

폐석고를 시멘트 대체재로 활용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Properties of Concrete Using the Waste Gypsum

김 남 욱* 송 인** 박 래 선*** 배 주 성****
Kim, Nam Wook Song, In Park, Rae Seon Bae, Ju Seong

Abstract

As amount of waste matter rapidly increases with fast growth of cities and industry, how to dispose them has arisen as an important problem. Current policy of the government on disposal of waste is repressing generation of waste itself and in case of already generated waste, resource cycle waste management system that recycles waste after proper environmental process is getting established. Therefore recycling of waste and industrial by-products is rising hugely. One of largely wasted matters is waste gypsum, which was categorized as designated waste but changed to general since 1994. Due to disposal cost and lack of impurities removal technology, recycling of it was quite low. However, as impurities removal technology using semi-dried desulfurization process is developed lately, study on recycling of waste gypsum is going on lively. This study examines possibility of utilizing waste gypsum as alternative for concrete cement and analyzed attributes of waste gypsum before and after ball mill process to find out proper alternation ratio, and conducted strength and property tests on concrete subject whose percentage of cement use is substituted with 0, 5.0, 7.5, 10.0 and 12.5% of waste gypsum.

요 지

도시와 산업의 급속한 성장에 따라 폐기물의 발생량이 급증하고 있어 그 처리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 현재 폐기물 처리에 대한 국내의 정책방향은 폐기물의 발생 자체를 억제하고, 기 발생된 폐기물은 적절한 환경적 처리를 거쳐 재활용하는 자원순환형 폐기물 관리체계로 정착되어 가는 추세이기 때문에 폐기물 및 산업부산물의 재활용이 크게 부상되고 있다. 대량으로 발생하는 폐기물의 하나인 폐석고는 지정폐기물로 분류되어 왔으나, 1994년 이후에는 일반폐기물로 분류되었으며, 처리비용 및 불순물 제거기술 부족 등으로 재활용이 극히 미비하였다. 그러나 최근들어 반건식 탈황공정 등을 이용한 불순물 제거기술이 개발되어 폐석고의 재활용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 폐석고를 콘크리트용 시멘트 대체재로의 활용 가능성을 규명하고 적정대체율을 도출하기 위하여 불밀처리 전·후의 폐석고의 특성을 분석하였으며, 시멘트 사용량의 0, 5.0, 7.5, 10.0 및 12.5%를 폐석고로 대체한 콘크리트 시험체에 대한 강도 및 특성시험을 수행하였다.

Keywords : Waste gypsum, Ball-milling, Mechanical properties, Reasonable substitutive rate

핵심 용어 : 폐석고, 불밀처리, 역학적 특성, 적정 대체율

* 정희원, 청주대학교 토목환경공학과 전임강사

** 정희원, 전북대학교 토목공학과 석사과정

*** 정희원, 한국도로공사 건설본부장

**** 정희원, 교신저자, 전북대학교 토목공학과 교수

E-mail : asahi00@naver.com 011-682-1083

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

도시와 산업의 급속한 성장에 따라 폐기물의 발생량이 증가하고 있으며, 이러한 폐기물의 효율적인 관리 및 처리는 환경 보호 측면에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 지금까지 폐기물의 처리는 주로 매립에 크게 의존하였으나, 최근에는 정부의 정책이 폐기물의 발생량 자체를 우선적으로 줄이되 발생된 폐기물은 환경적으로 적절히 처리하여 이용하는 자선순환형 폐기물관리체계를 정착시켜 나가고 있어 폐기물의 재활용이 중요 관심사가 되고 있다.(배국진, 1998)

대량으로 배출되는 폐기물중 한 종류인 폐석고는 과거에는 유해성이 큰 지정폐기물로 분류되어 취급에 특별한 제한이 따랐으나, 새롭게 제정된 폐기물 관리법에서는 특별한 유해성이 없는 것으로 인정되어, 사업장 일반폐기물로 분류되어지고 있다. 폐석고는 연간 200만톤 이상 발생되고 있는데 인산석고를 비롯하여 배연탈황석고, 티탄석고 등 화학공정에서 발생하는 부산석고가 대부분을 차지하고 있다.(배국진, 1998)

