

포러스(POROUS) 콘크리트의 연구동향과 적용사례

The Research Trends and Applications of Porous Concrete



박 상 준*

*KinjoGakuin University 환경디자인학과 전임강사

1. 서 론

지구의 온난화와 관련된 것으로 보이는 기후변화와 사막화 등으로 인하여 지구 규모의 환경문제에 대한 의식도 높아진 가운데, 도시개발 분야에 있어서도 자연 환경과 건축 구조물과의 조화를 중시하는 경향이 높아지고 있다. 이러한 움직임은 정부의 저탄소 녹색정책과 도시경관 향상을 전제로 하는 도시지역 개발이 진행되고 있으며, 자연환경과 건축 구조물과의 조화도 요구되고 있다. 특별히 친환경 재료분야에 있어서는 환경 콘크리트로 주목을 받아 온 것이 입자가 연속적인 공극을 가지고 투수성(透水性)과 투기성(透氣性)이 우수한 특성을 가지는 포러스(POROUS) 콘크리트이다.^{1),2)}(그림 1참조)

포러스 콘크리트는 ECO-콘크리트의 하나로 식물양성, 수질정화, 생물의 은신처 등의 기능에 사용되고 있다. 포러스 콘크리트의 배합상의 특징은, 보통 콘크리트에 비하여 물시멘트비가 작은 것과 세골재를 거의 사용하지 않고, 공극을 확보하기 위하여 단일 입도의 조골재를 사용한다는 것이다. 최근 현장에 적용되고 있는 포러스 콘크리트는 고성능 AE감수제 등을 사용하여 물시멘트비를 감소(W/C=30%이하)시켜 강도와 내구성을 개선한 경우가 많다.

본 기사에서는 포러스 콘크리트에 사용되는 재료에 대하여 최근의 연구동향을 소개함과 동시에 대표적인 역학적인

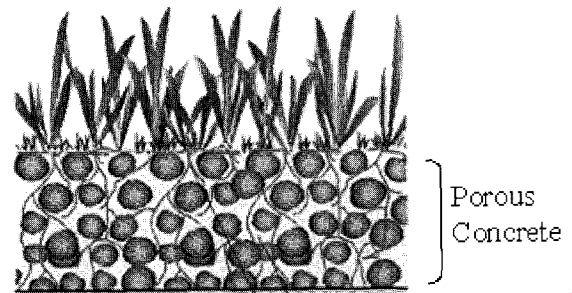


그림 1 포러스 콘크리트 이미지

특성에 대하여 정리하였다. 또한, 포러스 콘크리트의 현장 적용사례를 소개하고 향후의 과제를 논의하고자 한다.

2. 포러스 콘크리트 사용재료

본 장에서는 포러스 콘크리트에 사용되는 주요 재료의 성질에 대하여 소개하고자 한다. 포러스 콘크리트의 물리적 성질은 결합재의 성상, 조골재의 종류 및 입경 등 사용 재료의 성질에 좌우된다. 다음으로 사용 재료에 대한 최근의 연구동향을 정리하였다.

2.1 결합재

포러스 콘크리트 결합재로는 보통 포틀랜드 시멘트가 사

용되는 경우가 많지만, 최근 환경문제 관점에서 CO₂경감을 위하여 조강 포틀랜드 시멘트를 사용하거나 녹화를 목적으로한 저 알칼리성 고로시멘트 등을 사용하기도 한다.^{3),4)} 또한, 최근 결합재에 관하여는 여러 분야에서 사용되는 산업 폐기물 등을 유용하게 이용하고 천연자원을 보존하는 목적으로 다각도 연구가 진행되고 있다.⁵⁾

2.2 골재

포러스 콘크리트는 사용조건에 따라 필요 공극률이 요구되며, 조골재는 포러스 콘크리트의 성질을 결정하는 중요한 요소가 된다. 일반적으로 수질정화와 녹화를 목적으로 사용되는 단일 입도의 조골재는 약 13~20mm(그림 2a), 주차장과 보도 등에 사용되는 조골재는 2.5~5mm(그림 2b)정도 범위의 것이 많다.

