다.

3-1-2 분말 X선 회절분석 결과

각 골재의 X선 회절분석 결과를 〈그림-4〉와 〈표-4〉에 나타내었다.

A골재의 경우 전체적으로 석영이 주성분이고 B

골재의 화학분석 결과

<표-3>

(unit : wt. %)

시료종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig. loss	
국내	A	50.92	19.76	13.74	7.33	4.18	-	1.43	0.13	-0.51
	B	53.62	11.58	15.87	8.09	6.55	0.13	0.57	2.30	-0.45
	C	50.94	19.42	13.43	6.82	3.82	0.11	1.75	3.04	0.85
국외	E	64.86	17.90	5.80	5.05	1.64	0.31	0.06	0.13	0.83
	F	68.60	16.50	2.65	2.03	1.09	0.39	0.10	0.13	1.50

골재와 C골재는 석영은 검출되지 않았으나 주성분으로 장석과 실리카 광물인 크리스토팔라이트(cristobalite)를 함유하고 있었다. D골재의 경우에는 석영과 크리스토팔라이트 및 장석의 실리카 광물을 다량 함유하고 있고 E골재는 다른 골재에서는 검출되지 않았던 트리디마이트(tridymite)가 검출되었다.

A골재를 제외한 나머지 골재들의 X선 회절분석 결과를 보면 A골재보다 피크강도가 훨씬 낮은 것으로 보아 비정질의 glass를 함유할 가능성이 높은 것으로 사료된다.

X선 회절분석 결과, A골재를 제외한 모든 골재가 알칼리와 반응하는 실리카 광물을 함유하고 있다고 사료된다. 그러나 크리스토팔라이트의 X선 회절 피크는 다른 피크와 겹치는 경우가 있으므로 그 존재를 확실히 확인하기는 어렵다.

3-1-3 편광현미경 관찰결과

<그림-5>는 B골재의 편광현미경 사진으로 반정으로서는 장석, 감람석 등이 보이며 석기에는 장석과 감람석 등의 사이를 비정질의 glass가 매우고 있는 반상 조직임을 알 수 있다.

3-2 화학법 결과

ASTM C 289 규정에 의한 각 골재의 화학법을 실시한 결과, <표-5>와 <그림-6>에서와 같이 A골재를 제외한 나머지 골재들은 잠재적 유해 또는 유해로 나타나 알칼리·실리카 반응에 대해 위험한 것으로 판정된다.

3-3 몰탈바법 결과

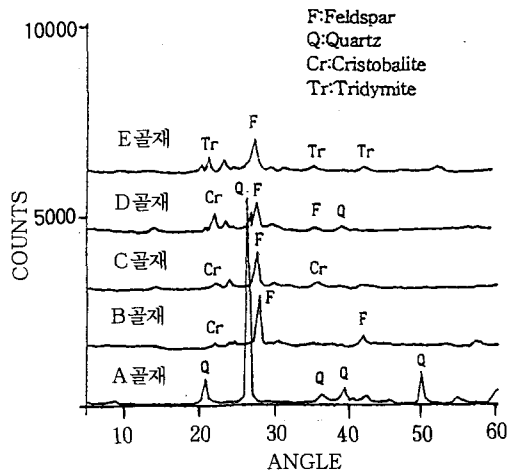
<표-1>의 배합조건으로 제작한 몰탈바의 길이변화 측정결과를 <그림-7>에 나타내었다.

각 골재의 X선 회절분석 결과

<표-4>

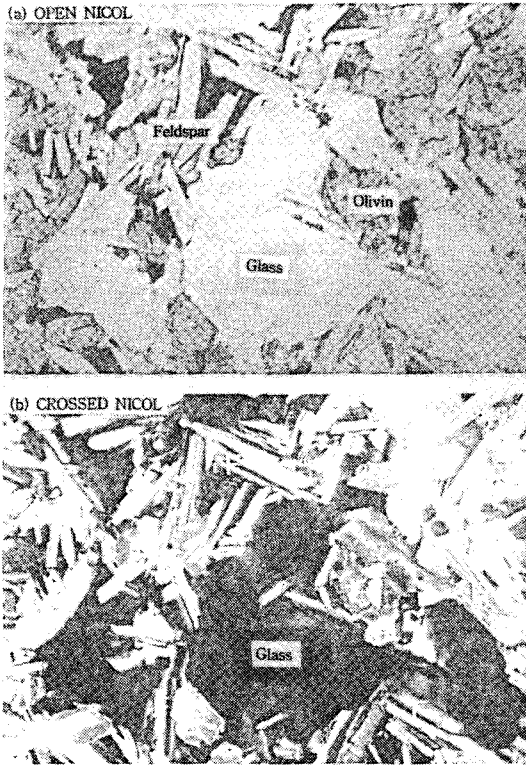
골재 \ 광물	A	B	C	D	E
quartz	●	-	-	◎	-
tridymite	-	-	-	-	○
cristobalite	-	○	○	◎	-
feldspar	-	●	◎	◎	◎

주) ● : 1,000cps 이상. ○ : 500~100cps.
◎ : 1,000~500cps. - : 검출되지 않음.