이러한 부산석고는 석고보드 등의 원료로 일부 재활용되기도 하였으나 그동안 불순물 제거기술 및 처리비용 등의 문제로 상당 부분이 적정 처리되지 못하였다. 그러나 최근에 배출기준치를 만족시키면서 운전방식과 설비 등이 비교적 간단한 반건식 탈황공정이 개발되어 폐석고의 재활용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.(오영인 외, 2001)

미국 등지에서는 배연 탈황공정 등에서 발생하는 부산석고를 시멘트 원료, 건축자재 외에 농작물의 토지 개량제 및 도로의 노반재, 보조 기층재 등으로 활용하기 위한 연구가 진행 중에 있으며(Singh etc, 2005) 국내의 경우 바닥층 및 최종 복토층의 차수재 또는 복토재로서 활용하려는 연구가 진행되고 있다.(주재우 외, 2001·오영인 외, 2001)

Table 1 골재의 물리적 특성

골재종류	비중	흡수율(%)	최대치수(mm)	조립율
굵은골재	2.64	0.63	25	6.66
잔 골 재	2.53	1.31	-	2.80

본 논문은 폐석고의 대량 재활용을 목적으로 이를 시멘트 대체재료의 활용가능성을 규명하고, 적정대체율을 도출하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

즉, 폐석고는 입자의 조성이 불규칙하고 입자의 크기가 시멘트에 비해서 큰 특징이 있어 본 연구에서는 볼밀처리(ball-milling)하여 폐석고 입자의 균일성을 확보하였으며 폐석고의 볼밀처리가 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 볼밀처리 전·후의 폐석고를 각각 시멘트 사용량의 0, 5.0, 7.5, 10.0 및 12.5%로 대체한 콘크리트에 대하여 XRD 및 SEM을 실시하여 포졸란 반응 및 수화반응물 등을 고찰하였으며, 분말도 시험을 통하여 볼밀 전·후의 폐석고의 분말상태를 평가 하였다. 또한 재령 28일의 강도 및 특성시험 결과를 비교·분석 하였다.

2. 시험 및 분석

2.1 시험재료

2.1.1 골 재

본 연구에서 사용한 굵은골재와 잔골재는 각각 쇄석과 하천사를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.1.2 시멘트 및 폐석고

본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 현재 토양 개량용으로 주로 이용되고 있는 부산석고를 폐석

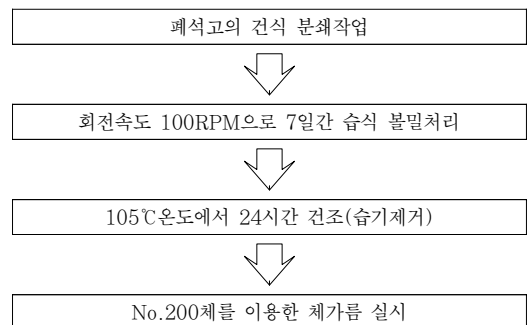


Fig. 1 볼밀 처리 과정



Fig. 2 볼밀 처리 광경

Table 2 OPC 및 폐석고의 물리·화학적 특성

종류	화학 성분(%)						비중
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
OPC	27.64	4.53	4.48	56.46	1.82	2.2	3.15
NBG*	2.66	2.32	2.32	67.72	0.62	45.8	1.30
BG**	3.73	3.17	3.96	61.57	1.22	40.7	1.30

NBG* : 볼밀 처리 전 폐석고

BG** : 볼밀 처리 한 폐석고

고로 사용하였다. 폐석고는 볼밀처리 전 건식 분쇄하였으며 볼밀 처리 이후에는 24시간 건조한 후 No. 200체를 이용한 체가름을 실시하였다. 폐석고의 볼밀 처리 과정 및 광경은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같으며 또한 OPC와 볼밀처리 전·후 폐석고의 물리·화학적 특성은 Table 2에 나타내었다.

2.2 배합설계

본 연구에서 폐석고의 대체율은 시멘트 사용량의 0, 5.0, 7.5, 10.0 및 12.5%로 하였는데, 폐석고에 관련된 기존 선행연구 결과(안양진 외, 2004), 일반적인 적정 대체율은 약 7.5% 정도로 알려져 있으며 본 연구에서는 이를 참고로 하여 7.5%를 중심으로 최대 12.5%까지 대체율을 변화시켜가면서 실험하였다. 한편, 콘크리트 시험체의 설계기준강도는 24.0 MPa로 설정하였으며 배합 설계표는 Table 3과 같다

