

순환골재 콘크리트의 염화물 확산성에 관한 연구

A Study on the Chloride Diffusivity of Recycled Aggregate Concrete

배종민* 김영수**

Bae, Jong-Min Kim, Young-Su

Abstract

Recycling demolished concrete as an alternative source of coarse aggregates for the production of new concrete can help solve the growing waste disposal crisis and the problem of depleted natural aggregates.

The purpose of this study is to investigate chloride migration of recycled aggregate concrete containing pozzolanic materials by chloride migration coefficient. The specimens were made with recycled coarse aggregate as various replacement ratio(10, 30, 50%) and metakaolin, blast furnace slag, fly ash is replaced for recycled concrete with mixing ratio 20%. The major results are as follows. 1) Compressive strength of recycled aggregate concrete containing pozzolanic materials increase as curing age and chloride migration decrease. 2) When the replacement ratio of recycled coarse aggregate is 30%, the chloride migration coefficient of recycled concrete containing blast furnace slag, metakaolin shows the similar or lower value than plain concrete at all ages.

키워드 : 순환굵은골재, 염화물 확산성, 내구성, 치환율

Keywords : recycled coarse aggregate, chloride migration, durability, replacement ratio

1. 서론

국내 건설사업의 지속적인 성장과 더불어 주거환경개선을 위한 재건축, 재개발 사업의 활성화 등으로 인해 1990년대부터 건설폐기물의 발생이 급증하였다. 건설폐기물 중 약 70%를 차지하는 폐콘크리트는 재활용 가능성을 인정받고 있으며¹⁾, 특히 부족한 국내의 골재 수급 현황을 고려할 때 적극적인 활용노력이 요구되고 있다.

그러나 폐콘크리트로부터 생산된 순환골재의 품질은 콘크리트용 골재보다 저하되는 경향이 있기 때문에 주요 건설재료로 사용하기에는 한계가 있다.²⁾ 이를 개선하지 않고 콘크리트의 재료로 활용할 경우 콘크리트의 역학적 성능 또는 내구성능 등에서 문제점이 발생하게 된다.^{3),4)}

일반적으로, 콘크리트의 전체 체적에 대하여 골재는 대략 75% 정도로 차지하는 비율이 높기 때문에, 콘크리트의 내구성에 미치는 영향이 크다. 지금까지의 순환골재에 관한 대부분의 연구는 순환골재의 표면에 부착되어 있는 오래된 모르타와 골재내부의 공극량, 그리고 이러한 순환골재가 사용된 콘크리트의 역학적 성능에 관한 실험^{5),6)}이었다. 순환골재 콘크리트의 내구성을 다루는 논문은 부

족한 실정이기 때문에 순환골재의 단점인 콘크리트의 내구성 저하에 대한 연구를 실시하여, 순환골재의 사용량을 증가시키는 방안을 제시하고자 한다. 콘크리트의 염화물 확산계수는 콘크리트의 내구성을 설명하는 기본적인 매개변수로서, 염화물 확산성을 정량적으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 파쇄된 순환굵은골재의 치환율과 혼화재의 종류를 달리하여 압축강도, 염화물 확산계수 실험을 하고, SEM촬영을 통한 미세구조를 관찰함으로써 순환골재 콘크리트의 염화물 확산성에 대한 기초적인 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

- 1) 박영신 외 3인, 재생골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 제23권 제1호, pp.239~242, 2003.4
- 2) 최수일 외 15인, 폐콘크리트의 재활용기술 개발방안에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 1996
- 3) 이세현 외 1인, 고강도 영역의 재생골재 콘크리트의 물리적 특성, 한국콘크리트학회 논문집, 제16권 제6호, pp.575~583, 2001.12
- 4) 김진만 외 1명, 콘크리트의 리사이클링, 한국콘크리트 학회지, 제15권 제2호, pp.14~83, 2003.2.
- 5) Tsung-Yueh Tu, Properties of HPC with recycled aggregates, Cement and concrete research vol.36, pp.943~950, 2006.5
- 6) 지상규 외 5인, 순환골재 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제27권 제1호, pp.607~612, 2007.10

* 부산대학교 건축공학과 석사과정

** 부산대학교 건축공학과 정교수, 공학박사

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

순환굵은골재를 사용한 콘크리트의 염화물 확산성을 검토하기 위해, 순환골재의 치환율과 혼화재의 종류를 주요 실험인자로 선정하여 염화물 확산계수 실험을 실시하였다. 염화물의 이동에 대한 콘크리트의 저항성을 설명하는 기본적인 매개변수인 염화물 확산계수를 측정함으로써, 염화물의 확산성을 정량적으로 나타내었다.

