

투수콘크리트의 공극막힘현상에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Pore Clogging Phenomenon of Porous Concrete

남정만* · 윤종만** · 김승현*** · 송영석****

Nam, Jung-Man · Yun, Jung-Mann · Kim, Seung-Hyun · Song, Young-Suk

Abstract

A series of field and laboratory permeability tests were performed to investigate the pore-clogging phenomenon of porous concrete used for pavement materials of a road. The field permeability tests were conducted for 37 study points in Jeju city, using the porous concretes with 13mm of maximum coarse aggregate (G_{max}). The results show that the service life of porous concrete is about 22 months when the permeability of the porous concrete is designed for 0.01 cm/sec. Some specimens were made with the purpose of recreating pore-clogging phenomenon. Tests were done for injected concentration of pore-clogging materials or size of maximum coarse aggregates (G_{max}). The test results demonstrated that relatively long in service life experienced with small amount of injected concentration of pore-clogging materials, whereas relatively short in service life experienced with a reduction in size of maximum coarse aggregates (G_{max}). In conclusion, the service life of porous concrete is in proportion to the concentration of pore-clogging material but it is in inverse proportion to the size of maximum coarse aggregate (G_{max}). Thus, the persisting period of porous concrete can be determined with respect to concentration of pore-clogging materials or size of maximum coarse aggregates (G_{max}).

Keywords : porous concrete, service life, coefficient of permeability, size of maximum coarse aggregate, concentration of pore-clogging material

요 지

본 연구에서는 도로포장재로서 사용되는 투수콘크리트의 공극막힘현상(pore-clogging)을 실험적으로 규명하기 위하여 일련의 현장투수시험과 실내투수시험을 실시하였다. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 투수콘크리트로 시공된 제주지역의 37 지점을 대상으로 현장투수시험을 실시한 결과 투수콘크리트 포장재의 투수계수 수명한계를 0.01cm/sec로 설정할 경우 투수콘크리트 포장재의 수명한계는 약 22개월로 확인되었다. 한편, 투수콘크리트의 공극막힘현상을 재현하기 위하여 투수콘크리트 공시체를 제작하였으며, 공극막힘재 투입농도가 공시체의 굵은 골재 최대치수(G_{max})에 따른 실내투수시험을 실시하였다. 실험결과 막힘재의 투입농도에 커질수록 투수콘크리트의 수명한계는 급격하게 감소하며, 투수콘크리트의 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 커질수록 투수콘크리트의 수명한계는 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 투수계수 수명한계에 이르는 시간은 공극막힘재의 농도와 반비례 관계가 있으며, 굵은 골재 최대치수(G_{max})와 비례 관계가 있다. 그리고 일반적인 조건에서 투수콘크리트의 내구연한은 공극막힘재의 농도와 굵은 골재 최대치수(G_{max})에 따라 간접적으로 예측이 가능함을 알 수 있다.

핵심용어 : 투수콘크리트, 수명한계, 투수계수, 골재 최대치수, 공극막힘재 농도

1. 서 론

국내에서는 과거 경제적인 급성장과 더불어 많은 사회기반 시설이 급격하게 건설되어 왔다. 국내 자동차 보급률의 증가에 비례하여 도로망 확충도 급격하게 진행되었으며, 국도 및 고속도로 뿐만 아니라 보도, 자전거 도로, 공원 산책로 등 비포장도로를 발견할 수 없을 정도로 도로포장의 개념이 생활 깊숙이 자리를 잡고 있다. 이러한 양적인 성장의 이면에 기존 도로포장의 문제점들이 나타나기 시작했다. 즉, 과거에

는 도로포장으로서의 역할적인 특성만을 중시하고, 도로를 이용하는 사용자의 편리성과 환경친화적인 측면에 있어서는 소홀하였다(하재담과 하상욱, 2000).