Table 3 배합 설계표

종류	W/B (%)	S/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	단위 중량(kg/m ³)				
					폐석고	C	W	S	G
OPCC					0	334	160	692	1084
NBG-5.0C					17	317	160	685	1072
NBG-7.5C	48	40	8±2	5±1	25	309	160	681	1066
NBG-10.0C					33.4	300.6	160	677	1060
NBG-12.5C					41.8	292.2	160	673	1053
BG-5.0C					17	317	160	685	1072
BG-7.5C					25	309	160	681	1066
BG-10.0C	48	40	8±2	5±1	33.4	300.6	160	677	1060
BG-12.5C					41.8	292.2	160	673	1053

2.3 XRD 및 SEM 시험

폐석고의 대체율에 따른 포졸란 반응을 분석하기 위하여 OPC 콘크리트 및 폐석고를 대체한 콘크리트에 대하여 XRD(X-Ray Diffractometer)를 이용하여 구성 성분을 분석하였다. 또한 SEM(Scanning Electron Microscope)촬영으로 OPC콘크리트 및 폐석고를 대체한 콘크리트의 내부 형상을 확인하였으며 각각의 측정 광경은 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.



Fig. 3 XRD 시험 광경



Fig. 4 SEM 촬영 광경

2.4 압축강도시험

콘크리트의 압축강도는 $\Phi 100 \times 200$ mm 원주형 시험체를 제작하여 KS F 2405에 따라, $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 28일간 수중양생한 후 3회 측정하여 그 평균값을 구하였으며 측정 광경은 Fig. 5와 같다.



Fig. 5 압축시험 광경

2.5 활열인장강도시험

콘크리트의 활열인장강도는 $\Phi 100 \times 200$ mm 원주형 시험체를 제작하여 KS F 2565에 따라, $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 28일간 수중양생한 후 3회 측정하여 그 평균값을 구하였다. 측정 광경은 Fig. 6과 같다.

2.6 분말도 시험

폐석고의 분말도는 KS L 5106의 시멘트 분말도



Fig. 6 활열인장시험 광경

시험방법에 의거 실시하였으며 측정광경은 Fig. 7과 같다. 일반적으로 시멘트 분말도시험은 체분석법, 피크노메타법 및 브레인법 등이 있으며 본 연구에서는 간편하면서도 신뢰성이 높은 브레인법을 이용하여 폐석고의 분말도를 측정하였다.

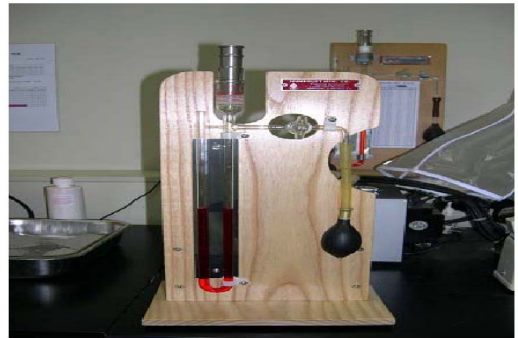


Fig. 7 분말도시험 장치(Blaine법)

3. 시험결과 및 고찰

3.1 XRD 및 SEM분석

폐석고의 혼입에 따른 포졸란 반응을 고찰하기 위하여 OPC콘크리트와 불밀 전·후의 폐석고를 시멘트 사용량의 각각 5.0, 7.5, 10.0 및 12.5% 대체한 콘크리트 시험체를 제작하여, XRD분석을 실시한 결과는 각각 Table 4 및 Table 5와 같고, 이를 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다.

Table 4. OPC 및 NBGC의 XRD 결정 피크치

시험체	Ca(OH) ₂	C-S-H	C ₃ S	C ₂ S
OPCC	1160	1360	600	340
NBG-5C	1570	1550	560	300
NBG-7.5C	1860	1200	580	270
NBG-10.0C	2150	1150	450	420
NBG-12.5C	2300	1100	380	257