조골재의 종류로는 경질 사암과 석회석을 사용하는 경우가 많지만, 최근에는 사용 목적에 따라 차음성이 요구되는 곳에는 경석을 사용한 연구사례와 녹화에 필요한 보습성을 확보가 요구되는 곳에는 벤토나이트 골재를 사용한 연구사례도 있다. 또한, 친환경 정책에 따른 흐름으로 재생 골재를 사용한 연구가 주목을 받고 있다.^{6),7)}

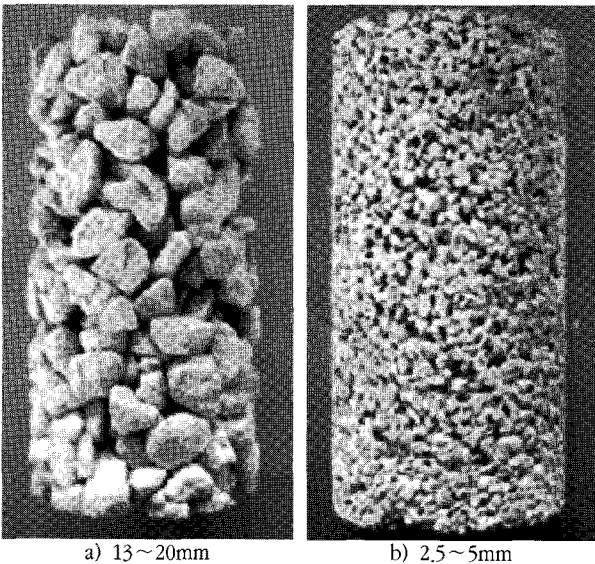


그림 2 포러스 콘크리트에 사용되는 골재의 예

2.3 혼화재료

혼화재료는 시멘트, 물, 골재 이외의 재료로써 배합 할 경우 계획적으로 콘크리트의 1성분으로 첨부하는 것을 말한다. 혼화재료는 콘크리트의 각종 성질을 개선하거나 필요에 따라 새로운 성질을 부여하는 목적으로 배합되기도 한다.

일반적으로 사용량이 비교적 많고 그 자체가 콘크리트 용적에 가산되는 것이 혼화재(混和材)로, 약제로서 적은량이 첨부되는 것이 혼화제(混和劑)로 구분되고 있다. 여기서는 포러스 콘크리트에 관련된 부분의 연구를 소개하고자 한다.

2.3.1 혼화제

최근 자원에너지 절약의 관점에서 산업 폐기물을 혼화제로 사용되는 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 수산화칼슘 저감과 해수 저항성 향상을 목적으로 실리카흄 (Silica fume)과 고로슬래거 미분말을 혼화제로 사용한 연구가 많다. 또한, 수질 정화기능 향상을 목적으로한 고로슬래그, 제오라이트 (ZeoLite)를 사용한 연구와 페이스트 (paste)의 점성을 증대 할 목적으로 시멘트 광물의 미분말을 혼화제로 사용한 연구 등이 있다.⁸⁾

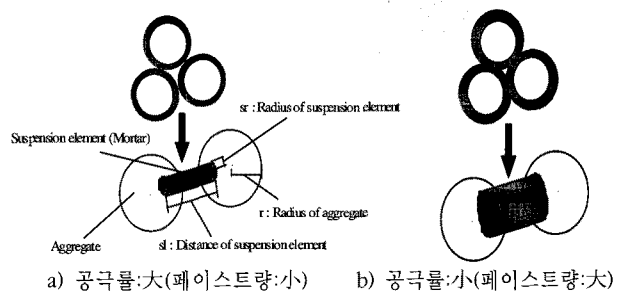
2.3.2 혼화제

포러스 콘크리트는 상당히 물시멘트비가 낮으므로 시멘트 페이스트 또는, 몰탈을 사용하는 경우가 많으며, 시공성의 확보를 위하여 고성능 AE감수제의 사용이 일반적이다. 또한, 증점제(增粘劑)를 사용하여 페이스트 두께를 확보함으로써 인장강도와 휨강도를 증대한 연구사례도 보고되고 있다.⁹⁾

3. 포러스 콘크리트의 역학적 성상

포러스 콘크리트의 역학적 특성으로는 일반적인 경화 콘크리트와 동일하게 압축강도, 인장강도, 휨강도, 탄성계수, 부착강도 등과 함께 고유의 성질인 공극률과 투수성 계수 등이 검토된다. 본 기사에서는 일반적인 경화 콘크리트와 현저히 차이가 있는 포러스 콘크리트의 역학적 특성에 대하여 필자가 실시한 해석과 실험을 중심으로 소개를 하고자 한다.