<그림-4> X선 회절분석 결과

A골재의 경우 화학법과 마찬가지로 무해로 판정되었다. B골재의 경우 골재혼입율 30, 50 및 100% 모두 6개월 이내에 팽창률 0.1%를 넘어 알칼리·실리카 반응에 위험한 것으로 판단된다. C골재는 골재혼입율 100%의 경우 ASTM C 227 규정의 3개월에서의 팽창률 0.05%를 넘었으나 6개월에서는 0.1% 이하의 팽창을 나타내어 장기재령의 결과가



<그림-5> A골재 편광현미경 관찰결과

필요하다. D골재의 경우는 유해로 판정되나 E골재는 장기재령의 결과를 구할 필요가 있다.

3-4 몰탈바 관찰

3-4-1 육안 관찰

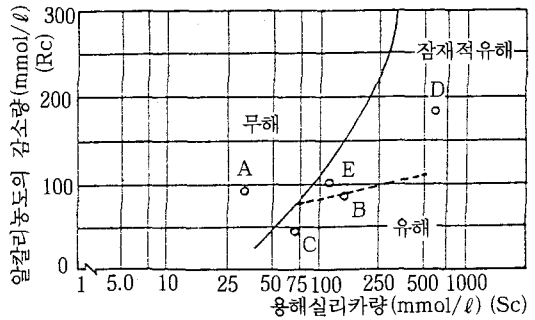
다음 <그림-8>은 몰탈바에서 높은 팽창을 보인 B골재의 몰탈바(No. 6) 사진으로 외부에 균열이 나 있는 것을 확인할 수 있다.

3-4-2 주사전자현미경에 의한 내부조직 관찰

화학법 실험결과

<표-5> (mmol/ℓ)

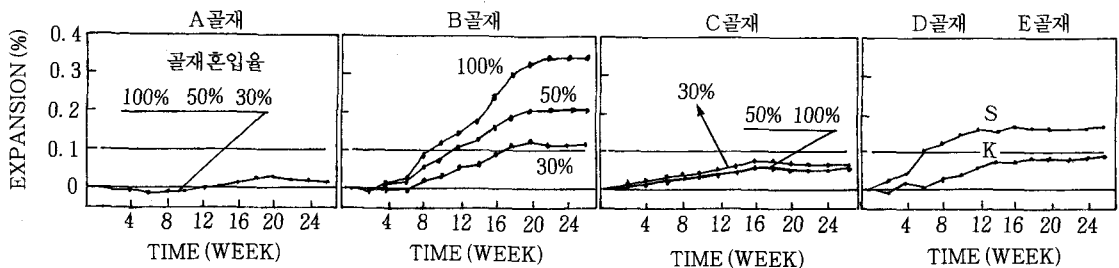
골재종류	Sc	Rc	판정
A	33.11	95.83	무해
B	121.99	87.50	유해
C	72.15	42.50	유해
D	615.10	185.10	잠재적유해
E	119.80	100.20	잠재적유해



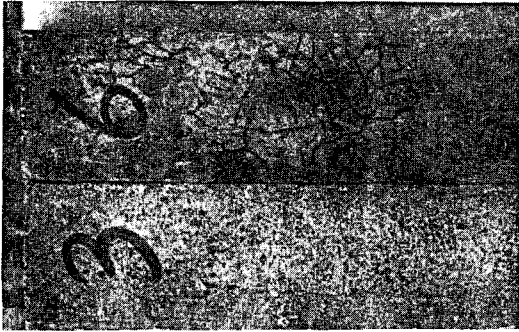
<그림-6> ASTM C 289(화학법) 결과

몰탈바에서 높은 팽창을 보인 B골재로 만든 몰탈바(No. 6)를 절단하여 건조시킨 후 주사전자현미경으로 반응생성물에 대하여 관찰한 결과, <그림-9>에서와 같이 초기 반응생성물로 보이는 평활한 부정형의 massive gel과 그보다 미세한 2차생성물 결정의 spongy gel이 관찰되었다.