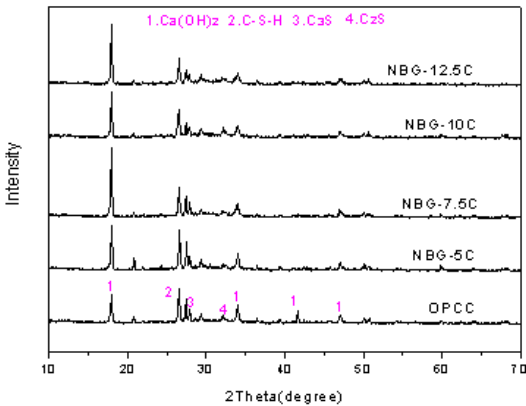


Fig. 8 불밀처리 전 폐석고 콘크리트(NBGC)의 XRD 분석 결과

XRD분석 결과로 부터 불밀처리 전·후의 폐석고를 각각 대체한 콘크리트의 각 성분의 결정피크가 거의 유사하게 나타나 불밀처리가 폐석고의 성분의 결정형성에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다. 또한 불밀처리 여부에 관계없이 폐석고의 대체율이 증가할수록 C-A계인 Ca(OH)₂의 결정피크가 증가하였는데 그 증가율은 대체율이 12.5%인 경우 OPCC 보다 약 2 배정도로 가장 크게 나타났다. 그러나 칼슘실리케이트 수화물인 C-S-H계는 대체율 5%인 경우만 약간 증가하였으며 이 후 대체율이 증가할수록 감소하였다.

이러한 결과로부터 폐석고를 시멘트 대체재로 활용할 경우 C-A계의 활성화를 통해 초기의 수화반응을 촉진하여 강도의 향상을 기대 할 수 있으나, C-S-H 계는 별다른 활성화 반응이 나타나지 않아 포졸란 반응으로 인한 장기강도 증진에는 효과가 없는 것으로 판단된다.

Table 5 OPC 및 BGC의 XRD 결정 피크치

시험체	Ca(OH) ₂	C-S-H	C ₃ S	C ₂ S
OPCC	1160	1360	600	340
BG-5C	1630	1600	660	270
BG-7.5C	1910	1250	430	300
BG-10.0C	2360	1200	460	300
BG-12.5C	2490	1140	380	250

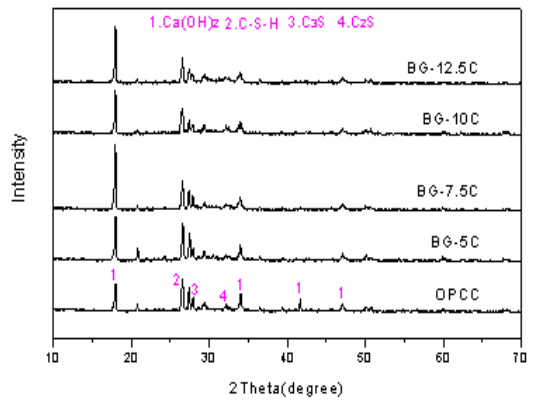


Fig. 9 불밀처리 후 폐석고 콘크리트(BGC)의 XRD 분석 결과

한편 OPCC, NBG-7.5C 및 BG-7.5C의 SEM촬영 결과는 각각 Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12와 같으며, 이들을 고찰한 결과 OPC콘크리트에 비해서 폐석고를 대체한 콘크리트의 공극이 보다 더 밀실 하였으며, 특히 불밀 처리한 폐석고를 대체한 콘크리트가

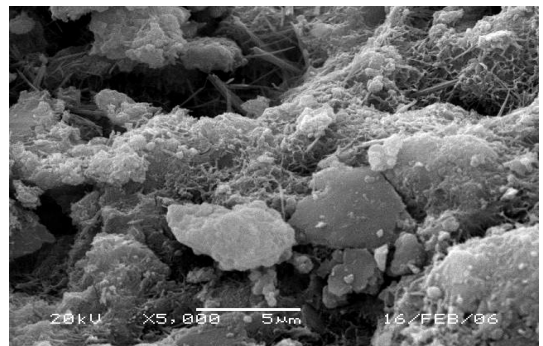


Fig. 10 OPCC의 SEM 사진(검은 부분 : 공극)

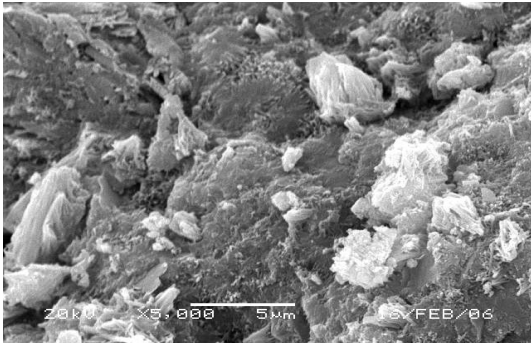


Fig. 11 NBGC의 SEM 사진(검은 부분 : 공극)