필자는 수치해석 기법으로 콘크리트 파괴해석에 적용한 점탄소성 서스펜션 요소법(VEPSEM : Visco-Elastoplastic Suspension Element Method) 프로그램을 포러스 콘크리트



a) 공극률:大(페이스트량:小) b) 공극률:小(페이스트량:大)

그림 3 포러스 콘크리트의 모델화

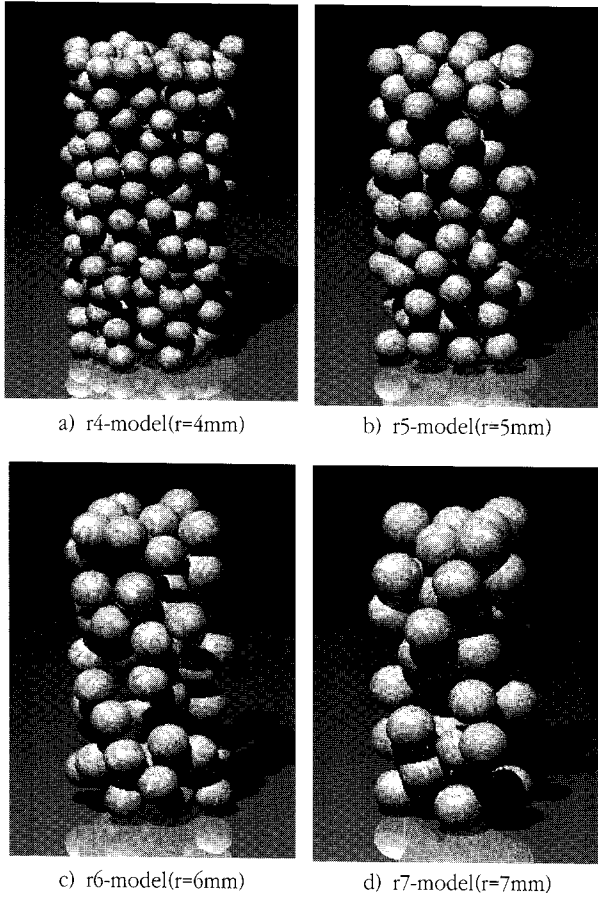


그림 4 해석 모델

표 1 해석 상의 입력변수

$\tan\phi$	Ft	Em	n	v	H	W
0.2	3, 4, 5	11	0.5	0.8	100	50

[Notes] $\tan\phi$: Coefficient of internal friction,
 Ft : Pure tensile strength(MPa),
 Em : Elastic modulus(GPa),
 n : Viscosity(MPa · s),
 v : Lading rate(mm/s),
 H : Height of specimen(mm),
 W : Width of specimen(mm)

표 2 해석 모델의 입력변수

	r	N	Ag	sd	sn	sl
r4-model	4.0	230	61660	8.0	1835	7389
r5-model	5.0	116	60740	8.0	643	2314
r6-model	6.0	69	62430	8.0	288	884
r7-model	7.0	42	60340	8.0	152	443

[Notes] r : raius of aggregate(mm),
 N : Number of aggregate,
 Ag : Volume of aggregate(mm³),
 sd : Limitation distance of coarse aggregate for construction of suspension element(mm),
 sn : Nunber of suspension elements,
 sl : Total distance of suspension element(mm)

파괴해석에 적용하였다. 또한, 해석결과와 실험결과를 보다 비슷한 조건에서 비교·검토하기 위하여 3차원 파괴해석을 실시하였다.¹⁰⁾

3.1 포러스 콘크리트의 모델화

역학적 특성에 영향을 미치는 조골재의 크기, 페이스트 강도, 공극률 또는 페이스트량등을 고려하여 모델화를 하였다. 그림 3은 포러스 콘크리트의 모델화 개요를 나타낸 것이다. 또한, 그림 4는 해석 모델을 나타내고 있다. 직경 50mm, 높이100mm의 공시체를 모델화하였고, 조골재 반경을 4종류로 설정하였다. 표 1과 표 2는 해석 입력변수와 해석 모델의 입력변수를 각각 나타내고 있다.

3.2 실험 개요

표 3에 실험 개요를 나타낸 것이다. 결합재는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 고성능 AE감수제를 사용하였다. 그리고 재령 28일의 공시체는 각각 3개씩 제작하여 강도실험을 실시하였다(배합표와 공시체 제작에 있어서의 개요는 참고문헌 10을 참조).

