

ASTM C 227과 ASTM C 1260에 따른 쇄석 골재의 알칼리-골재 반응성

Alkali-Aggregate Reaction of the Crushed Stones Depending on the ASTM C 227 and C 1260 Test Method

전 쌍 순* 이 효 민** 진 치 섭*** 황 진 연**** 이 진 성*****
Jun, Ssang Sun Lee, Hyomin Jin, Chi Sub Hwang, Jin Yeon Lee, Jin Sung

ABSTRACT

The concrete structure can be easily damaged due to alkali-aggregate reaction. The alkali-aggregate reaction is a reaction between the alkalis(K or Na) in cement and an unstable mineral of the aggregates. There are several test methods to identify alkali reactivity of aggregates. In general, crushed stones are tested by petrographic examination, chemical method and 모르타르 바 method. This study tested alkali-aggregate reactivity of crushed stones that has different rock types such as granitic, volcanic, metamorphic and sedimentary rocks. Samples are collected from 12 local aggregate production companies. Alkali-reactivity of various rock types was evaluated by using ASTM C 227 and C 1260, and compared the test results of two test methods.

1. 서 론

대부분의 자연산 하천골재는 수많은 세월동안 물과 태양 및 대기에 직접 노출되어 골재 내부의 불안정한 광물이나 화학적 반응을 일으키는 물질 등이 대부분 용해되어 비교적 골재자체가 안정된 상태가 된다. 반면에 물과 태양과 대기에 직접 노출되지 않고 깊숙이 매장되어 있는 암석을 분쇄한 쇄석 골재는 상대적으로 화학반응에 영향을 미칠 수 있는 물질들이 함유될 가능성이 높다. 우리나라에서 문제화되고 있는 콘크리트의 물리적 열화에서만 기인되지 않고, 구조물의 재령이 오래된 것일수록 화학적 열화가 치명적 영향을 미친다. 이러한 화학적 열화의 주된 원인은 골재를 구성하는 암석 중에 열역학적으로 불안정한 실리카 성분이 알칼리와 쉽게 반응하여 일어나는 알칼리-골재 반응이다. 알칼리-골재 반응에 의한 피해를 사전에 방지하기 위해서는 골재의 알칼리 반응성을 사전에 판정하고 그에 따른 예방책을 강구할 필요가 있다. 골재의 알칼리-골재 반응성을 판정하는 방법은 암석학적 판정법(Petrographic Examination), 화학법(Chemical Method) 및 모르타르 바 법(모르타르 바 Method) 등이 일반적 방법으로 사용되고 있다. 이 중에서 암석학적 방법 및 화학법은 비교적 단시간에 판정 가능한 방법이지만 유해광물이 포함되는 경우, 그것이 유해한 피해로 연결될 것인가 여부에 대한 최종적인 판정은 모르타르 바 법에 의존하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 쇄석 골재의 알칼리-골재 반응

*정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

**정회원, 부산대학교 지질학과 강사, 환경문제연구소 전임연구원

***정회원, 부산대학교 토목공학과 교수

****정회원, 부산대학교 지질학과 교수

*****정회원, 부산대학교 지질학과 석사과정

성을 평가하는 모르타르 바 시험방법 중 ASTM C 227과 ASTM C 1260을 선택하여 암종 별로 수집한 12종의 골재들을 대상으로 쇄석 골재의 반응성을 비교, 분석하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 재료

2.1.1 시멘트

사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트로서, 화학성분은 표 1과 같다. 알칼리-골재 반응에 관련된 시멘트의 화학성분은 주로 K₂O와 Na₂O의 알칼리 성분이며, 본 실험에 사용된 시멘트의 K₂O량은 0.95%, Na₂O량은 0.12%로써 등가알칼리량(0.658 K₂O+Na₂O)으로 환산하면 0.75%이다.