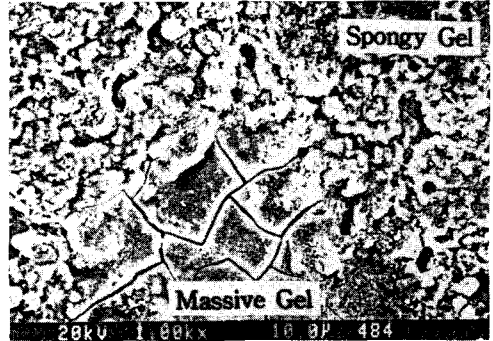
이와같은 massive gel은 2차적으로 생성하는 spongy gel, 장미꽃 모양, 침상, 섬유상, 그물상, 소관점합체 등의 다양한 형태로 변화하는 것이 여러 문헌^{6,7,8)}에 소개되어 있다. <그림-9>의 반응생성물은 외국의 여러 문헌에서 보이는 반응생성물들과 동일한 형태이다.



<그림-7> 각 골재의 몰탈바 길이변화 측정결과



〈그림-8〉 몰탈바 외부균열 사진



〈그림-9〉 SEM에 의한 몰탈바(No.6) 내부 관찰

4. 결 론

국내산 골재 3종과 국외산 골재 2종에 대해 광물학적 분석, 화학분석, 화학법 및 몰탈바법을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 광물학적 분석에서 A골재를 제외한 모든 골재가 알칼리·실리카 반응성 광물이 있음이 판정되었다.

(2) A골재를 제외한 골재들이 화학법 결과 유해 또는 잠재적 유해로 나왔다.

(3) 몰탈바법에서 국내산 B골재와 국외산 D골재가 유해성 골재로 판정되었으며 B골재의 몰탈바를 SEM으로 관찰한 결과 알칼리·실리카 반응에 의한 반응생성물이 관찰되어 알칼리·실리카 반응이 확실시되었다.

(4) 국내산 쇄석에도 알칼리·골재반응에 의한 유해한 팽창을 보이는 반응성 골재의 존재가 확인됨에 따라 국내에서도 이러한 골재의 사용에 의한 콘크리트 구조물의 피해를 예방할 수 있는 대책이 시급히 마련되어야 하겠다.

(5) 본 연구는 국내 최초로 국내에도 알칼리·골재반응성 암석이 존재함을 밝힌 것으로 현재 알칼리의 종류가 알칼리·골재반응에 미치는 영향과 방지 대책 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

(6) 국내에서는 아직 알칼리·골재반응으로 인한 피해가 보고되지 않았으나 본 연구결과 국내에서도 반응성 골재가 존재함이 확인되었으므로 발생 가능한 알칼리·골재반응에 의한 콘크리트 구조물 손상에 대해 보수 및 보강대책 마련과 시멘트 및 콘크리트종의 알칼리량 규제, 쇄석골재 사용시 알칼리 반

응성 유무를 확인하는 등의 국내 각종 지방서에 대한 개정작업이 필요하다고 판단된다.

〈참 고 문 헌〉

- 1) T. E. Stanton, Influence of Cement and Aggregate on Concrete Expansion, Engineering News Record, 1940.
- 2) 尹在煥, 전국의 콘크리트용 골재에 관한 실태조사 결과, 레미콘誌, 통권 제12호, 1987.
- 3) 최민수 外2, 骨材의 需給現況과 展望, 콘크리트學會誌, 제3권 2호, 1991.
- 4) 이양수 外2, 國內 碎石骨材의 알칼리·실리카 反應性 判定에 關한 實驗的 研究(1), 韓國콘크리트 學會 學術發表會 論文集, Vol. 3, No. 1, 1991, pp. 83-98.
- 5) 정재동 外3, 國內 碎石骨材의 알칼리·실리카 反應性 岩石 判定에 關한 實驗的 研究(2), 韓國콘크리트 學會 學術發表會 論文集, Vol. 4, No. 2, 1992, pp. 50-53.
- 6) 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. 7. pp. 475-482.
- 7) Benoit Fournier, Marc-Andre Berube, and Guy Bergeron, A Rapid Autoclave Mortar Bar Method to Determine the Potential Alkali-Silica Reactivity of St. Lawrence Lowlands Carbonate Aggregates(Quebec, Canada), ASTM, cement, concrete, and aggregates, Vol. 13, No. 1, 1991