표 3 실험의 개요

조골재	W/C	목표공극률	측정항목
20~30mm	25%	10% 20% 30%	공극률 압축강도 응력-변형도곡선
13~20mm	25%		
5~13mm	25%		
	30% 35%		
2.5~5mm	25%		

3.3 해석결과와 실험결과와의 비교·검토

해석과 실험결과를 비교·검토함에 있어서 역학적 특성상의 대표적인 물시멘트비와 순인장 강도의 영향, 공극률의 영향에 대하여 소개를 하고자 한다.

3.3.1 물시멘트비와 순인장 강도의 영향

포러스 콘크리트의 페이스트 강도 실험에서는 물시멘트비 W/C를, 해석에서는 순인장 강도 Ft를 고려하였다. 그림 5는 압축응력-종변형 곡선에 미치는 물시멘트비와 순인장 강도의 영향을 나타낸 것이다. 양쪽의 결과에서 보듯이 응력 상승 영역에서의 강성은 실험과 해석결과에서 큰 차이

가 없었다. 또한, 물시멘트비가 감소하고 순인장 강도가 증가하면 최대 응력시의 변형이 증가함을 알수있다.

그림 6은 압축강도와 물시멘트비·순인장 강도의 관계를 나타낸 것이다. 물시멘트비가 감소하고 순인장 강도가 증가하면, 압축강도가 증가하는 경향은 동일하였다.

3.3.2 공극률의 영향

그림 7은 압축강도와 공극률과의 관계를 나타낸 것이다. 공극률이 증가할수록 압축강도가 직선적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 물시멘트비가 감소하고 순인장 강도가 증가할수록 높은 압축강도를 나타내었으며, 공극률에 의한 압축강도 변화도 현저한 경향을 나타내었다.

이상의 실험과 해석에서는 조골재 치수가 일치하지 않

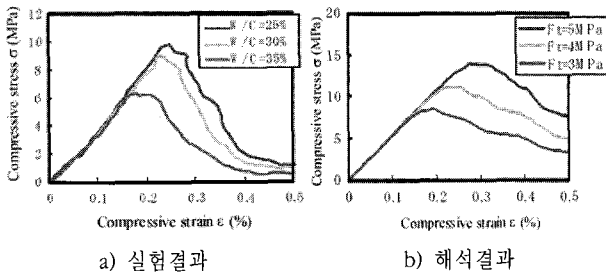


그림 5 압축응력σ - 종변형ε 곡선에 미치는 물시멘트비 W/C · 순인장 강도 Ft의 영향

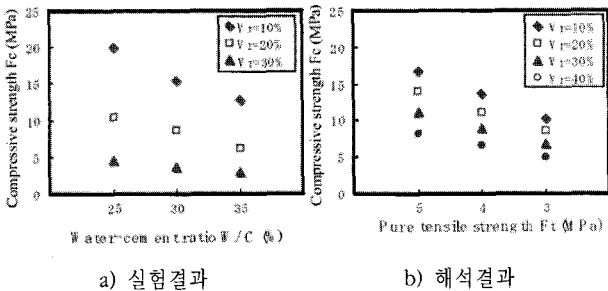


그림 6 압축강도와 물시멘트비·순인장 강도 Ft의 관계

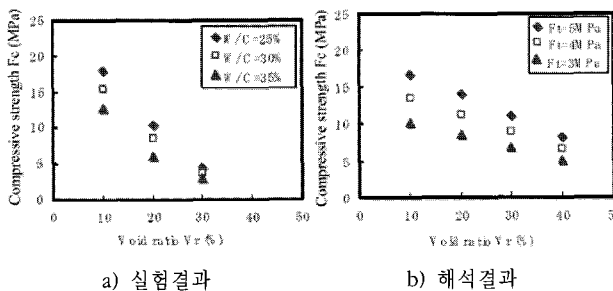


그림 7 압축강도 Fc와 공극률 Vr의 관계

때문에 정량적인 비교는 힘들지만, 해석결과와 실험결과가 동일한 경향을 나타내고 있음을 알수 있다.

4. 포러스 콘크리트의 적용사례

본 장에서는 포러스 콘크리트의 적용 사례중 녹화, 수질개선, 흡음성, 그리고 투수성 개선을 중심으로 소개하고자 한다.

4.1 녹화 콘크리트에 적용사례(그림 8)

녹화 콘크리트는 건축물의 외부와 옥상, 도시의 공공 장소, 하천 등의 녹화를 목적으로 개발된 것으로 콘크리트로서의 기능과 식재 기반의 기능을 동시에 만족시키는 콘크리트이다. 식물이 자라기 위해서는 포러스 콘크리트의 공극률을 높일 필요가 있고, 공극 입경을 크게하는 것이 유리하다.