종래의 보통 콘크리트 도로와 아스팔트 콘크리트 도로는 불투수성 포장으로서 우수는 표면을 통해 배수구로 일시에 유출되어 도심지내 지하 생태계와 지하수 유집에 장애요인으로 지적되고 있다. 이에 대한 대안으로 우수가 지하로 침투할 수 있는 투수성 도로 포장이 제시되었으며, 보도, 자전거 도로, 주차장 등을 중심으로 적용이 확대되고 있다. 일반

*정회원 · 제주대학교 해양과학대학 토목공학과 교수 (E-mail : jungman@cheju.ac.kr)

**정회원 · 신안대학교 건설정보시스템과 부교수 (E-mail : jmyun@sau.ac.kr)

***제주대학교 해양과학대학 토목공학과 석사졸업

****정회원 · 교신저자 · 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (E-mail : yssong@kigam.re.kr)

적으로 투수성 포장은 지중에 빗물을 침투시켜 공기의 유통이 원활하여 지하수의 함양, 흙의 활성화, 지중생물 생태계 보호, 정원수의 발육 등 자연환경보전에 기여하고(조영수 등, 2002; 서대석 등, 2006; 홍종현 등, 2006), 특히 도시의 식물 재배환경개선에 매우 큰 효과를 주며 지하수의 감소, 지반침하 방지에 도움이 된다(서범석, 2002).

1980년대 투수성 아스팔트가 개발된 이래 투수성 포장공법에 관한 투수성 콘크리트의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 투수 콘크리트 포장과 관련된 연구로는 폴리머(박승범 등, 2005; 2008), 실리카흙(백용관 등, 2000; 박승범 등, 2005), 섬유(조광연과 권혁준, 2002)와 같은 혼화제를 사용한 강도 보강, 장기적 내구성(Pindado et al., 1999; 박승범 등, 2006), 골재의 입도 조정 및 입형 개선을 통한 투수율 증진(김무한 등, 2000; 박승범 등, 2010), 수문학적 측면에서의 투수효과(Schluter and Jefferies, 2002) 등에 대한 연구가 있다.

보도 및 자전거 도로, 공원의 산책로, 주차장의 경우 13mm입径의 골재를 이용한 투수 콘크리트를 주로 포설하는데 시공 후 일정 기간의 시간이 지나면 공기 중 오염물질과 다양한 일상의 이물질로 인해 표면의 공극이 막혀 제 기능을 상실하게 된다. 따라서 본 연구에서는 도로포장재로서 사용되는 투수콘크리트의 공극막힘현상(pore-clogging)을 실험적으로 규명하고자 한다. 먼저 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 골재로 시공된 제주도내 투수콘크리트 시공지역을 대상으로 시료를 채취하여 공극막힘재와 공극막힘재량을 선정한다. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 골재로 시공된 투수콘크리트에 대하여 현장투수시험을 실시하고, 투수콘크리트 공시체를 제작하여 공극막힘재 농도에 따른 실내투수시험을 실시한다. 이를 토대로 현장투수시험결과와 유사한 공극막힘재 농도를 선정하고, 선정된 공극막힘재 농도를 이용하여 투수콘크리트의 골재크기에 대한 영향을 살펴보고자 한다. 이들 결과를 이용하여 투수콘크리트에 대한 수명단계와 활용방안을 분석 및 고찰하고자 한다.

2. 투수콘크리트 재료

2.1 시멘트

실내시험을 위한 투수콘크리트 공시체를 제작하기 위해

Table 1. Chemical composition and Physical properties of cement

Portland Cement	Items	values
Chemical composition	Silicon dioxide, SiO ₂ (%)	18.6
	Aluminium oxide, Al ₂ O ₃ (%)	4.1
	Ferric oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	2.8
	Calcium oxide, CaO (%)	65.2
	Magnesium oxide, MgO (%)	3.8
	Sulfur trioxide, SO ₃ (%)	3.4
	Loss on ignition (%)	2.0
Physical properties	Unit weight (g/cm ³)	2.90
	Specific surface area (cm ² /g)	4,210
	Density	3.04