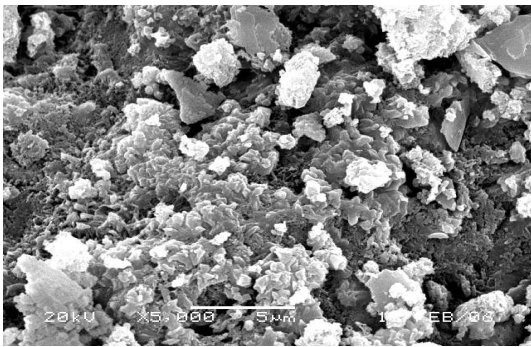


Fig. 12 BGC의 SEM 사진(검은 부분 : 공극)

더욱 더 밀실한 것으로 나타나 불밀처리가 콘크리트를 밀실하게 하는데 효과적임을 알 수 있었다.

3.2 압축강도

폐석고의 대체율에 따른 콘크리트의 압축강도 측정 결과는 Table 6 및 Fig. 13에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 불밀처리 여부에 관계없이 폐석고 대체율 10.0%까지는 OPC콘크리트보다 압축강도가 증가하였으나, 대체율이 12.5%인 경우에는 감소되는 경향을 나타내고 있어 압축강도 증진 측면에서 폐석고의 적정대체율은 7.5%~10.0% 정도로 판단된다. 또한 불밀처리한 경우가 처리하지 않은 경우보다 모든 대체율에서 압축강도가 높게 나타나 불밀처리의 효과를 알 수 있었다. 이러한 현상은 불밀처리 시 폐석고 입자의 분쇄로 인한 분말도 향상으로 수화반응이 보다 더 활성화 되었기 때문이라고 판단된다.

Table 6 압축강도 결과

종류	폐석고의 대체율	압축강도 (MPa)	상대 압축강도비 (%)
OPCC	0%	25.94	1.00
NBGC	5.0%	27.16	1.05
	7.5%	28.47	1.11
	10.0%	26.85	1.04
	12.5%	23.89	0.92
BGC	5.0%	28.99	1.12
	7.5%	29.94	1.15
	10.0%	28.47	1.10
	12.5%	25.90	0.99

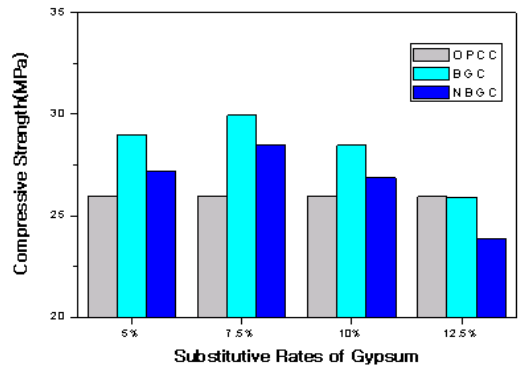


Fig. 13 각 시험체의 압축강도 경향

3.3 활열인장강도

폐석고의 대체율에 따른 활열인장강도의 측정결과를 Table 7 및 Fig. 14에 나타내었다. 활열 인장강도

Table 7 활열인장강도 결과

종류	폐석고의 대체율	활열인장강도 (MPa)	상대 강도비 (%)
OPCC	0%	3.82	1.00
NBGC	5.0%	4.48	1.17
	7.5%	4.34	1.14
	10.0%	3.98	1.04
	12.5%	3.48	0.91
	12.5%	3.48	0.91
BGC	5.0%	4.77	1.25
	7.5%	4.85	1.27
	10.0%	4.07	1.07
	12.5%	3.70	0.97

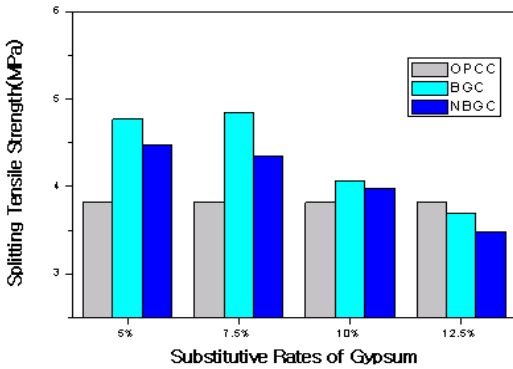


Fig. 14 각 시험체의 할열인장강도 경향

또한 폐석고 대체율의 증가에 따라 증진되었으나, 10.0%를 초과하게 되면 OPC콘크리트와 비교하여 감소되었다. 이러한 결과로부터 폐석고의 적정대체율은 7.5~10.0%로 판단된다.