순환골재 콘크리트와 플레인 콘크리트를 비교하기 위하여 순환골재의 치환율을 10%, 30%, 50%로 달리하고, 순환골재 치환율 30%, 50%에서는 시멘트 단위질량에 대해 각 혼화재를 20% 치환하여 시편을 제작하였다.

본 실험에 사용된 배합설계안의 설계강도는 27MPa이며, 목표슬럼프는 150±25mm, 목표 공기량은 4.5±1.5%로서 실험인자 및 평가항목은 표 1과 같으며, 배합상세는 표 2와 같다.

표 1. 실험인자 및 평가항목

실험인자	순환굵은골재 치환율 (%)	10, 30, 50
	메타카올린 치환율 (%)	20
	고로슬래그 치환율 (%)	20
	플라이 애쉬 치환율 (%)	20
평가항목	재령 (일)	7, 14, 28, 56
	슬럼프, 공기량, 고성능감수제 첨가량	굳지않은 콘크리트
	압축강도	재령별 압축강도
	염화물 확산계수	재령별 염화물 확산계수
	미세구조 관찰 (S.E.M)	재령 56일

표 2. 콘크리트의 배합설계

시험체	W/B (%)	s/a (%)	단위질량(kg/m³)									고성능 감수제 (%)
			W	C	MK	BS	FA	G	RA	S		
Plain	45	45	175	388	-	-	-	983	-	789	0.6	
R10								885	88		0.5	
R30								688	264		0.45	
R50				491	440	0.4						
R30MK				310	78	-	-	682	261	782	0.9	
R50MK								487	436		0.8	
R30BS				310	-	78	-	685	263	786	0.7	
R50BS								489	438		0.65	
R30FA				310	-	-	78	678	260	778	0.55	
R50FA								484	443		0.5	

주) R10(30,50) MK(BS,FA)

MK:메타카올린, BS:고로슬래그, FA:플라이 애쉬
순환굵은골재(RA) 치환율

2.2 사용재료

2.2.1 결합재

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5102 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 각 결합재의 화학적 성분과 물리적 특성은 표 3과 같다.

표 3. 결합재의 물리적 특성과 화학적 성분

성분 (%)	시멘트	메타카올린	고로슬래그	플라이 애쉬
SiO ₂	20.68	53.0	32.28	61.20
Al ₂ O ₃	5.51	42.0	13.3	24.92
Fe ₂ O ₃	3.10	3.0	42.35	4.63
CaO	62.28	1.2	6.18	1.82
MgO	3.38	0.6	0.39	0.62
SO ₃	2.56	-	3.15	-
분말도(cm ² /g)	3,268	10,000	6,192	4,847
밀도(g/cm ³)	3.15	2.52	2.8	2.25

2.2.2 골재

골재는 표준 입도 범위 안에 들도록 조정하였다. KS F 2573의 규정에 의하면 본 실험에 사용된 순환굵은골재는 제2종에 해당되며, 잔골재는 강사를 사용하였다. 각각의 골재에 대한 물리적 특성은 표 4와 같다.

표 4. 골재의 물리적 특성

골재 종류	굵은 골재	순환굵은골재	잔골재
최대입경 (mm)	25	25	5
조립율 (FM)	6.9	7.43	2.85
밀도 (g/cm ³)	2.66	2.38	2.61
흡수율 (%)	1.33	4.37	2.32
단위용적중량 (kg/m ³)	1,700	-	1,750

2.2.3 혼화제

본 실험에 사용된 고성능 감수제의 물리적 성질은 표 5와 같으며, 목표슬럼프 150±25mm를 확보하기 위하여 결합재의 단위질량에 대해 0.45~0.9%를 첨가하였다.