여 국내 D사에서 제조한 보통 포틀랜드시멘트를 이용하였다. 사용된 보통 포틀랜드시멘트의 화학적 구성성분과 물리적인 특성은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 보통 포틀랜드시멘트의 화학적 구성성분은 산화칼슘, 이산화규소, 알루미늄, 산화마그네슘 등의 순서로 많이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 그리고 포틀랜드시멘트의 단위중량은 약 2.9g/cm³이며, 비중은 3.04인 것으로 나타났다.

2.2 굵은 골재

일반적으로 투수콘크리트에 사용되는 굵은 골재 최대치수(G_{max})는 13mm이다. 본 연구에서는 투수콘크리트의 공극막힘현상과 골재크기와의 영향을 살펴보기 위하여 13mm 골재 뿐만아니라 10mm, 19mm, 25mm, 40mm의 골재를 이용하여 투수콘크리트 공시체를 제작하였다. Table 2는 본 실내시험에서 사용된 굵은 골재 최대치수(G_{max})에 따른 단위중량 및 흡수율을 측정된 결과이다. 골재의 단위중량 및 흡수율은 KS F 2503(굵은 골재 밀도 및 흡수율 시험방법)을 적용하여 측정하였다. 표에서 보는 바와 같이 단위중량은 골재 치수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 흡수율은 골재 치수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이거나 감소하는 경우도 발생하는 것으로 나타났다.

2.3 콘크리트 배합비

일반적으로 콘크리트는 시멘트, 굵은 골재, 잔골재 및 물을 적정비율로 섞어 반죽하여 제작한다. 이때 콘크리트의 물/시멘트비의 범위는 40-60%이며, 공극이 매우 작은 수밀한 상태를 요구한다. 그러나 투수콘크리트의 경우 시멘트, 굵은 골재 및 물로 제작하며, 잔골재를 제외한 배합을 주로 사용한다. 그리고 물/시멘트비가 매우 작고, 불규칙한 공극이 형성하게 된다. 본 연구에서는 투수콘크리트의 다양한 배합비에 대하여 실험을 수행하였으며, 이를 토대로 Table 3과 같은 투수콘크리트의 배합비를 선정하였다.

Table 2. Physical properties of aggregate

Coarse aggregate (mm)	Unit weight (g/cm ³)	Absorption (%)
10	2.43	1.25
13	2.43	1.99
19	2.62	1.90
25	2.64	2.24
40	2.64	2.21

Table 3. Mix proportion of porous concrete

Coarse aggregate (mm)	W (g)	C (g)	W/C (%)	Unit weight (g/cm ³)
10	100	256	39	2.11
13	105	284	37	2.06
19	110	314	35	1.99
25	115	348	33	1.97
40	108	372	29	1.86

3. 시험방법

3.1 압축강도시험

투수콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 일축압축시험(KS F 2405)을 실시하였다. 일축압축시험은 가장 간단한 역학시험이며 콘크리트 강도의 지표로서 널리 사용되고 있다. 콘크리트 공시체의 축방향으로 압축력을 가한 후 파괴 될 때의 하중을 측정하여 일축압축강도를 구하며 공시체의 변형률을 측정하여 응력-변형률 곡선을 얻어 탄성계수나 포아송비를 구할 수 있다.

굵은 골재 최대치수에 따라 2가지 크기의 공시체를 제작하였다. 굵은 골재 최대치수가 10mm, 13mm, 19mm 및 25mm인 경우 직경이 100mm이고 높이가 200mm인 공시체를 제작하였으며, 굵은 골재 최대치수가 40mm인 경우 직경이 150mm이고 높이가 300mm인 공시체를 제작하였다. 이와 같이 제작된 공시체들은 20±2°C 온도의 물에서 28일간 양생한 이후 만능재료시험기(Universal Testing Machine; UTM)를 이용하여 일축압축강도를 측정하였다.