3.4 폐석고의 분말도시험

폐석고의 분말도시험 결과는 Table 8과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 폐석고의 분말도는 불밀처리의 실시 여부에 따라 차이가 있었으며, 특히 불밀처리를 한 경우 입자의 분쇄로 분말도가 크게 나타났다. 일반적으로 분말도가 클수록 혼합시 접촉 면적이 크기 때문에 수화작용이 원활하여 강도의 증진을 나타낸다. 따라서 불밀처리를 실시한 폐석고는 처리 전 보다 분말도가 증가 되므로 강도 발현에 유리하며 이 결과는 압축강도 및 할열 인장강도의 시험결과에서 확인 할 수 있었다.

또한 대체율이 동일한 경우 불밀 처리한 시험체의 압축강도가 불밀처리 하지 않은 경우보다 약 7.0%정도 증가한 것으로 나타나 불밀처리 공정에서 소요되는 시간과 경비를 고려할 때 현 단계에서의 불밀처리의

Table 8 분말도시험 결과

종류	블레인 값(cm ² /g)
OPC	3,360
NBG	2,673
BG	4,500

실시는 경제적이지 못할 것으로는 판단되나, 향후 폐석고를 활용한 콘크리트가 실용화 되어 대량으로 소요 될 경우는 불밀을 이용한 폐석고의 전처리는 유용한 방법이 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 불밀 처리 전·후의 폐석고를 시멘트 대체재로 활용한 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 XRD, SEM분석 및 역학적 시험결과를 비교·고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폐석고의 활용은 콘크리트의 C-A계를 활성화시켜 수화반응의 촉진효과가 있었으나, C-S-H계의 활성화는 오히려 감소하여 장기강도의 발현은 기대할 수 없을 것으로 판단된다.
- 2) 불밀처리한 폐석고의 분말도가 OPC보다 크게 개선되어, 불밀처리한 폐석고를 활용한 콘크리트의 강도개선에 효과적임을 알 수 있었다.
- 3) 압축 및 할열인장강도는, 폐석고 대체율의 증가에 따라 증가하였으나, 대체율이 10.0%를 초과 하게 되면 오히려 OPC 콘크리트보다 감소하므로 강도 개선 측면에서 폐석고의 적정대체율은 7.5~10.0% 정도로 판단된다.

본 연구 결과, 폐석고를 불밀처리하여 시멘트 사용량의 7.5~10.0% 정도를 대체 활용할 경우 OPC 콘크리트와 동등의 품질의 발현이 가능하여 폐석고는 시멘트의 대체재로 활용이 가능하다고 판단된다.

참고문헌

1. 배국진, "부산석고의 발생 및 재활용 동향", 산업기술정보원, 1998.
2. 오영인, 김광일, 신은철, "폐석고를 활용한 성토매립지반의 지반공학적 특성 및 환경적 영향분석", 대한토목학회 21권 1-C, 2001, pp 19-26.
3. 주재우, 박종범, 박현수, "토목재료로서 폐석고 이용 가능성 연구", 대한토목학회, 2001.
4. 안양진, 소양섭, "폐인산석고를 혼합한 모르타르의 압축강도 특성" 한국폐기물학회, 2004.
5. 안양진, 문경주, 송훈, 소양섭, "폐인산석고를 증기양

-
- 생용 혼화제로 이용한 고강도 콘크리트의 압축강도 특성”, 한국폐기물학회, 2004.
6. 김기형, 최재진, 최연왕, “플라이 애시 및 석고를 활용한 고강도 콘크리트의 성능개선”, 한국콘크리트 학회, 1999.
7. 이의학, 전준영, 김진욱, 유창진, “석고형태 및 첨가량이 시멘트 경화체의 품질에 미치는 영향성 검토”, 한국양회공업협회 시멘트화학.
8. Manjit Singh, Mridul Garg, “Study on anhydrite plaster from waste phosphogypsum for use in polymerised flooring composition”, Construction and Building Materials 19, 2005, pp. 25-29.
- (접수일자 : 2006년 5월 26일)