표 5. 혼화제의 물리적 특성

혼화제의 종류	고성능 감수제
색상	암갈색
밀도 (g/cm ³)	1.21 ± 0.05
상태	액체

2.3 실험방법

2.3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

굳지않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 슬럼프 시험은 KS F 2402의 규정을 따르고, 공기량 시험은 KS F 2421에 따라 실시하였으며, 목표 슬럼프 및 공기량을 확보하기 위한 고성능 감수제의 사용량을 측정하였다.

2.3.2 압축강도

경화 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법 규정”에 따라 실시하였다. 각 재령에 따라 시편을 그라인딩식 캐핑머신으로 2mm 내외의 표면연마를 통한 상부 캐핑 작업을 행한 후, 최대 용량 200t의 만능 재료 시험기 (Universal Testing Machine:UTM)를 이용하여 측정하였다.

2.3.3 염화물 확산계수

염화물 확산계수는 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체의 일정 부위를 다이아몬드 커터기를 이용해 50mm 두께로 절단하여 염화물 확산계수 실험용 시험체를 제작한 후, 유럽의 NT BUILD 492 규준에 따라 측정하였다.

2.3.4 콘크리트의 미세구조 관찰

각 배합에 대한 콘크리트의 미세구조를 관찰하기 위해 지름 5mm, 길이 10mm의 시편을 채취하고 HITACHI S-4200을 이용해 배율을 3,000배로 확대하여 콘크리트의 미세구조를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

그림 1에 목표 슬럼프 150±25mm를 얻기 위한 각 배합에 따른 고성능감수제의 첨가량과 슬럼프를 나타내었다. 순환골재의 치환율이 높을수록 고성능감수제의 첨가량이 감소하였는데, 이는 기존의 연구결과⁷⁾와 유사하게 본 실험에 사용된 순환골재의 입형이 폐콘크리트 파쇄과정에서 쇄석보다 구형에 가까워졌기 때문으로 판단된다. 그리고 순환골재 콘크리트에 메타카올린, 고로슬래그와 같은 혼화재를 혼입하면 고성능 감수제 첨가량이 증가하였으며, 분말도가 높은 메타카올린의 경우 고성능 감수제의 사용량이 0.8~0.9%로 가장 높게 측정되었다.

굳지않은 콘크리트의 공기량은 순환골재의 치환율이 높을수록 약간 증가하는 것으로 나타났으며, 모든 배합설계안에 대하여 목표

공기량 4.5±1.5%를 잘 만족시키고 있다.