3.2 휨인장강도시험

투수콘크리트의 휨인장강도를 측정하기 위하여 휨강도시험(KS F 2408)을 실시하였다. 휨인장강도는 암석과 같은 취성 재료에 있어 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 주요한 요소이다. 본 시험에서는 콘크리트 공시체를 옆으로 누워 암석보 상태로 지지시킨 뒤 중앙부에 하중을 가하여 암석보가 휨에 의하여 파괴되도록 하는 3지점 재하시험을 이용하였다.

압축강도시험에서와 동일하게 굵은 골재 최대치수(G_{max})에 따라 2가지 크기의 공시체를 제작하였다. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 10mm, 13mm, 19mm 및 25mm인 경우 폭 100mm, 높이 100mm, 길이 400mm의 공시체를 제작하였으며, 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 40mm인 경우 폭 150mm, 높이 150mm, 길이 600mm의 공시체를 제작하였다. 이와 같이 제작된 공시체는 20±2°C 온도의 물에서 28일간 양생한 이후 만능재료시험기를 이용하여 휨인장강도를 측정하였다.

3.3 현장투수시험

투수콘크리트의 투수계수를 측정하기 위하여 투수성 포장체의 현장투수시험(KS F 2394)을 실시하였다. 본 시험은 투수성 포장체에 대한 현장에서의 투수성능을 평가하기 위한 시험으로 현장 여건상 변수위투수시험으로 수행하게 된다. Fig. 1은 현장투수시험의 모식도를 나타낸 것이다. 시험방법은 유점토나 실리콘을 시험기 저면에 미리 부착시켜 노면과 접촉면에서의 누수를 방지한 후 아크릴 몰드 안에 물을 일정한 높이만큼 채워 넣은 후 물이 투수 되는 시간과 투수 된 물의 양을 측정한다. 일반적으로 400ml의 물을 주입하고 포장체를 빠져나가는데 걸리는 시간을 측정하여 투수계수를 산정하게 된다.

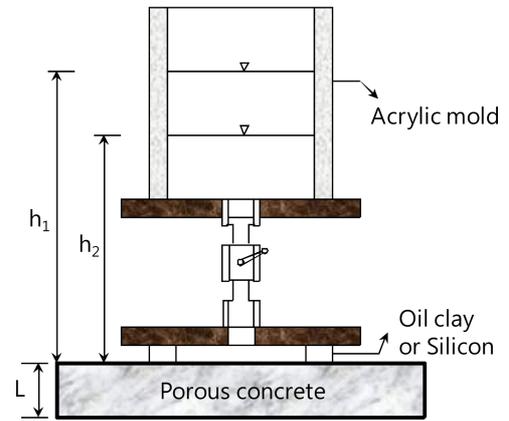


Fig. 1. Schematic diagram of in-situ test for measuring permeability

3.4 공극막힘시험

일반적으로 투수콘크리트 혹은 투수성 포장재의 경우 구조적인 내구성 보다는 배수기능의 저하로 인하여 성능에 문제가 발생하게 된다. 투수콘크리트 혹은 투수성 포장재의 배수기능 저하요인으로는 보행자나 바람 등에 의해 이동 및 운반되어지는 토사나 먼지, 가루수의 낙엽 등이 표면의 공극으로 침투되어 부착 및 고정되기 때문이다.

현재까지 투수성 포장재의 구조적인 내구성 및 강도증가에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으나, 투수성 포장재의 배수기능 및 투수성에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 공극막힘정도에 따른 투수성 포장재의 배수기능 및 투수성을 조사하기 위하여 공극막힘재를 선정하고, 공극막힘재량을 산정하여 투수콘크리트 공시체의 투수계수를 측정하였다.

