

콘크리트용 골재로서의 Bottom Ash 활용성 평가

Evaluation of Bottom Ash on the Application for the Aggregate of Concrete

(2010년 5월 26일 원고접수, 2010년 6월 22일 심사완료/ Received May 26, Accepted June 22, 2010)

김상철*

한서대학교, 토목공학과

Kim, Sang-Chel

Hanseo University, Seosan, 356-706, Korea

Abstract

In this study, as one of solutions associated with the shortage of treatment area of industrial waste and the containment of its harmful components, the bottom ash which is known to be by-products of thermoelectric power plant was selected and its applicability for aggregate of concrete mixture was measured. Hardness test, sieve analysis, water-absorption test and SEM analysis were carried out to investigate the possibility of using bottom ash as a replacement of coarse and fine aggregate. Chemical analyses such as ignition loss test and X-ray incidence were carried out also. In addition, values for slump, strength, permeability, freeze and thaw, and carbonation were evaluated in terms of effects of replacement ratio of bottom ash.

As the results, it was found that, though bottom ash is in short supply of fine particles and is in lack of cohesion, these problems can be solved by partially mixing with natural aggregates or improving in a process of production. In addition, bottom ash has not only advantage of durability but also acquirement of general compressive strengths in case that a certain proportion of natural aggregate is applied to mixture, in spite that unit water or chemical admixture should be increased to acquire good workability due to plenty of porosity.

키워드 : 바텀애시(저회), 콘크리트 배합, 골재, 콘크리트 압축강도, 내구성

Keywords : bottom ash, concrete mixture, aggregate, compressive strength of concrete, durability

1. 서론

국내 산업이 발전함에 따라 산업폐기물은 기하급수적으로 늘어가고 있는 반면, 아직도 대다수의 산업폐기물들은 매립되어지고 있어 환경보호와 자원 재활용의 차원에서 커다란 문제로 대두되고 있는 실정이다(구현정 등, 1996; 원종필 등, 2000). 그 중에서도 화력 발전소의 석탄 연소 과정에서 발생하는 대부분의 석탄회는 처리를 위해 발전소 주변 회사장에 매립되어 왔다(원종필 등, 2001, 2002; 천병식 등, 1996). 그러나 실질적으로 국내 국토여건을 고려해 볼 때 방대한 회사장(waste abandonment yard)을 수용하기는 어려운 형편이므로 폐기하고 있는 대량의 석탄회를 어떻게 하면 재활용할 수 있는가의 문제가 오늘날

석탄 화력의 당면과제로 제기되는 바(신홍철 등, 1997) 이에 대한 무난한 해결만이 석탄화력 운용의 어려움과 입지난을 동시에 타개할 수 있는 방안이라 생각된다. 이와 반면에 국내에서는 점차적으로 콘크리트에 사용될 골재원의 고갈로 이미 해사의 사용은 상용화되어 있고 유용한 석산 개발이 점차적으로 어려워지고 있는 상황으로 볼 때 이들 골재를 대체하거나 부분적으로 활용이 가능한 재료의 선정은 시급한 사안으로 판단된다. 이 점에서 bottom ash는 포집 후 급격한 냉각이나 인위적 분쇄에 의해 입자가 형성되므로 콘크리트에 사용되는 일반 골재와 흡사한 형상을 지니고 있어 골재로서의 대체 활용가능성이 있으며 또한, 다공질 입자로 되어 있어 경량화할 수 있다는 것이 특징이다. 특히, 최근의 구조물은 대형화 및 초고층화 되고 있는 추세에 있으며, 그로 인해 구조물 자체를 경량화하려는 움직임에 비추어 볼 때 bottom ash를 콘크리트 구조물에 활용할 수 있다면 이에 대한 활용 가치는 매우 높을

* Corresponding author
E-mail : schkim@hanseo.ac.kr

것으로 사료된다.

이에 본 연구에서는 그간 연구가 미비하였던 bottom ash를 대상으로 배합조건 및 치환율을 다르게 하였을 때의 기본 물성변화, 강도발현, 내구성능 등의 특성을 비교, 분석하여 일반강도 콘크리트 목적의 사용 가능 여부를 평가하고자 하였다.

2. 실험 내용과 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 bottom ash를 일반 콘크리트에서 사용되고 있는 잔골재와 굵은 골재의 대체재로서의 활용 여부를 파악하기 위해 콘크리트 설계기준강도, bottom ash의 대체 비율, 물-시멘트비를 주요 변수로 하여 실험을 수행하였다. 실험은 먼저 bottom ash가 콘크리트 골재로서의 사용 가능한지의 여부를 파악하기 위하여 체가름시험, 경도시험, 흡수율 시험, S.E.M을 통한 입경분석 등의 물리적 시험을 수행하였고, 화학적 특성시험에서는 강열감량시험을 통해 미연소탄소 함유량을 파악하고 X-ray를 통해 성분 분석을 수행하였다. 일단, 물리·화학적 특성 시험을 통해

골재로서의 적절성 평가가 완료된 이후에는 콘크리트 배합을 실시하여 물성 평가를 하였다. 이 때 배합은 강도와 내구성 등 평가 목적에 따라 달리하였는데, 먼저 강도평가 목적에서는 현재 콘크리트 구조물에서 가장 많이 사용되고 있는 설계기준강도 24, 27MPa 두 가지를 선정하였고, 물-시멘트비는 42%, 45%로 배합변수를 정하였다.

슬럼프는 현재 현장에서 작업성 확보 차원에서 주로 사용되고 있는 120±10mm를 기준으로 하여 bottom ash의 대체 비율에 따른 배합 조정은 다음의 두 가지 방법을 고려하였다.