반면, 포러스 콘크리트는 표면적이 크므로 초기 알칼리 성분 배출량이 많다. 알칼리량을 저감하기 위해서 일정기간을 공기중에 두어서 산화시키거나, 수중에 두어서 알칼리 성분을 축진시키기도 한다. 또한, 고로슬래그 미분말과 실리카흄을 시멘트에 혼합하여 수산화 칼슘을 감소시키는 방법도 보고되고 있다. 포러스 콘크리트를 사용한 녹화는 유지 관리에 많은 노력이 필요하다. 특히, 용수 공급 시스템을 구축하여 관리하기도 하나 경제성 문제의 단점을 가지고 있다.^{11),12)}



그림 8 녹화 콘크리트에 적용 사례

4.2 수질정화 콘크리트에 적용 사례(그림 9)

포러스 콘크리트의 수질정화는 포러스 콘크리트 중에 서식하는 미생물에 의한 간접적인 정화이다. 수중의 미생물은 유기 오염 물질을 분해하며, 생태계의 순환 사이클을 구축한다. 포러스 콘크리트는 동일 용적의 일반 콘크리트와 자연석에 비해 표면적이 큼으로 인해 많은 미생물이 서식

할수 있음으로 수질 정화 기능이 높다고 보고되고 있다. 또한, 최근의 연구에 의하면 재생 골재를 사용한 포러스 콘크리트도 하천 등의 침전 시험에서의 생물 서식이 동일하게 이루어진다는 결과 보고가 있다. 폐기물의 유효 이용에 기대되는 부분이라 할 수 있다.^{13),14)}



그림 9 수질정화 콘크리트에 적용 사례

4.3 흡음성 콘크리트에 적용 사례(그림 10)

포러스 콘크리트의 흡음 성능을 이용한 적용 사례는 도로, 공항, 철도 등 공공 운송기관에 대하여 소음 방지 대책으로 개발되었다. 포러스 콘크리트의 흡음 원리는 입사되는 소음에 대하여 일부는 포러스 콘크리트 표면에서 반사하지만, 나머지 소음은 연속 공극을 통하여 내부에 침투하여 내부에서 반사하게 된다. 내부 반사음과 외부 반사음에 위상차가 발생함으로 차음(흡음) 역할을 하게 되는 것이다. 단지, 흡음벽의 역할로 일부 시공 적용된 사례가 보고되고 있지만, 차음성에 대하여는 대체 재료가 많으므로 적용 사례가 적은 것이 현실이다.^{15),16)}

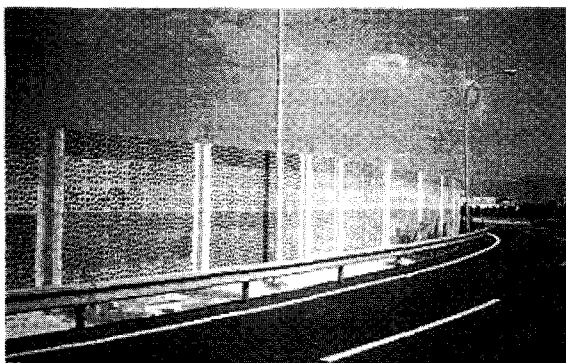


그림 10 흡음성 콘크리트에 적용 사례

4.4 투수성(透水性) 콘크리트에 적용 사례(그림 11)

포러스 콘크리트가 초기에 사용된 곳은 투수 성능이 필요한 도로 포장, 아스팔트 등이다. 도로면은 내린 빗물을 빠르게 배수할 기능이 필요한 곳이다. 포러스 콘크리트 기능에는 내린 빗물을 공극에 일단 흡수하는 기능과 모인 빗물을 천천히 배수하는 기능이 요구된다. 공원·정원 등의 보도와 주차장 등에 적용되고 있다. 특히, 포장면의 공극으로 인하여 태양광 등 열의 축적을 피할수 있고, 통기성(通氣性)이 좋아 히터아이랜드(Heat Island) 현상을 회피하는 효과가 기대된다.^{17),18)}