표 1 시멘트의 화학성분

Chemical Composition(%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
20.5	6.0	3.1	61.6	3.2	2.1	0.95	0.12

2.1.2 골재

골재는 경상남도를 중심으로 골재 현황과 지질조사 자료를 이용하여 화성암(심성암, 화산암류), 퇴적암류 및 변성퇴적기원의 변성암 골재를 생산하는 업체를 방문하여 지질조사를 실시하고 암종을 확

표 2 골재의 산지 위치 및 암석 종류

골재 번호	산지 위치	암석의 종류	특징
골재 1	부산광역시 북구 만덕동	안산암질 화산암	폐 콘크리트 재생 골재
골재 2	부산광역시 북구 구포동		잔골재(모래)
골재 3	울산광역시 울주군 상북면	퇴적암	
골재 4	경남 진해시 용원동	호온펠스	
골재 5	경남 김해시 생림면	화강암	
골재 6	경남 김해시 상동면	화강암	
골재 7	경남 김해시 생림면	안산암	
골재 8	경남 김해시 생림면	화강암 + 안산암	
골재 9	경남 마산시 진북면	변성암	
골재 10	울산시 북구 대안동	화산암 석분	
골재 11	울산시 북구 대안동	화산암 모래	
골재 12	경북 봉화군 소천면	규석	

인한 후 생산되는 골재를 수집하였다. 그리고, 부산, 경남 지역에 광범위하게 사용되는 하성 기원의 잔골재인 구포사와 재생 골재를 실험에 포함시켰다(표 2 참조). 실험에 사용한 재생 골재는 1973년에 가설된 부산 북구 만덕동 덕천 2호교(RC Slab교) 폐 콘크리트를 1998년 파쇄 재생한 것이다. 수집한 골재는 본 시험에 사용하기 위해 분쇄한 후 체가름 하여 ASTM C 227과 C 1260의 절차에 부합되도록 표 3과 같이 입도를 맞추었다.

표 3 모르타르 바 시험의 골재 입도

통과	잔류	중량(%)
4.75mm (No. 4)	2.36mm (No. 8)	10
2.36mm (No. 8)	1.18mm (No. 16)	25
1.18mm (No. 16)	600 μ m (No. 30)	25
600 μ m (No. 30)	300 μ m (No. 50)	25
300 μ m (No. 50)	150 μ m (No. 100)	15

2.2 실험 방법 및 계획

2.2.1 골재의 물리적 성질 시험

본 연구에서는 골재의 물리적 성질을 파악하기 위해 골재의 비중 및 흡수율 시험(KS F 2504), 단위중량 시험(KS F 2505) 및 골재에 포함된 잔입자 시험(KS F 2511)을 행하였다.

2.2.2 ASTM C 227에 의한 모르타르 바 법

이 시험은 시멘트와 골재를 저장하는 동안 각 조합에 따른 모르타르 바의 길이 변화(증감)를 측정하여, 시멘트와 골재의 배합이 나트륨이나 칼슘과 같은 알칼리의 수산기 이온을 포함한 팽창반응에 미치는 반응도를 측정하는 데 있다. 판정의 기준은 6개월에 0.1% 이상의 팽창을 유발하는 시멘트·골재 배합은 대개 유해한 반응을 일으킬 수 있는 것으로 간주된다. 6개월의 결과를 이용치 못할 경우에는 배합물이 3개월에 0.05% 이상의 팽창을 유발한다면 배합물은 해로운 알칼리 반응을 일으킬 잠재력이 있는 것으로 간주해야 한다.

(1) 모르타르 바 제작

재료의 배합은 시멘트-골재 중량비를 1 : 2.25로 배합수를 첨가하여 플로우치가 105~120%의 범위가 되게 한다. 공시체는 2.5×2.5×30cm 치수의 봉을 사용하여 각 골재당 5개의 길이변화 시편을 제작하였다. 모르타르 배합은 표 4와 같다.