① Bottom ash를 첨가하지 않는 일반 골재를 사용한 콘크리트의 조건에서 슬럼프 값을 만족하는 배합수량을 고정하고, bottom ash를 대체 첨가함에 따라 설정한 슬럼프 값이 만족되지 못할 경우에는 감수제를 첨가하여 슬럼프 값을 맞추도록 하는 방법

② 일반 골재를 사용한 콘크리트에서 정한 배합비를 기준으로 사용된 감수제의 사용량을 고정으로 하고 bottom ash를 첨가함에 따라 필요로 하는 슬럼프값은 배합수량을 조절하여 맞추도록 하는 방법

내구성 관련 실험에서는 내투수성시험, 동결융해 저항성 시험, 내황산염 반응시험, 탄산화시험을 수행하였으며, 강도

Table 1 Mix proportions in case of replacing fine aggregate with bottom ash(for strength)

구분	실험 변수	W/C (%)	s/a (%)	단위량 (kg/m ³)					SP제 (g/m ³)	AE제 (g/m ³)	비 고
				물	시멘트	잔골재	B/A	굵은골재			
①	B00	39.9	46.1	166	415	804	0	941	976	125	
	B05	42.7	46.0	177	415	763	32.5	942	882	118	
	B10	42.0	45.8	175	415	730	65.5	943	882	118	
	B20	46.3	45.3	192	415	648	131.2	942	882	124	
	B40	49.5	44.3	206	415	486	262.4	942	882	124	
	B60	55.2	43.2	229	415	324	392.5	942	882	129	
②	B00	45.0	46.1	166	369	822	0	962	488	111	
	B05	45.0	45.8	166	369	781	32.9	962	600	111	
	B10	45.0	45.6	166	369	739	66.5	962	2941	111	
	B20	47.0	45.2	173	369	659	133	962	4705	118	SP제 고정
	B40	50.8	44.2	187	369	494	268	962	4705	129	〃
	B60	58.2	44.01	215	369	337	422	962	4705	129	〃
	B80	64.2	42.3	237	369	164	542	962	4118	129	
③	B00	41.8	44.0	145	347	806	0	1024	1176	106	
	B05	45.1	44.2	156	347	778	32.6	1024	1176	106	
	B10	43.2	44.0	150	347	740	65.2	1026	1176	94	
	B20	44.3	43.5	154	347	661	130	1028	1176	94	
	B40	47.6	42.4	165	347	493	261	1026	1176	88	
	B60	51.0	41.3	177	347	327	394	1026	1176	82	

주 :

- ① B/A를 포함하지 않은 상태의 원 배합에서 27(강도)-40(W/C)을 기준으로 함
- ② B/A를 포함하지 않은 상태의 원 배합에서 27(강도)-45(W/C)을 기준으로 함
- ③ B/A를 포함하지 않은 상태의 원 배합에서 24(강도)-42(W/C)을 기준으로 함

Table 2 Mix proportions in case of replacing fine aggregate with bottom ash(for durability)

구분	실험 변수	W/C (%)	s/a (%)	단위량 (kg/m ³)					SP제 (g/m ³)	AE제 (g/m ³)	비 고
				물	시멘트	잔골재	B/A	굵은골재			
①	B00	41.8	44.0	145	347	806	0	1024	1176	106	
	B05	45.1	44.2	156	347	778	32.6	1024	1176	106	
	B10	43.2	44.0	150	347	740	65.2	1026	1176	94	
	B20	44.3	43.5	154	347	661	130	1028	1176	94	
	B40	47.6	42.4	165	347	493	261	1026	1176	88	
	B60	51.0	41.3	177	347	327	394	1026	1176	82	

주 : ① B/A를 포함하지 않은 상태의 원 배합에서 24(강도)-42(W/C)을 기준으로 함

Table 3 Mix proportions in case of replacing coarse aggregate with bottom ash(for strength and durability)

구분	실험 변수	W/C (%)	s/a (%)	단위량 (kg/m ³)					SP제 (g/m ³)	AE제 (g/m ³)	비 고
				물	시멘트	잔골재	B/A	굵은골재			
①	B00A	41.8	44.3	145	347	815	0	1026	1176	106	
	B05A	38.9	47.2	135	347	831	40.1	974	1176	106	
	B10A	41.7	49.6	145	347	826	80.2	922	1176	106	
	B20A	43.2	54.5	150	347	822	159	820	1176	94	
	B40A	43.7	65.0	152	347	823	410	615	1176	88	
	B60A	45.1	65.0	157	347	823	615	410	1176	71	

주 : ① B/A를 포함하지 않은 상태의 원 배합에서 24(강도)-42(W/C)을 기준으로 함

기준은 24MPa의 조건에서 잔골재와 굵은 골재의 대체재로 사용한 bottom ash의 대체비율만을 배합변수로 하여 그 대체비율이 각각 0%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%인 경우에 대해 비교실험을 수행하였다. 이 실험에서는 앞서 강도 실험에서와 같이 경제성을 감안하여 감수제의 사용량은 시멘트 중량의 0.3% (1,176g)으로 고정하고 bottom ash 사용으로 인해 필요한 슬럼프 120±10mm를 맞추기 위해서는 단위수량으로 조절하였다. 다음 Table 1~3은 강도 및 내구성 평가 목적으로 실험에서 사용된 배합비를 나타낸 것이다.

2.2 실험 재료

(1) 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사에서 생산되고 있는 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였다. Table 4는 실험에

Table 4 Characteristics of cement

비중	autoclave 팽창도(%)	분말도 (cm ² /g)	입경 (μm)		
			최대	80%통과	평균
3.14	0.1	3,200	100	40	21
응결시간		압축강도(MPa)			
초결 (hr:min)	종결 (hr:min)	1일	3일	7일	28일
4:20	6:40	9.0	20.0	28.5	37.5

사용된 시멘트의 물성치를 나타낸 것으로 KS규정을 만족하고 있다.

(2) 골재

잔골재는 비중은 2.63이고 조립률이 2.99, 흡수율이 1.5%인 강모래를 사용하였다. 굵은 골재는 최대 골재치수가 25mm인 쇄석을 사용하였으며 비중이 2.75, 흡수율이 1.0%인 것으로 나타났다.

(3) 화학 혼화제

사용된 감수제는 국내 S사에서 생산되고 있는 나프탈렌계 혼화제로서 비중이 1.21이고 염화물을 포함하지 않는 암갈색의 색상을 띠었다. 공기연행제로는 감수제를 생산하고 있는 동일 회사의 제품을 사용하였으며, 수용성 용액으로 염화물을 함유하고 있지 않는 것으로 파악되었다.