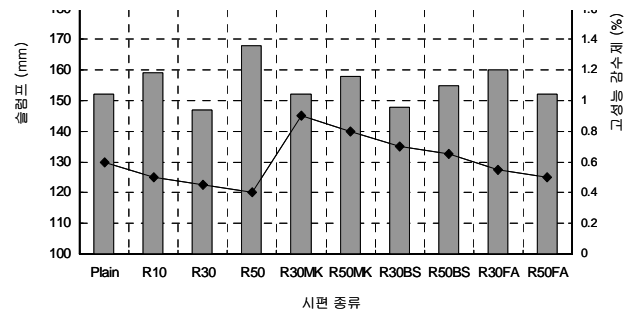


그림 1. 슬럼프 측정결과 및 고성능 감수제 첨가량

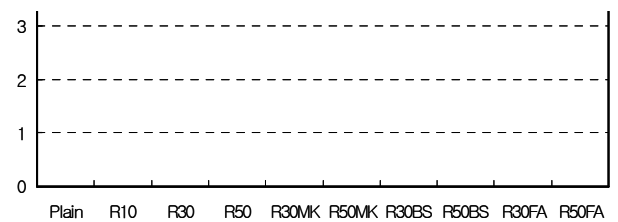


그림 2. 굳지않은 콘크리트의 공기량 측정 결과

3.2 경화 콘크리트의 압축강도

콘크리트의 재령별 압축강도를 그림 3에 나타내었다. 순환골재의 치환율이 10%, 30%, 50%로 증가할수록, 재령 56일 압축강도는 플레인 콘크리트에 비해 각각 92.7%, 87.2%, 76.8%의 수준으로 저하되었다. 이는 기존의 연구결과⁸⁾와 유사하게 폐콘크리트 파쇄시 충격으로 인해 골재에 미세한 균열이 발생하고, 흡수율이 높은 모르타가 골재표면에 다량으로 포함되어 골재와 모르타의 부착강도 또는 골재 계면과의 결합력이 낮아졌기 때문으로 판단된다.

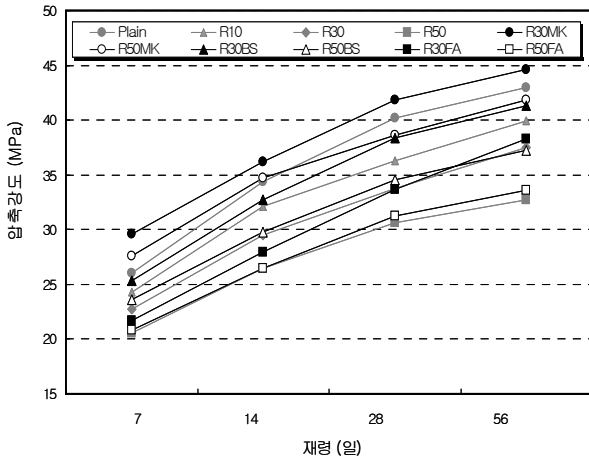
이와 같이 순환골재 콘크리트의 강도저하를 보완할 목적으로 혼화재를 시멘트 단위질량에 대해 20% 혼입한 순환골재 콘크리트와 플레인 콘크리트의 압축강도를 비교하였다. 순환골재 치환율이 30%인 경우 메타카올린을 혼입하면, 모든 재령에서 플레인 콘크리트의 압축강도보다 높은 결과가 나타났다. 고로슬래그와 플라이 애쉬의 경우에는 각각 41.3MPa, 38.3MPa로 플레인 콘크리트보다 낮게 측정되었다. 순환골재를 50% 치환한 경우, 재령 14일까지는 메타카올린을 혼입한 순환골재 콘크리트의 강도가 플레인 콘크리트를 상회하였으나, 그 이후에는 낮은 결과를 보였으며, 고로슬래그 및 플라이 애쉬를 사용한 경우에는 모든 재령에서 플레인 콘크리트보다 낮게 나타났다.

순환골재의 치환율이 동일할 때, 메타카올린, 고로슬래그 및 플라이 애쉬를 치환한 경우에는 혼화재를 혼입하지 않은 경우에 비해 압축강도가 높게 나타났다. 이는 수화생성물 중 수산화칼슘과

7) K.K. Sagoe-Crentsil, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate" Cement and Concrete Research Vol.31, pp.707~712, 2001.5.

8) 정현수 외 2인, 순환골재 품질과 치환율이 콘크리트 역학적 특성에 미치는 영향, 대한건축학회 논문집 제22권 제6호, pp71~78, 2006.6

결합하는 포졸란 반응으로 인해 칼슘실리케이트 수화물이 생성되어, 순환골재 콘크리트의 내부구조가 밀실해진 것으로 판단된다. 특히 메타카올린은 모든 재령에 대하여 다른 혼화재에 비해 강도 발현율이 높은 경향을 보였는데, 순환골재 치환율이 30%인 경우 재령 56일 압축강도를 살펴보면, 메타카올린이 44.6MPa로 고로슬래그, 플라이 애쉬에 비해 각각 7%, 15% 높게 발현되었다.



시편 종류에 따른 재령별 압축강도

그림 3. 시편종류에 따른 재령별 압축강도

3.3 염화물 확산계수

순환골재의 치환율이 동일할 때, 모든 혼화재 혼입 콘크리트의 염화물 확산계수가 혼화재를 혼입하지 않은 경우보다 낮게 나타났다. 이는 포졸란 반응으로 생성된 칼슘실리케이트 수화물이 공극구조를 개선하여 염화물의 이동을 억제함으로써 침투성이 감소되었기 때문이다.