표 4 모르타르 배합

골재 번호	W/C (%)	사용수량 (kg)	시멘트 (kg)	잔골재 (kg)	플로우치 (%)
골재 1	67.8	0.61	0.9	2.025	115
골재 2	67.3	2.02	3.0	6.75	120
골재 3	57.4	1.12	1.95	4.3875	117
골재 4	58.0	1.22	2.1	4.725	120
골재 5	60.0	1.26	2.1	4.725	120
골재 6	79.8	1.675	2.1	4.725	118
골재 7	60.0	1.26	2.1	4.725	119
골재 8	91.4	1.92	2.1	4.725	119
골재 9	71.4	1.50	2.1	4.725	118
골재 10	84.5	1.775	2.1	4.725	118
골재 11	68.1	1.43	2.1	4.725	118
골재 12	77.4	1.625	2.1	4.725	119

(2) 시편의 보관 및 길이변화의 측정

모르타르 바는 ASTM C 227에 따라 38±2℃의 온도를 유지하고 상대습도 95% 이상을 유지할 수 있는 항온항습실에 보관하였다. 모르타르 바의 길이변화는 재령 24시간, 14일, 1, 2, 3, 4, 5, 6개월에 대해 측정하였다.

2.2.3 ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 법

이 시험은 골재의 잠재적인 알칼리 반응성을 검사하는 것으로 16일 안에 결과를 얻을 수 있는 방법이다. 시험 시편의 길이변화율이 시편 제작 후 16일(zero reading 후 14일)에 0.1% 미만의 팽창을 나타내면 골재는 유해성이 없는 것으로 간주한다. 하지만 시편이 0.1~0.2%의 팽창을 나타낸다면 골재는 잠재적인 반응성이 있는 것으로, 그리고 0.2% 이상의 팽창을 나타낸다면 반응성이 있는 골재로 간주해야 된다.

(1) 모르타르 바 제작

시험 모르타르는 시멘트와 골재를 무게비가 1 : 2.25가 되도록 하고, 물-시멘트비(W/C)는 0.47로 배합을 하였다. 공시체는 2.5×2.5×30cm 치수의 봉을 사용하여 각 골재당 3개의 길이변화 시편을 제작하였다. 모르타르 배합은 표 5와 같다.

표 5 모르타르 배합

W/C (%)	사용수량 (g)	시멘트 (g)	골재 (g)
47	235	500	1,125

(2) 시편의 보관 및 길이변화의 측정

시험 시편은 제작 후에 24시간 동안 23℃의 온도로 유지시키고 시험 시편을 탈형한 다음 초기길이(initial reading)를 측정하였다. 초기길이(initial reading)를 측정한 후, 시편이 물에 충분히 잠길 수 있도록 용기에 넣고 80±2℃의 온도로 유지시켰다. 24시간 후에 길이변화를 측정하였는데 이것이 zero reading이다. zero reading이 끝난 후 시험 시편은 1N NaOH 용액에 담구고 80±2℃의 온도로 유지시켰다. NaOH 용액이 들어있는 용기는 polypropylene으로 밀봉이 가능하도록 제작하였다. 모르타르 바의 길이변화는 zero reading 후 3, 6, 9, 12, 14일에 대해 매번 같은 시간에 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 골재의 물리적 성질

본 실험에 사용된 12종류의 골재들은 대체로 2.5~2.6 정도의 비중을 나타냈으나 골재 1(재생 골재), 골재 5(화강암), 골재 7(안산암)은 다른 골재에 비해 비중은 작고 흡수율은 3~3.5배 정도 크게 나타났다(그림 1, 2 참조). 비중이 작게 나온 이들 골재는 재생 골재, 화강암 및 안산암이었으며, 재생 골재는

재생 골재의 특성상 시멘트 모르타르가 다량 포함되어 있어 다른 골재와 차이가 나타난 것으로 생각된다. 골재 5와 골재 6은 같은 암종인 화강암인데도 불구하고 그림 1과 2에서 보는 바와 같이 비중과 흡수율에서 현저한 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 동일 암종일지라도 골재 구성 광물의 입도 뿐만 아니라 조직, 풍화도 및 암석 형성 당시의 지질환경 등 여러 요인들이 물성에 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다. 골재의 단위중량 실험결과는 그림 3과 같다. 쇄석 골재는 암석을 파쇄하는 과정에서 충격에 의해 미세입자들이 다량 함유될 수 있으므로 천연 골재의 잔입자량과 차이를 파악할 필요가 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 골재 3(퇴적암), 골재 4(호온펠스), 골재 5(화강암) 및 골재 6(화강암)의 잔입자량은 천연 골재인 골재 2(구포사)와 거의 비슷한 값을 나타냈다. 이 외에 다른 골재들은 천연골재 잔입자량의 4~5배 가까운 값을 나타내고 있다. 특히, 골재 7(안산암)과 골재 12(규석)는 천연 골재의 잔입자량과 거의 10배 가까운 차이를 보였다. 따라서, 골재 1(재생 골재), 골재 7(안산암), 골재 9(변성암), 골재 10(화강암 석분) 및 골재 12(규석)를 잔 골재로 사용할 때는 잔입자량을 줄일 수 있는 처리과정이 필요함을 알 수 있다.