(4) Bottom ash (B/A)

본 연구에 사용된 bottom ash는 서천화력발전소에서 발생하는 것을 사용하였다. 채취된 bottom ash는 해수에 의해 열처리 후 회사장으로 이송되기 때문에 염분을 다량 함유하고 있어 담수로 세척하고 KS F 2526 규정에 따라 입도조정을 한 후 콘크리트 배합에 사용하였다. 실험에 사용된 골재별 물리적 특성은 Table 5와 같다.

Table 5 Physical properties of bottom ash

종 류	조립률	절대건조밀도 (g/cm ³)	안정성(%)	흡수율(%)
잔골재용	3.02	2.19	5.5	4.8
굵은 골재용	6.45	2.30	6.1	3.3

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Bottom ash의 골재로서의 적절성 평가

(1) 물리적 특성

Bottom ash가 골재로 활용될 수 있는지의 여부를 정량적으로 파악하기 위하여 물리적 특성에 대해 조사하였다. Fig. 1은 5mm이하의 골재에 대해 체 분석한 결과를 나타낸 것으로 bottom ash의 입도 분포는 입경이 0.1~1mm인 입자가 50%, 1mm이상의 입자가 50%를 차지하고 있어 천연모래와 혼합하여 입도 조정을 하면 잔골재로서의 활용이 가능한 것으로 판단된다. 다만, 일반 잔골재에 비해 다소 미립분이 적은 것이 단점인데, 이는 bottom ash를 식히는 과정에서 상당량의 미립분이 해수에 의해 씻겨 나가 발생된 것으로 bottom ash를 재활용 산업부산물로 활성화될 경우에는 배출된 bottom ash를 큰 수조로 유출하고 담수로 열처리하여 미립분이 유실되지 않도록 한다면 미립분 부족에 따른 문제는 발생하지 않을 것이다.

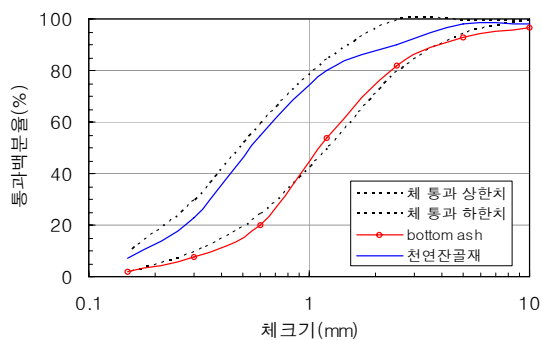


Fig. 1 Grading distribution

굵은 골재로서의 사용여부는 25mm이하의 골재에 대해

Table 6 Results of ignition loss test for B/A

구 분	시료무게(g)	태운후 시료무게(g)	시료무게변화(g)	미연소탄소 함유율(%)
A: 검은색	2.0467	1.6766	0.3701	18.08
B: 회 색	2.0658	2.0641	0.0017	0.08
C: 혼합	2.0069	1.7582	0.2487	12.39

경도시험을 수행하였으며 그 결과, 골재의 결속력이 다소 부족하여 외부의 충격에 대해 쉽게 부스러지는 경우가 종종 발생하였으나, 이와 같이 결속력이 약한 골재는 콘크리트 배합 과정에서 이미 파쇄되었고 배합 과정에서 파쇄되지 않은 골재는 상당한 경도를 갖고 있어 골재로서의 활용상에 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한, bottom ash를 골재로 활용하여 생산할 경우에는 크리셔를 통과하여 결속력이 약한 골재를 사전에 파쇄한다면 이와 같은 문제점은 해결될 것이다.

골재의 안정성 측면에서 살펴보면, bottom ash는 내부에 공극이 많이 포함되어 있기 때문에 24시간 수중에 침지하여 흡수율을 구하면 5mm이하의 bottom ash에서는 4.8%정도, 5-13mm의 골재에서는 3.3%정도가 측정되었다. 이 정도의 흡수율이면 콘크리트 배합시 물을 흡수하며 그 흡수의 정도에 따라 콘크리트 성질에 영향을 미치게 된다. 따라서 보다 안정적 콘크리트 성질을 유지하기 위해서는 bottom ash 골재를 미리 충분히 흡수시킨 상태에서 사용하는 이른바 프리웨팅(pre-wetting) 방법을 적용할 필요가 있다.

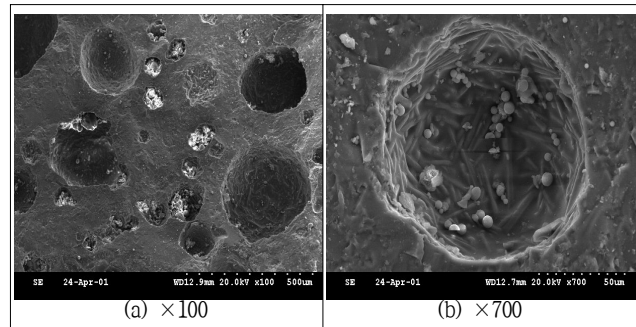


Fig. 2 S.E.M results

Fig. 2는 S.E.M분석을 통한 표면 기공의 특성을 조사한 것으로 대체적으로 원형에 가까운 것을 확인할 수 있다.

(2) Bottom ash의 화학적 특성

Bottom ash에 포함된 미연소 탄소 함유량을 측정하기 위해 배출된 bottom ash의 대표적 3종류 시료에 대해 700℃로 3시간 강열을 하고 무게의 감량을 측정한 결과,

Table 6에 나타난 바와 같이 회색을 띄고 있는 시료(B시료)는 미연소 탄소 함유량이 0.08%로 작은 반면, 검은색(A시료)과 회색과 검은색이 혼합된 시료(C시료)는 각각 18%, 12%로써 천연 강모래의 최고 0.42%에 비해 크게 나타났다. 그러나 실제 콘크리트 배합을 통해 천연 모래를 사용한 콘크리트와 bottom ash를 혼합하여 사용한 콘크리트에 동일하게 AE제를 투입하고 공기량을 측정된 결과에 따르면, bottom ash의 골재 대체비율이 증가할수록 공기량이 감소되는 경향은 있지만 거의 1% 내외로 그 감소의 정도가 아주 심하지는 않는 것이 확인되었다. 그러므로 bottom ash에 포함되고 있는 미연소 탄소분은 화학적으로 비교적 안정한 상태를 유지하고 있으므로 화학 혼화제의 흡입에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 X-ray 분석결과를 나타낸 것으로 탄소를 제외한 나머지 원소는 플라이애시와 매우 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 bottom ash의 주성분이 12~18% 함유된 미연탄분과 함께 플라이애시와 마찬가지로 주로 Mullite (Al_6SiO_{13})과 Quartz(SiO_2)로 이루어져 있음을 나타낸다.