3.4.1 공극막힘재 선정

공극막힘시험을 수행하기 위하여 먼저 공극막힘재를 선정하였다. 이를 위하여 투수성 포장재가 시공된 현장을 대상으로 노면 상에 존재하는 시료를 채취하였다. 본 연구에서는 제주도 제주시 일원의 5개 지역(제주대, 관덕정, 연북로, 중앙로, 서사라)에의 노면 상에서 시료를 채취하고 이들 입도분포곡선을 토대로 공극막힘재를 선정하였다. Fig. 2는 제주도 제주시 일원의 5개 지역에서 채취한 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 그리고 Table 4는 각각의 시료에 대한 균등계수와 곡률계수를 나타낸 것이다. 그림과 표에서 보는 바와 같이 연북로 시료를 제외하고 모두 입도가 불량한 것으로 나타났다. 그리고 제주대 시료는 약 45% 정도의 세립토를 포함하고 있으나 다른 시료들은 대부분 조립토로 구성되어 있음을 알 수 있다.

제주도 제주시 일원의 5개 지역에서 채취한 시료의 입도분포를 이용하여 공극막힘재의 대표적인 입도분포를 선정하였다. 입도분포곡선을 토대로 조립토와 세립토를 혼합하여 공극막힘재를 제작하였으며, 공극막힘재의 입도분포곡선은

Table 4. Uniformity coefficient (C_u) and coefficient of gradation (C_g) of the collected soils

Section	Jeju Univ.	Gwandeokjeong	Yeonbukro	Jungangro	Seosara
C_u	18.89	6.67	16.44	6.43	3.81
C_g	0.55	1.07	1.1	1.03	0.95

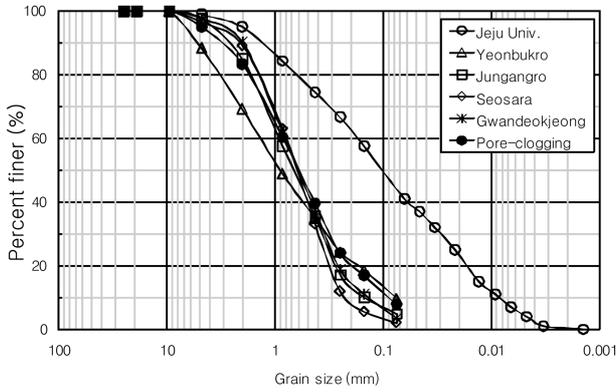


Fig. 2. Grain-size distribution curves of the collected soils and the pore-clogging material

Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 공극막힘재는 5개 지역에서 채취한 시료의 입도분포곡선내에 위치함을 알 수 있다.

3.4.2 공극막힘재량 산정

투수콘크리트 혹은 투수성 포장재의 공극막힘현상은 빗물과 함께 토사, 먼지 등의 오염물질이 포장재의 표면으로 유입되어 발생한다. 공극막힘시험에서 투수콘크리트에 적용될 공극막힘재량을 산정하기 위하여 조은일과 이용두(2006)의 연구결과를 이용하였다. 왜냐하면 오염물질을 포함한 채 배출되는 빗물은 실제로 주된 공극막힘재 역할을 하기 때문이다. 일반적으로 비점오염원으로부터 발생하는 오염물질에 의한 수질에 미치는 영향을 정량화하여 평가할 수 있는 방법으로 원단위를 이용하고 있다. 원단위를 이용하는 방법은 비점오염원에서 유출되는 부하량을 간편하게 산정할 수 있는 방법으로 국내외에서 보편적으로 이용하고 있다.