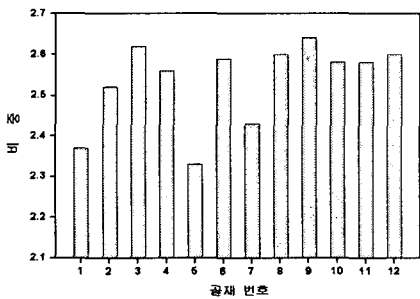


그림 1 골재의 비중

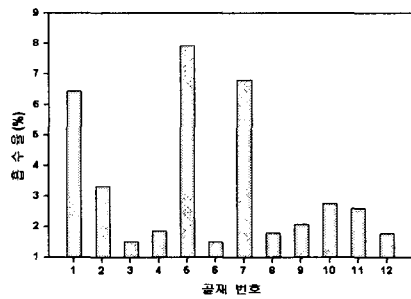


그림 2 골재의 흡수율

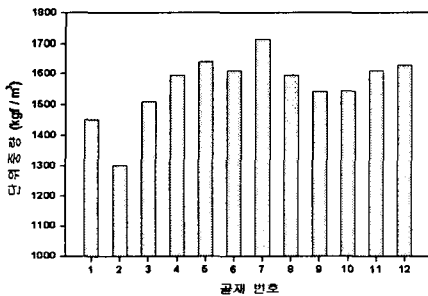


그림 3 골재의 단위중량

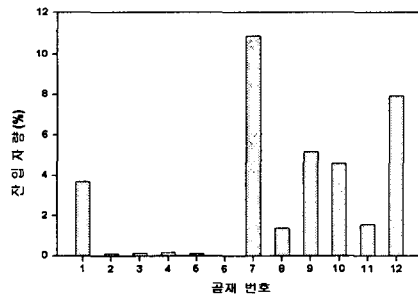


그림 4 골재의 잔입자량

3.2 모르타르 바 실험결과

ASTM C 227에 의한 모르타르 바 시험결과 그림 6, 8 및 10에서 보는 바와 같이, 초기에는 건조수축에 의해 수축하다가 다시 원래 길이로 회복하여 팽창하는 경향을 보이고 있으며 6개월 경과 후 0.1% 이상의 팽창을 나타내는 골재는 없었다. 본 연구에서는 IOWA Department of Transportation에서 알칼리-실리카 반응이 확인된 Mo-Sci Corporation의 Borosilicate glass rod를 ASTM C 1260으로 16일 만에 반응성을 찾을 수 있는지 확인하기 위해 실험에 포함시켰다. Borosilicate glass rod를 ASTM C 1260 시험방법으로 실험한 결과 그림 5에서 보는 바와 같이 zero reading 후 14일에 0.25% 이상의 팽창을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험결과 골재 3(퇴적암)을 제외한 나머지 골재들은 수축현상을 보이지 않고 zero reading 후 14일 동안 계속 팽창하는 것을 알 수 있었다(그림 7, 9 및 11 참조). 본 실험에 사용된 모든 골재가 zero reading 후 14일에

0.2% 이상의 팽창을 나타내는 반응성 골재는 없었지만 그림 7에서 보는 바와 같이 골재 3(퇴적암)은 zero reading 후 21일에 0.1% 이상의 팽창을 나타내고 있다. ASTM C 1260에서 zero reading 후 14일에 0.1~0.2%의 팽창을 나타내는 골재는 잠재적인 반응성이 있는 것으로 간주되므로 팽창률이 14일에 0.1% 미만인 골재 3(퇴적암)은 이 규정에 통과 하지만 zero reading 후 21일에 0.1% 이상의 팽창을 보이기 때문에 콘크리트 골재로 사용하기에는 다소 유해성이 있는 것으로 판단된다.