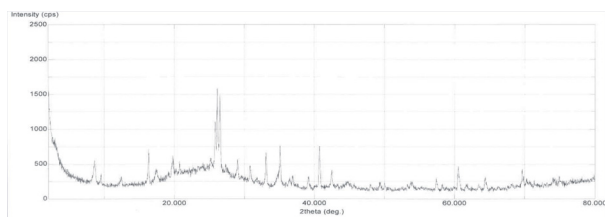


Fig. 3 X-ray analysis

Table 7 Results of chemical properties for B/A

성분	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	기타
함유율(%)	23.14	50.57	1.12	3.15	0.64	13.27	5.67

3.2 굳지 않은 콘크리트의 특성

Fig. 4는 잔골재의 대체재로서 bottom ash의 사용에 따른 슬럼프 변화를 나타낸 것으로, 슬럼프는 bottom ash를 소량 대체하여도 급격하게 감소되었으며 20%이상 대체할 경우에는 거의 슬럼프가 측정되지 않아 작업이 곤란한 것으로 나타났다. 이는 bottom ash에 포함되어 있는 내부 기공이 콘크리트 배합시 물을 흡수하여 발생된 것으로 워커빌리티 향상을 위해서는 일반 천연모래만을 사용하였을 때보다 배합수나 감수제의 증가가 필요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 슬럼프 120±10mm를 확보하기 위해 필요로 하

는 배합수나 감수제의 증가량 정도를 살펴보도록 하였다.

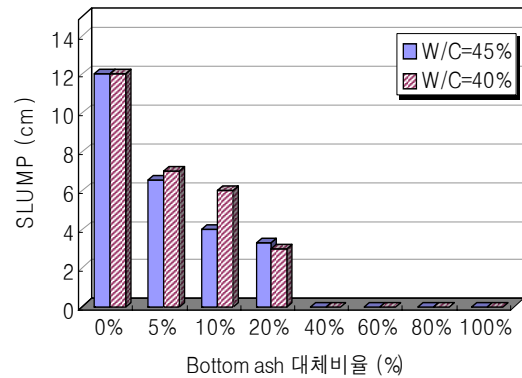


Fig. 4 Slump values for same W/C ratio (s/a=47%)

Fig. 5는 슬럼프 120±10mm를 유지하기 위해 필요로 하는 물-시멘트비를 나타낸 것으로 앞서 설명한 바와 같이 bottom ash의 사용량이 증가할수록 단위수량은 급격하게 상승하였다. 그러나 특기할 사항으로 bottom ash 대체비율을 10%를 적용하였을 때가 5%나 20%에 비해 오히려 낮은 물-시멘트비가 소요되었다. 배합수의 사용량을 가능한 한 최소화하는 것이 콘크리트의 강도와 내구성 측면에서 유리하다고 할 때 콘크리트의 물성은 그대로 유지하면서도 최소의 배합수가 소요되는 적정의 bottom ash 대체 사용량이 존재한다는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 bottom ash를 모래 대체재로 10% 사용이 이 경우에 해당된다고 할 수 있다.

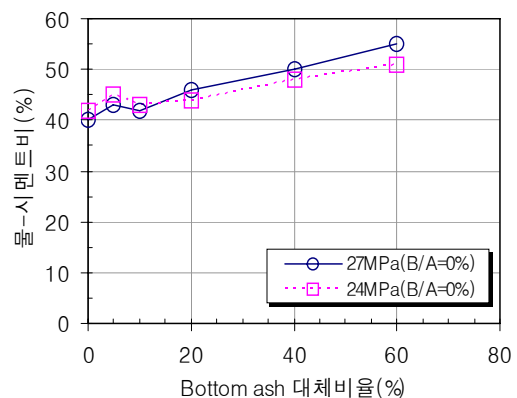


Fig. 5 W/C ratio associated with replacement of B/A for same slump value

Fig. 6은 천연골재를 사용한 조건($f_{ck}=24MPa$, W/C=42%)에 슬럼프 120±10mm확보를 위해 단위수량으로 조절하였

을 때 잔골재와 굵은 골재의 대체재로써 bottom ash를 적용한 결과를 비교한 것으로, 잔골재 대체재로써 bottom ash를 사용한 경우에 비해 굵은 골재 대체재로 사용할 경우가 비표면적이 작기 때문에 예상한 바와 같이 소요되는 단위수량의 증가는 적게 나타났다. 또한, 잔골재와 마찬가지로 굵은 골재의 대체재로 bottom ash를 5%로 사용한 경우에는 동일한 슬럼프 유지를 위해 오히려 단위수량이 감소하여 최적의 대체비율이 존재함을 알 수 있다.