순환골재 치환율이 30%인 경우, 고로슬래그는 포졸란 반응에 의해 치밀한 조직구조를 형성하고, 재료적 특성인 염화물 이온 흡착⁹⁾에 의해 재령 28일까지 플레인 콘크리트와 유사한 수준을 나타내어 압축강도의 결과와는 다른 경향을 나타내었다. 그러나 재령 56일 염화물 확산계수는 $5.362 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 플레인 콘크리트보다 약간 높게 측정되었다. 메타카올린을 혼입한 경우에는, 플레인 콘크리트의 재령 56일 염화물 확산계수 값인 $4.358 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에 대하여 순환골재 치환율이 30%일 때는 플레인 콘크리트의 82%, 순환골재 치환율이 50%인 경우에는 106%의 수준을 보여, 110~147%의 범위로 나타나는 다른 혼화재에 비해 순환골재 콘크리트의 염화물 이온 침투작용을 억제하는 효과가 가장 우수하였다.

9) 유재강, 혼화재의 종류 및 치환율이 염수에 침지한 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관한 연구, 대우건설 기술연구소, pp.71~76, 2004

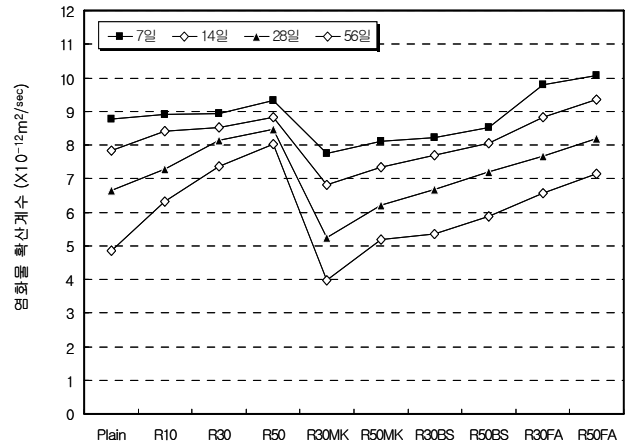


그림 4. 시편 종류에 따른 염화물 확산계수

그림 5는 재령 56일의 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계를 나타낸 것으로서, 압축강도가 증가함에 따라 염화물 확산계수는 감소하는 경향을 보였으며, 그 상관계수는 0.82 이상으로 높은 관련성을 보였다.

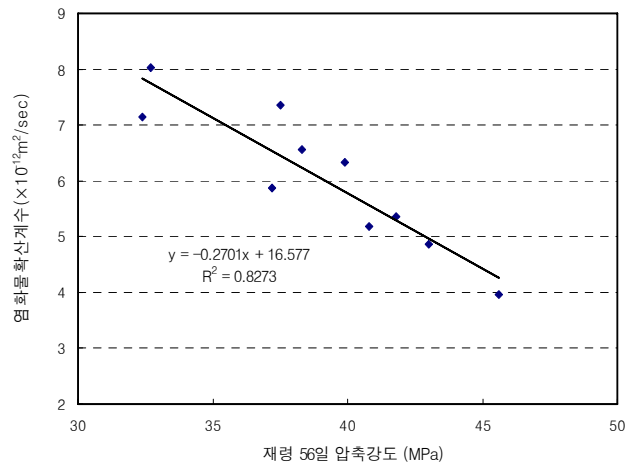


그림 5. 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계

3.4 콘크리트의 미세구조 관찰

그림 6은 재령 56일이 된 공시체로부터 미세구조 관찰을 위한 시편을 채취하고, 배율을 3,000배로 확대하여 콘크리트의 미세구조를 관찰한 것이다. 그림 6.(a)는 순환골재를 30% 치환한 콘크리트의 미세구조를 관찰한 것으로, 순환골재의 영향으로 인해 모르타르와 골재의 계면이 약화되어 균열이 많이 존재하고 있다. 그림 6.(b)는 플레인 콘크리트의 미세구조를 나타낸 것으로, 내부 공극이 존재함을 관찰하였다. 그림 6.(c)와 같이 순환골재 콘크리트에 고로슬래그를 혼입한 경우 내부구조가 밀실해졌으며, 메타카올린을 혼입하면 플레인 콘크리트 및 고로슬래그를 혼입한 경우에 비해 더욱 밀실한 미세구조가 형성되었음을 그림 6.(d)를 통해 관찰할 수 있다.