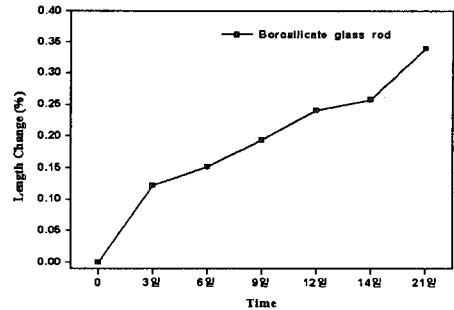


그림 5 Borosilicate glass rod의 길이변화율

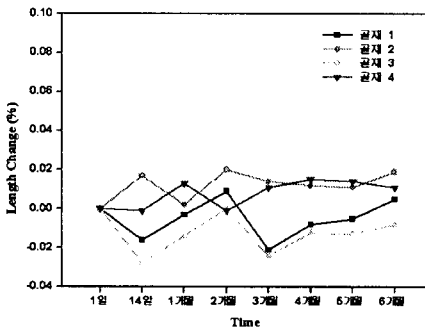


그림 6 ASTM C 227에 의한 길이변화율

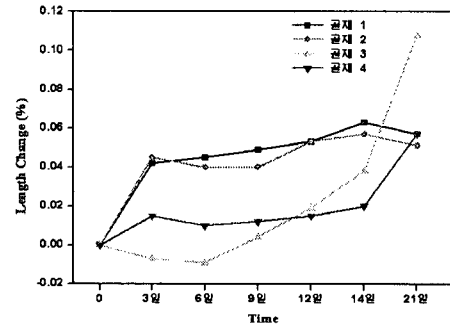


그림 7 ASTM C 1260에 의한 길이변화율

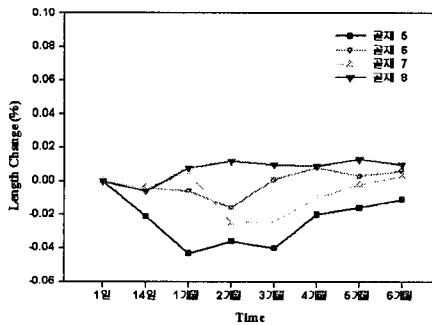


그림 8 ASTM C 227에 의한 길이변화율

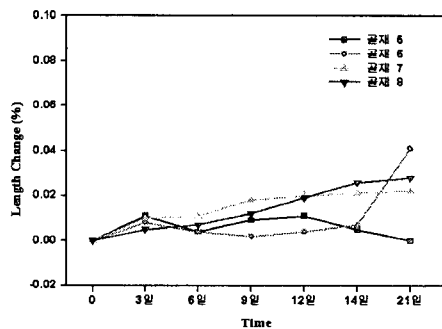


그림 9 ASTM C 1260에 의한 길이변화율

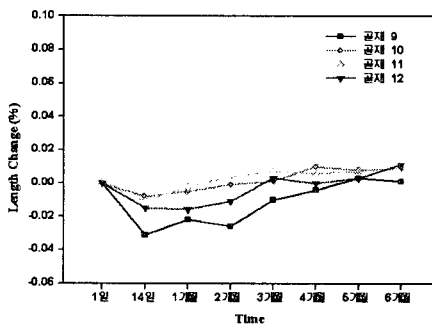


그림 10 ASTM C 227에 의한 길이변화율

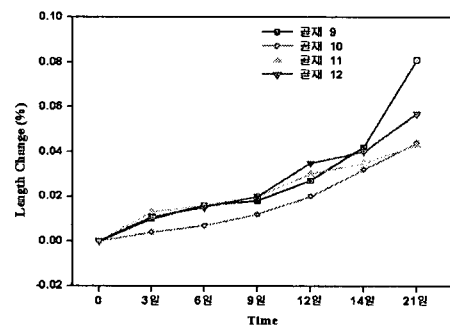


그림 11 ASTM C 1260에 의한 길이변화율

ASTM C 1260에 의하여 퇴적암, 변성암, 화산암의 경우 화강암에서 보다 현저한 팽창을 나타냈는데,

이는 구성광물의 결정도와 연관이 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 결정도가 낮은 광물들이 퇴적암과 변성암의 교결물질로 많이 함유되어 있는데 이러한 결정도가 낮은 광물들이 화학적으로 불안정함으로서 인해 잠재적인 반응성을 보이는 것으로 생각된다. 그림 6에서 골재 3(퇴적암)은 ASTM C 227 시험방법 결과 처음에는 수축하다가 재령 3개월 이후부터 원래 길이로 회복하려는 경향을 나타내고 있으며 재령 6개월에서의 길이변화율이 그림 7에서 ASTM C 1260에 의한 재령 6~9일 사이의 팽창률과 비슷한 값을 보이고 있다(그림 6, 7 참조). 골재 8(화강암+안산암)과 같은 경우는 ASTM C 227에 의한 시험결과 재령 14일 이후부터 6개월까지 계속 팽창을 나타내고 있고 재령 14일에서 1개월 사이의 길이변화율이 그림 9에서 보는 것처럼 재령 9일과 유사한 팽창률을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 외에 다른 골재들도 ASTM C 1260에 의한 zero reading 후 14일의 시험결과가 ASTM C227에 의한 재령 6개월의 팽창률보다 더 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다(그림 6~11 참조). 본 실험에 사용된 골재 중에서 6개월에 0.1% 이상의 팽창에서 유해임을 판정하는 ASTM C 227과 zero reading 후 14일에 0.2% 이상의 팽창을 나타내는 골재가 반응성 골재임을 판정하는 ASTM C 1260에서 규정한 길이변화율을 나타내는 골재는 없었다. 