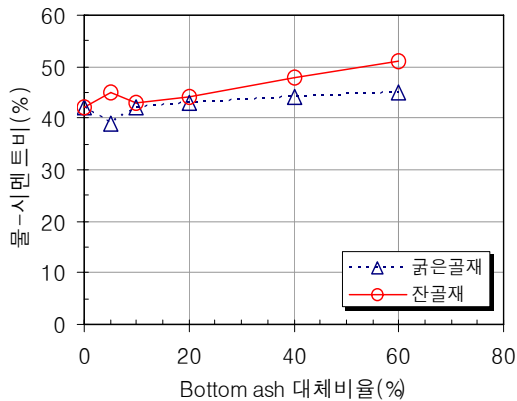


Fig. 6 W/C ratio associated with replacement of fine and coarse aggregate by B/A

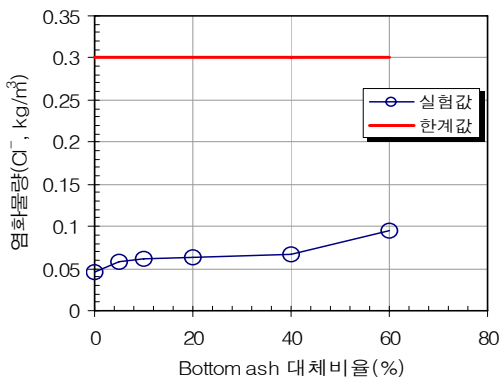


Fig. 7 Chloride ions contained in fresh concrete

Bottom ash는 전술한 바와 같이 현재 공정상 해수에 의해 열처리되고 있으므로 담수에 의해 세척하여도 염분이 남아 있을 것으로 예상된다. 따라서 굳지 않은 콘크리트 상태에서 bottom ash 대체 비율에 따른 염분함유량을 측정하였다. Fig. 7은 그 결과를 나타낸 것으로, bottom ash 대체 비율이 증가할수록 염화물량이 다소 증가되고 있음을 알 수 있다. 그러나 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 콘크리트 내의 전 염화물 이온량 0.3kg/m^3 에는 미치지

지 못하고 있어 담수로 세척할 경우에는 해수로 인한 영향에서 비교적 안전하다고 판단된다.

3.3 콘크리트의 압축강도

Fig. 8은 단위수량만으로 소요 슬럼프 값 $120\pm 10\text{mm}$ 를 조절한 경우의 KS F 2405에 따라 수행한 압축강도 결과를 나타낸 것이다. 앞서 슬럼프 조정에서도 나타난 바와 같이 잔골재용 bottom ash를 10% 대체한 경우가 5%나 20%로 한 것보다 단위수량이 적게 사용된 까닭에 10%로 대체한 경우가 다른 대체비율에 비해 높은 강도가 측정되었다. 이는 앞서 강도와 물-시멘트와의 관계가 중요한 역할을 하고 있음을 재확인하여 준다고 할 수 있다.

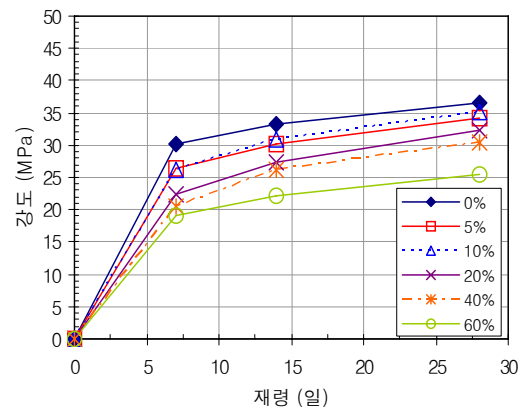


Fig. 8 Compressive strengths with replacement of fine aggregate by B/A ($f_{ck}=27\text{MPa}$, slump=120mm)

그러나 동일 슬럼프를 확보하기 위해 단위수량이 증가되었기 때문에 천연 잔골재를 사용한 경우보다는 낮은 강도가 나타나고 있다. 따라서 비교적 큰 슬럼프 값이나 슬럼프플로우를 요구하는 유동화 콘크리트 제작에 bottom ash를 사용하면 다량의 배합수를 요구하므로 강도저하가 발생할 우려가 있고, 고성능감수제를 이용하여 만족하는 슬럼프 값을 유지하기 위해서는 고가의 고성능감수제를 다량 필요로 하기 때문에 비경제적이 되어 적절하지 않은 것으로 판단된다. 또한, 고강도 콘크리트를 제작하는데 있어서도 기공에 의한 흡수성으로 인해 강도의 상승효과는 기대할 수 있지만 다량의 고성능감수제의 사용이 필수적이고, 이 사용량을 저감시키기 위해서는 역으로 단위수량의 증가가 요구되므로 어느 일정 범위 이상의 고강도 확보는 어려운 것으로 사료된다.

그러나 본 연구의 범위인 일반 강도에서는 설계기준강

도에 따라 다르겠으나, Fig. 8에 나타난 바와 같이 7일 강도에서는 천연 잔골재를 사용한 경우에 비해 강도의 감소 차이가 크게 나타나다가 28일에 이르러서는 거의 근접하거나 강도의 차이가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과에 대해 추론해 보면, bottom ash는 재료 자체로서 비교적 안정적이라 할 수 있지만 플라이애시와 마찬가지로 성분상 약간의 포졸란 성분을 가지고 있어 천연 잔골재를 사용한 경우에 비해 재령에 따라 강도의 증진 효과가 나타나지 않았나 생각된다.

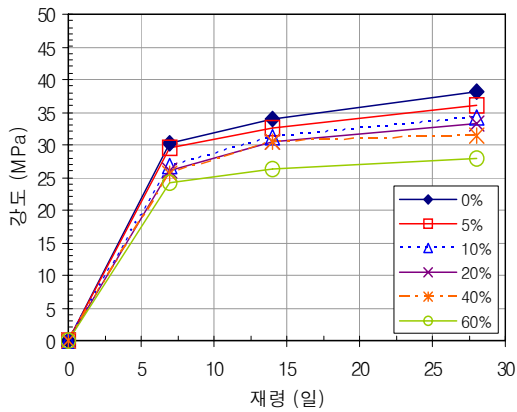


Fig. 9 Compressive strengths with replacement of coarse aggregate by B/A ($f_{ck}=27\text{MPa}$, slump=120mm)

Fig. 9는 굵은 골재 대체재로서 bottom ash를 적용한 경우에 대해 재령별 강도 추이를 나타낸 것이다. 이 경우에도 슬럼프 120mm를 맞추기 위해 감수제의 사용량은 고정하고 단위수량만으로 조정된 것으로 앞서 Fig. 8에 나타난 바와 같이 bottom ash의 대체비율이 증가됨에 따라 물-시멘트비가 증가하게 되어 다소 강도저하가 발생하였다. 그러나 작업성 확보를 위해 원 배합설계보다 추가로 투입된 잉여의 배합수를 굵은 골재의 대체재로 사용한 bottom ash가 흡수함으로써 예상보다 강도의 저감은 그리 심하게 나타나지 않았다. 단지 대체 비율을 60%로 하였을 때는 강도의 저하가 심하게 나타나므로 60% 이상의 대체 비율에서는 단위수량만으로 슬럼프를 조절할 경우 원하는 강도확보가 어려울 것으로 판단된다. 따라서 강도이외의 작업성 확보 차원에서 효율적인 배합이 되도록 하기 위해서는 일반 천연 골재만을 사용하였을 때에 비해 감수제와 배합수를 동시에 조절할 필요가 있다는 것을 본 실험은 나타내고 있다.