조은일과 이용두(2006)는 제주시내 강우유출수의 비점오염원을 원단위를 이용하여 제시한 바 있다. 제주시내의 분류식 하수관거가 설치되어 있는 지역들을 조사대상지역으로 선정하고, 강우사상에 대하여 강우유출수의 비점오염원을 조사하였다. 분류식 하수관거가 설치되어 있는 지역의 경우 강우시 하수에 대한 영향을 배제할 수 있으므로 강우유출수의 비점오염원을 비교적 합리적으로 산정할 수 있다. Table 5는 조

Table 7. The average SS in each rainfall event (mg/L)

Rainfall	Apartment	Detached house	Park	Industry
1 event	11	-	194	-
2 event	11.3	13.1	42.1	205.3
3 event	16	13.8	-	160.6

시대상지역으로 선정된 4개 지역과 각각의 유역면적을 나타낸 것이다. Table 6은 조사대상지역에서 발생한 강우의 특성을 나타낸 것으로 3번의 강우사상을 대상으로 하였으며, 강우량, 지속시간, 선행무강우일수 등을 나타내었다. 그리고 Table 7은 대상지역에서 강우시 유출되는 비점오염원의 부유사농도(Suspended Solid)를 측정된 결과이다.

이상의 측정결과를 토대로 조사대상지역에서 강우시 유출되는 비점오염원을 원단위 방법으로 산정하였다. 비점오염원의 원단위는 간단하게 정의하면 단위시간당 단위면적에서 배출되는 비점오염물질량을 의미하는 것으로, 식 (1)로 계산할 수 있다. 각각의 조사대상지역과 강우사상에 대하여 연평균 강수량, 강우보정치, 각 지역별 유출계수, 유량기중평균농도를 대입하여 원단위를 산정하였다. 비점오염원의 원단위 산정결과는 Table 8과 같이 나타낼 수 있으며, 각각의 지역에서의 원단위를 평균하면 그 값은 6,383.28 g/m²/yr이 된다. 앞서 설명한 바와 같이 강우시 유출되는 빗물의 비점오염원은 실제로 공극막힘재의 역할을 하므로, 본 연구에서는 비점오염원의 원단위를 공극막힘재의 양으로 환산하여 적용하고자 한다. 즉 공극막힘시험을 위한 투수콘크리트 공시체에 대한 정수위투수시험 수행시 공시체의 단면적과 12개월의 기간에 해당되는 공극막힘재량을 산정하여 이를 적용하였다.

$$\text{비점오염원 원단위(Kg/ha/yr)} = P \times P_j \times C \times \text{EMC} \quad (1)$$

여기서, P : 최근10년간 연평균강수량

P_j : 강우 보정치

C : 유출계수(아파트 및 단독주거지역 0.65, 공원지역 0.35, 공업지역 0.5)

EMC : 유량기중평균농도

Table 5. Investigation sites for estimating the pore-clogging materials

Area	Site	Basin area (m ²)
Apartment	Ildo 2-dong, Jeju city	62,811
Detached house	#1519, Yeob-dong, Jeju city	75,218
Park	Sinsan Park, Ildo 2-dong, Jeju city	38,400
Industry	Hwabuk 1-dong, Jeju city	148,286

Table 6. Rainfall events and its characteristics

Rainfall	Date and time	amount of rainfall (mm)	Duration time (hr)	Number of antecedent raining days (day)
1 event	05.10.28 05:00-06:00	5.5	2	6(14)
2 event	05.11.05 10:00-24:00	29.0	14	1(5)
3 event	05.11.28 16:00-19:00	0.5	3	1(16)

(): 강우유출특성이 잘 나타나는 강우량 0.5mm 이상을 고려한 선행무강우일수

Table 8. Average amount of pore-clogging material

Area	kg/ha/yr	g/m ² /yr	Average (g/m ² /yr)	amount of pore-clogging material (g)
Apartment	14,141	1,414.1	6,383.28	112.98
Detached house	14,898	1,489.8		
Park	70,409	7,040.9		
Industry	155,883	15,588.3		

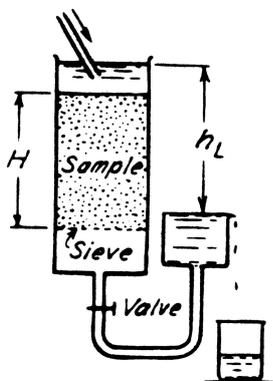


Fig. 3. Schematic diagram of constant-head permeameter (Terzaghi et al., 1996)