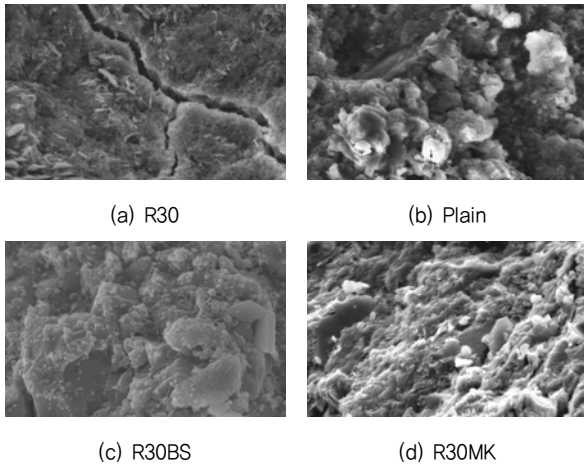


그림 6. 콘크리트의 미세구조 관찰 결과 (재령 56일)

- 4) 환골재를 치환한 콘크리트는 미세구조를 관찰해 보면 미세균열이 많이 존재하였으나, 순환골재의 단점을 보완하기 위하여 고로슬래그, 메타카올린과 같은 재를 혼입할 경우에는 포졸란 반응으로 인해 더욱 밀실한 미세구조가 형성되었음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 정재동, 재생골재 콘크리트의 강도발현특성 및 내구성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제20권 제9호, 2004
2. Neville, A.M, Properties of Concrete, Longman, 1995
3. P.K, Mehta, P.J.M, Monteiro, Concrete-Structure, Properties, and Materials, Prentice Hall, 1993

4. 결 론

본 연구에서는 순환골재 치환 콘크리트의 염화물 확산성을 평가하기 위하여 각 혼화재의 종류 및 순환골재의 혼입율에 따른 염화물 확산계수를 측정하여 정량적으로 규명하고, 굳지않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 및 고성능 감수제의 첨가량과 경화콘크리트의 압축강도를 측정함으로써 그 적용성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 순환골재의 입형이 쇄석보다 구형에 가깝기 때문에, 순환골재의 치환율이 증가할수록 굳지않은 콘크리트의 유동성이 개선되어 고성능 감수제의 첨가량이 감소하였으며, 혼화재를 혼입할 경우에는 목표 슬럼프를 얻기 위한 고성능감수제의 첨가량이 증가하였다.
- 2) 순환골재의 치환율이 증가할수록 플레인 콘크리트에 비해 압축강도가 저하되었으나, 혼화재를 혼입할 경우에는 순환골재 콘크리트의 강도를 증가시킬 수 있었다. 순환골재의 치환율이 30%일 때, 메타카올린을 20% 사용하면 플레인 콘크리트의 강도보다 높은 결과를 보여 다른 혼화재에 비해 순환골재 콘크리트의 강도향상에 효과적이었다.
- 3) 순환골재를 사용하면 염화물 확산계수가 플레인 콘크리트에 비해 높아지는 경향이 나타났다. 순환골재를 30% 치환하고, 이러한 순환골재의 단점을 보완하기 위하여 혼화재를 20% 혼입한 경우, 메타카올린을 사용하면 플레인 콘크리트에 비해 낮은 염화물 확산계수를 보여 염화물 침투작용의 억제효과가 가장 우수하였다. 고로슬래그를 혼입한 경우 플레인 콘크리트와 유사한 결과를 보였으며, 플라이 애쉬의 경우에는 플레인 콘크리트보다 높은 결과를 나타내어 적절한 혼화재를 사용할 경우에는 순환골재의 치환율을 증가시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.