3.4 내투수성 분석 및 평가

Fig. 10은 잔골재 대체재로서 bottom ash의 사용량을 변화하면서 염소이온을 투과하여 통과된 전하량을 도시한 것이다. 시험결과를 살펴보면, bottom ash를 사용하지 않은 일반 콘크리트에서는 28일 이후의 경우 재령에 관계없이 거의 일정한 통과전하량을 나타내고 있으나 bottom ash를 대체재로 사용한 경우에는 일반적으로 재령이 경과함에 따라 전하통과량이 감소하는 즉, 내투수성이 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히, bottom ash를 모래 대체재로서 10, 20%를 적용하였을 때에는 재령 의존성이 더욱 크게 나타나고 있다. 이는 앞서 강도의 경우와 마찬가지로 bottom ash는 플라이애시에 비해 비교적 안정적이지만, 포졸란 반응성 특징을 갖고 있어 재령이 증가함에 따라 이들 골재가 2차 수화반응을 일으켜 내부에 치밀한 조직을 형성하기 때문에 내투수성이 향상된 것으로 추측된다.

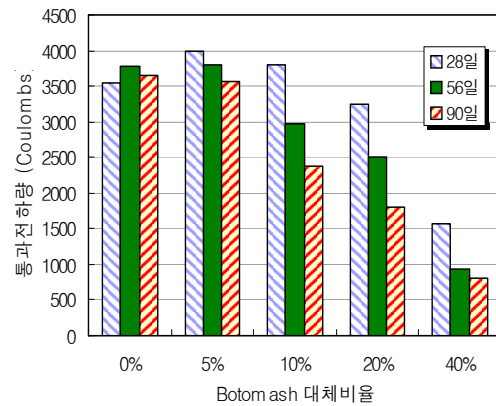


Fig. 10 Chloride ion penetration with replacement of fine aggregate by B/A

Fig. 11은 굵은 골재의 대체재로서 bottom ash를 사용한 경우로서 대체 비율 5%를 적용하였을 때에는 일반 쇄석을 사용한 경우와 거의 유사한 내투수성을 나타내다가 10%를 초과 적용하였을 때에는 매우 효과적인 내투수성을 보이고 있다. 또한, 잔골재 대체재로 사용한 경우와 같이 재령이 증가할수록 내투수성의 증가는 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

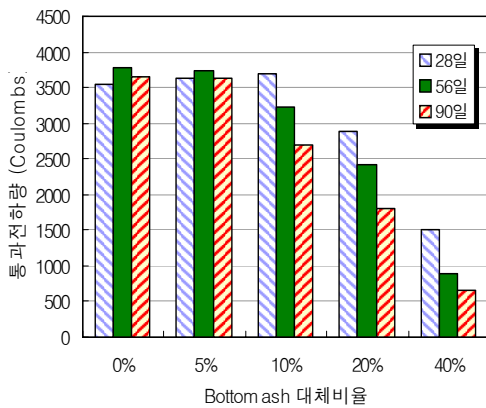


Fig. 11 Chloride ion penetration with replacement of coarse aggregate by B/A

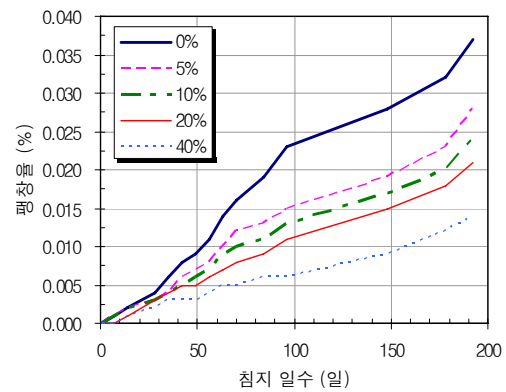


Fig. 12 Sulphate resistance with replacement of fine aggregate by B/A

3.5 동결융해 저항성 분석과 평가

Table 8은 동결융해저항성 실험결과를 각 골재별로 bottom ash의 혼합비율에 따라 정리한 것으로, 잔골재 대체재로 bottom ash 20%를 적용한 경우를 제외하고는 bottom ash를 사용한 경우가 천연 잔골재만을 사용한 경우보다 동일 종료 사이클 수에 대해서 상대 동탄성계수가 높거나 동일 상대 동탄성계수에 대해서는 종료 사이클 수가 크게 나타나고 있다.

이는 bottom ash를 골재로 활용할 경우 동결융해에 대해 저항성이 높아진다는 것으로 동해가 예상되는 구조물에 bottom ash를 골재로 적용하면 다소 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 bottom ash의 표면 다공성 때문에 수분의 안정성 확보차원에서 배합이전에 충분히 흡수시킨 골재를 사용할 경우에는 골재 내부의 수분이 시멘트 페이스트로 이동하는 관계로 일반 골재를 사용한 경우에 비해 저항성이 저하되므로 이에 대한 유의가 요구된다.

3.6 황산염 저항성 분석과 평가

내황산염 평가를 위해 US Bureau of Reclamation Test Method 4908B의 팽창시험을 재령에 따라 실시하였다(구현정 등, 1996). Fig. 12는 잔골재 대체용으로 bottom ash를 사용하였을 때의 결과를 도시한 것으로, bottom ash를 잔골재 대체재로 사용할 경우 대체비율이 증가할수록 황산염에 대한 저항성은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트 중의 C₃A 성분과 황산염이 서로 화학 반응하여 발생된 에트리타이트의 팽창을 bottom ash 표면에 존재하는 기공이 다소 완화하는 작용을 하여 발생한 것으로 판단된다.