본 실험에서는 ASTM C 1260에 의한 zero reading 후 14일의 시험결과가 ASTM C 227에 의한 재령 6개월 후의 팽창률과 유사한 것을 알 수 있었다. 이처럼 ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험법은 단기간에 반응성 골재를 확인하는 데 유용할 뿐만 아니라 반응이 천천히 일어나는 골재에 대한 유해성을 판정하는 데 효과적인 것으로 생각된다.

4. 결 론

- (1) 본 연구에 사용된 골재들의 물성은 암종과 암상에 따른 차이는 물론이고, 동일 암종의 것에서도 광물조성과 조직특성, 입도에 따라 차이가 있었다.
- (2) ASTM C 227에 의한 모르타르 바 시험결과 6개월 경과 후 0.1% 이상의 팽창을 나타내는 골재는 없었다.
- (3) ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험결과 zero reading 후 14일에 0.2% 이상의 팽창을 나타내는 반응성 골재는 없었지만 본 실험에 사용된 퇴적암은 잠재적인 반응성이 있는 것으로 보이므로 콘크리트 골재로 사용하기에는 다소 유해 가능성이 있는 것으로 판단된다.
- (4) 본 실험에 사용된 퇴적암은 다른 골재보다 높은 팽창을 보였는데, 이는 결정도가 낮은 광물들이 교결물질로 퇴적암에 많이 함유되어 광물들이 화학적으로 불안정함으로 인해 잠재적인 반응성을 보이는 것으로 생각된다.
- (5) 이상의 시험결과를 분석하면 본 연구 범위 내에서 시험한 쇄석 골재가 ASTM C 227과 ASTM C 1260의 규정을 모두 만족하는 것으로 나타났다. ASTM C 227에 의해 6개월이 지난 후에도 나타나지 않은 현상이 ASTM C 1260으로 짧은 기간에 잠재적인 반응성을 나타내는 골재를 알 수 있었다. 이처럼 ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험법은 단기간에 반응성 골재를 확인하는 데 유용할 뿐만 아니라 반응이 천천히 일어나는 골재에 대한 유해성을 판정하는 데 ASTM C 227에 의한 방법보다 더 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00064) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. ASTM C 227-97a, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-Bar Method).
2. ASTM C 1260-01, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates(Mortar-Bar Method).