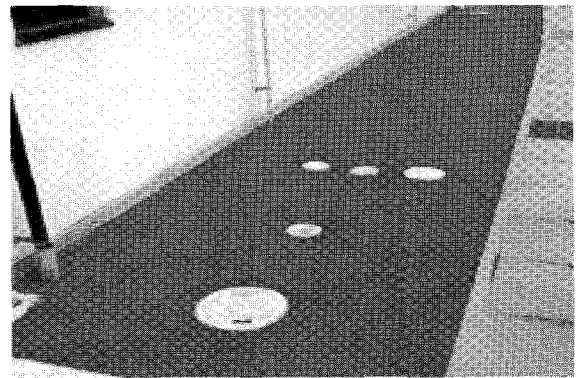


그림 11 투수성 콘크리트에 적용 사례


5. 향후 과제

포러스 콘크리트의 역학적 특성에 대해서는 각종 혼화제의 개발 등으로 인해 많은 연구성과가 보고되고 있다. 하지만, 일반적인 구조 부재로 사용되는 경우는 많지 않다. 투수 성능과 녹화성능, 그리고 흡음 성능 등을 만족시키는 동시에 보통 콘크리트와 같은 물성을 가진다면 보다 많은 이용 확대가 가능하다. 즉, 역학적 성능과 내구 성능 차원에서 연구 개발이 필요하리라 생각된다.

포러스 콘크리트는 환경의 부하 저감에 기여함과 동시에, 생태계와 조화를 이루어 쾌적한 환경을 창출함으로써 사회가 요구하는 친환경 정책에 공헌할 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

1. 일본 콘크리트 공학 협회. 포러스 콘크리트의 설계·시공법의 확립에 관한 연구 위원회 보고서, 2003
2. V.M. Malhotra. No-Fines Concrete - Its Properties and

- Applications, ACI Jounal, pp.628-644, 1976
3. Ogawa. 탄산가스를 흡입한 포러스 콘크리트의 물성, 일본 콘크리트 년차논문집, Vol.15, pp.531-536, 1993
 4. Yanagibashi. 녹화 콘크리트에 관한 연구와 시공, 일본 콘크리트 년차논문집, Vol.16, pp.871-876, 1994
 5. Imamoto. 고로슬래그, 후라이애쉬, 폐석고보드 미분말 혼합시멘트 콘크리트에 관한 기초적 연구, 일본건축학회 대회 강연 개요집, pp.825-826, 2009
 6. Tamai. 경석을 이용한 콘크리트의 흡음 특성, 시멘트·콘크리트 논문집, No. 46, pp.892-897, 1992
 7. Tanaka. 녹화 콘크리트의 강도 특성, 일본 콘크리트 년차논문집, Vol.21, pp.283-288, 1999
 8. Amaba. 혼화재를 고풍유한 포러스콘크리트의 기초적인 연구, 시멘트·콘크리트 논문집, No. 50, pp.370-376, 1996
 9. R.C. Meininger. No-Fines Pervious Concrete for Paving, ACI Concrete International, Vol. 10, 1988
 10. 박 상준. 점탄소성 사스펜션 요소법에 의한 포러스 콘크리트의 압축 파괴 시험, 일본 콘크리트 년차논문집, Vol.24, pp.321-326, 2002
 11. Yosimori. 녹화 포러스 콘크리트의 제조와 내구성에 관한 실험적연구, 자연환경과의 조화를 고려한 에코콘크리트의 현재와 미래 전망에 관한 심포지엄, 일본 콘크리트 공학회, pp.39-46, 1995
 12. Takeucho. 식생형 에코 콘크리트의 시공예, 콘크리트 공학 협회, Vol.36, No.3, pp.32-36, 1998
 13. Sakai. 수역 대응형 에코 콘크리트, 일본 콘크리트 공학, Vol.36, No.3, pp.42-45, 1998
 14. Asai. 블록식 구조물에 해양 생물로 착생 실험과 양생 조건에 관하여, 항해 기술 자료, No. 881, 1997
 15. Miura. 포러스 콘크리트 패널의 소음 저감 효과에 미치는 사용 공재의 종류와 패널 두께의 영향, 콘크리트 공학, Vol.29, No.2, pp.325-330, 2007
 16. Sakata. 소음을 흡수하는 콘크리트 판, 시멘트·콘크리트, No.607, pp.42-47, 1997
 17. B. Ferguson. Porous Pavements CRC Press, 2005
 18. Ito. 투수성 콘크리트의 개요와 에코 머트리얼의 용도, 시멘트·콘크리트, No.576, pp.11-17, 1995 

[담당 : 김명한, 편집위원]