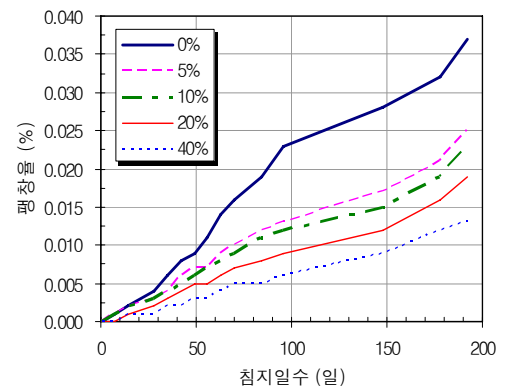


Fig. 13 Sulphate resistance with replacement of coarse aggregate by B/A

Fig. 13은 bottom ash를 굵은 골재 대체재로 활용하였을 때 그 대체 비율에 따른 내황산염을 비교한 것으로, 두 골재간의 정도 차이는 있지만 잔골재의 결과처럼 굵은 골재의 대체재로 사용할 경우 일반 골재를 사용한 경우보다 내황산염에 대해 양호하다는 것을 알 수 있다.

3.7 탄산화에 대한 저항성 분석 및 평가

축진탄산화시험의 전양생조건으로 제작한 공시체는 온도 20±2°C로 하여 4주간 표준양생한 후 동일온도와 상대습도 60±5%의 조건에서 건조하고 탄산화 실험 용기 내에 집어넣고 공시체 주위에 탄산가스(5.0±0.2%)를 주입한 후 각 3, 7, 28, 56일 동안 거치시킨 다음 소정의 일수에 꺼내어 탄산화 깊이를 측정하였다.

Table 8 Experimental results of freeze and thaw ($f_{ck}=24\text{MPa}$, slump=120mm)

구분	종료사이클수 (회)	상대동탄성계수(%)	내구성지수 DF (%)	공기량 (%)	비고
잔골재 대체재용	B00	180	42	30	3.5
	B05	180	45	32	3.2
	B10	210	53	40	3.8
	B20	150	40	25	2.5
	B40	180	50	38	4.4
굵은 골재 대체재용	B00A	180	42	30	3.5
	B05A	210	51	38	3.5
	B10A	180	47	36	3.0
	B20A	180	45	32	3.0
	B40A	180	46	36	3.6

Fig. 14와 15는 bottom ash를 잔골재와 굵은 골재의 대체용으로 적용하여 측진 탄산화 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, 앞서 기술한 바와 같이 다공질의 골재를 사용하였고 플라이애시는 아니지만 거의 동종의 bottom ash를 사용하였기 때문에 탄산화반응 속도가 커질 것이라는 예상과는 달리 골재 대체 비율을 10%로 대체한 경우에는 오히려 일반 골재를 사용한 것보다 탄산화 속도가 느린 것으로 나타났다. 다공질 골재의 경우는 다공성으로 인해 수분이나 탄산가스의 확산이 용이하므로 탄산화 속도가 빨라지지만 실질적으로 탄산화와 물-시멘트비와의 관계가 본 실험에서는 더 크게 작용한 것으로 판단된다. 배합 상에서 잔골재의 bottom ash 대체 비율 20%까지는 슬럼프 값 120mm를 맞추기 위하여 감수제를 적용하였고 그 이상의 대체비율은 경제성을 고려하여 단위수량으로 조절한 결과 다공성의 bottom ash가 물을 흡수함으로써 낮은 물-시멘트비가 되어 탄산화 속도가 낮아졌다. 그러나 bottom ash 20% 대체 비율에서는 수분의 흡착에 따른 물-시멘트비의 감소에 비해 다공성 골재의 절대적 증가와 포졸란성 재료의 사용 등의 영향이 커져 탄산화 속도가 증가된 것으로 판단된다. Bottom ash 40% 이상에서는 이 효과가 커져 탄산화 속도가 더욱 크게 나타났다. Fig. 15의 굵은 골재 대체재로 사용한 경우에도 잔골재의 경향과 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 이상의 결과를 종합하면 재료의 다공성과 안정화되었다고는 하지만 포졸란성 성분을 다소 함유하고 있는 특성 때문에 bottom ash를 사용한 경우의 콘크리트는 탄산화 속도가 다소 증가되는 경향이 있다. 그러나 bottom ash의 흡수성에 따른 물-시멘트비의 감소와 상쇄되어 탄산화 속도의 정도는 예상보다 심각하게 나타나지는 않았다. 그러나 과도한 bottom ash의 대체 사용은 작업성 확보와 경제성을 고려할 때 감수제 사용이외에도 물-시멘트비

의 증가가 불가피하므로 탄산화에 대한 저항성은 현저히 감소하게 된다.

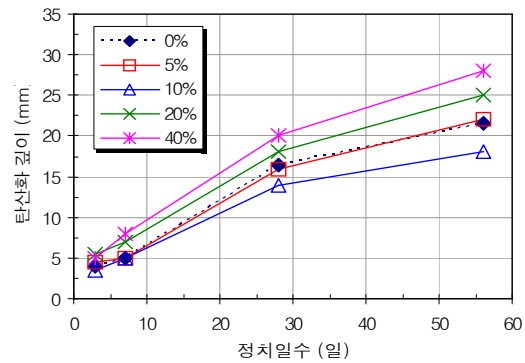


Fig. 14 Carbonation depths with replacement of fine aggregate by B/A

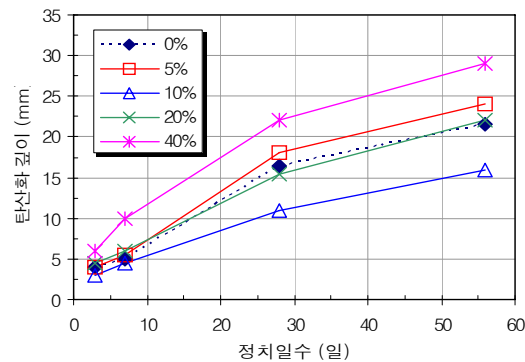


Fig. 15 Carbonation depths with replacement of coarse aggregate by B/A

4. 결 론

1. 입도분포에 있어서는 국내에서 요구되고 있는 규정 범위를 만족하고 있으나 일반 잔골재에 비해 다소 미립분

- 이 적은 것으로 나타났다. 이러한 문제점은 천연골재와 혼용하거나 bottom ash 배출시 공정에 유의하면 문제점이 없을 것으로 판단된다.
2. 굵은 골재로서는 다소 결속력이 약한 골재가 일부 있지만 이러한 골재는 콘크리트 배합 과정에서 파쇄될 정도로 약하기 때문에 대량 생산시에 crusher를 통과하여 분쇄한다면 이러한 문제점은 해결될 것으로 판단된다.
 3. 입형은 대부분이 원형에 가까워 작업성 확보에서는 유리하나, 내부에 기공이 있어 일반 골재를 사용한 경우에 비해 감수제나 단위수량의 증가가 필요한 것으로 나타났다. 미연소 탄소분도 비교적 많이 함유되고 있지만 화학적으로 비교적 안정한 상태를 유지하고 있어 공기량 등 일반 콘크리트의 성상확보를 위해 필요로 하는 화학혼화제의 사용량에는 많은 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다.
 5. 일반 골재를 사용한 콘크리트에 비해 동일 작업성 확보를 위한 단위수량 증가로 전반적으로 강도가 저하되었지만, 적정 범위의 bottom ash의 골재 대체는 흡수효과로 인해 일반 콘크리트와 동일하거나 그 이상의 강도 상승 효과를 기대할 수 있었다.
 7. Bottom ash의 골재 대체사용에 따른 작업성 저하를 감수제와 단위수량으로 적절히 조절한다면 내투수성, 동결융해저항성, 내황산염, 탄산화 저항성 등 콘크리트 내구성을 향상시킬 수 있다.
 6. 원종필, 이용수(2001) Bottom Ash를 혼합한 저장도 고유동 충전재의 특성. 콘크리트학회논문집, 제 13권 3호, pp. 294-300, 2001.
 7. 원종필, 이용수, 이준자(2002) Bottom Ash를 재활용한 저장도 고유동 재료의 내구성 및 환경영향 평가. 한국 콘크리트학회논문집, 제14권 제2호, pp.223-230, 2002.
 8. 천병식, 오민열, 임해식, 최현석(1996) 석탄회의 토공재로서 활용에 관한 연구. 한국지반공학회지, 제12권 제1호, pp. 73-85, 1996.
 9. A. Bilodeau and V. M. Mallotra (1997) Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ashes : Mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration,“ Proceeding 4th International Conference, Istanbul, Turkey, ACI SP-132 Vol. 1, 1997.
 10. B. W. Ramme (1997) Progress in CLSM : Continuing Innovation. Concrete International, May, pp. 32-33, 1997.
 11. C. A. Langton, N. Rajendran, and S. E. Smith (1998) Use of Pond Ash in CLSM. Concrete International, December, pp. 58-62, 1998.
 12. C. W. Lovell, T. C. Ke, W. H. Huang, and J. E. Lovell (1991) Bottom Ash As Highway Material. Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 1991, January.
 13. E. H. Riggs and R. H. Keck (1998) Specification and Use of Controlled Low Strength Materials by State Transportation Agencies. The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, A. K. Howard and J. L. Hitch, Eds., American Society-for Testing and Materials, pp. 296-305, 1998.
 14. I. M. Alobaidi, and J. Billam (2000) Use of Pulverized Fuel Ash in Trench Backfill. Journal of Material in Civil Engineering, August, pp. 228-237, 2000.
 15. Ivan Garcez and M. E. Tittlebaum (1985) Investigation of Leachability of Sub-bituminous Fly Ash Enhanced Road Base Materials. Mat. Res. Soc. Symp, Proc. Vol. 43, Materials Research Society, 1985.

참고문헌

1. 구현정, 이재천, 임남웅, 윤인주, 정진기(1996) 석탄회로부터 황산에 의한 알루미늄 추출. 한국자원리사이클링학회 추계세미나 논문발표, 한국자원리사이클링학회, 1996.
2. 대한주택공사 주택연구소(1999) 플라이애쉬 콘크리트의 특성 및 적용성에 관한 연구, 1999.
3. 박연동, 손명수, 김호영, 이복기(1997) 플라이애쉬의 미연탄소량 및 분말도가 콘크리트의 성질에 미치는 영향. 한국콘크리트학회 가을학술발표회, pp. 174-179, 1997.
4. 신흥철, 강희관, 최세진, 김규용, 김진만, 김무현(1997) 플라이애쉬의 미연탄소 함유량에 따른 고유동 콘크리트의 품질에 관한 실험적 연구. 한국콘크리트학회 가을학술발표회, pp. 381-384, 1997.
5. 원종필, 이용수(2000) 폐석탄회를 사용한 저장도 충전재의 물리·역학적 특성. 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, pp. 915-920, 2000.

콘크리트용 골재로서의 Bottom Ash 활용성 평가

산업의 발전과 함께 산업폐기물의 증가와 그에 따른 처리할 회사장 부족, 유해한 성분 함유로 인한 환경상의 문제 등에 대한 해결 방안의 일환으로, 본 연구에서는 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회 중에서 bottom ash를 대상으로 콘크리트용 골재로서의 유용성 여부를 평가하고자 하였다. 먼저 잔골재와 굵은 골재의 대체재로서의 적절성 평가를 위해 경도시험, 입도분포시험, 흡수량시험, S.E.M 분석시험 등의 물리적 시험을 수행하였고, 화학적 시험으로는 강 열감량시험, X-ray를 통한 분석시험을 수행하였다. 콘크리트에 적용하였을 때 미치는 영향은 대체재로서의 비율을 달리하여 작업성 확보차원에서 슬럼프의 변화를 측정하였고, 굳은 콘크리트에서는 강도확보, 내투수성, 동결융해 저항성, 내황산성, 탄산화 저항성에 대해 평가하였다.

실험결과, 미립분의 부족과 일부 bottom ash에서 결속력 상의 문제가 존재하였으나 천연골재와 혼합하여 사용하고 배출시 공정 개선을 한다면 골재로써 충분히 사용성이 있는 것으로 평가되었다. 또한, 다공성을 갖고 있어 작업성 확보를 위해서는 단위수량이나 감수제의 증가가 요구되지만 일반강도 한도 내에서는 일정 비율로 천연골재와 혼합하여 사용하면 강도 확보에 문제가 없고 오히려 내구성 확보에 있어서는 유리한 것으로 나타났다.