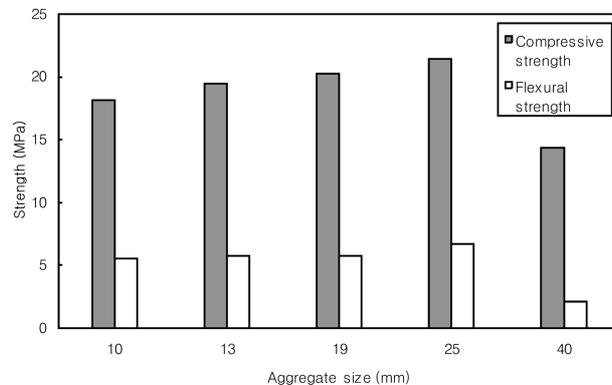


Fig. 4. Compressive and flexural strengths for various aggregate size of porous concrete

3.4.3 정수위투수시험

본 연구에서는 투수콘크리트에 대한 공극막힘현상을 재현하기 위하여 투수콘크리트 공시체를 제작하고 공극막힘체가 포함된 물을 투과시켰다. 투수콘크리트 공시체는 굵은 골재 최대치수가 13mm인 골재를 이용하여 제작하였으며, 공시체의 크기는 지름 150mm, 높이 100mm이다. 그리고 투수계수 측정을 위하여 정수위투수시험법(KS F 2322)을 이용하였다. Fig. 3은 정수위투수시험장치에 대한 개략적인 구조를 나타낸 것이다. 정수위투수시험은 유입부와 유출부의 수위를 일정하게 유지하면서 시료에 물을 통과시켜 유량이 일정하게 유지시킨 후 일정시간동안 유출된 유량을 측정하는 것이다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 압축강도 및 휨인장강도

투수콘크리트가 도로포장에 적용되는 경우 압축강도는 18MPa이상 그리고 휨강도는 4MPa이상을 발휘하는 것이 바람직하다(홍중현 등, 2006). Fig. 4는 본 연구에서 측정된 투수콘크리트 공시체의 압축강도와 휨인장강도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 굵은 골재 최대치수(G_{max}) 10mm, 13mm, 19mm 및 25mm인 공시체의 압축강도는 소요강도 18MPa 이상인 것으로 나타났으나, 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 40mm인 공시체의 압축강도는 14.3MPa로 소요강도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 10mm, 13mm, 19mm 및 25mm인 공시체의 휨인장강도는 소요강도 4MPa 이상인 것으로 나타났으나, 굵은 골재 최대치수가 40mm인 공시체의 휨인장강도는 2.1MPa로 소요강도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 10mm, 13mm,

19mm 및 25mm인 경우 도로포장재로서 투수콘크리트의 강도기준을 만족하므로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 골재 최대치수(G_{max})가 40mm인 경우 투수콘크리트의 강도기준을 만족하지 못하므로 적용이 불가능하다.

4.2 투수계수

투수콘크리트의 모든 배합 및 다짐방법에서 국내외 투수콘크리트 포장재에 요구되는 투수계수에 관한 규정은 0.01cm/sec 이상이다(대한주택공사, 2000; 安岐, 1998). 투수콘크리트 포장재의 투수계수를 측정하기 위하여 현장투수시험을 실시하였다. 현장투수시험 대상지역은 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 투수콘크리트가 시공된 제주지역의 37지점이며, 이들 대상지역의 준공일과 사용기간은 제주시청과 서귀포시청의 자료를 토대로 산정하였다. Fig. 5는 대상지역에 대한 투수콘크리트 포장재의 시공완료후 사용기간과 현장투수시험으로 측정된 투수계수를 나타낸 것이다. 투수콘크리트 포장

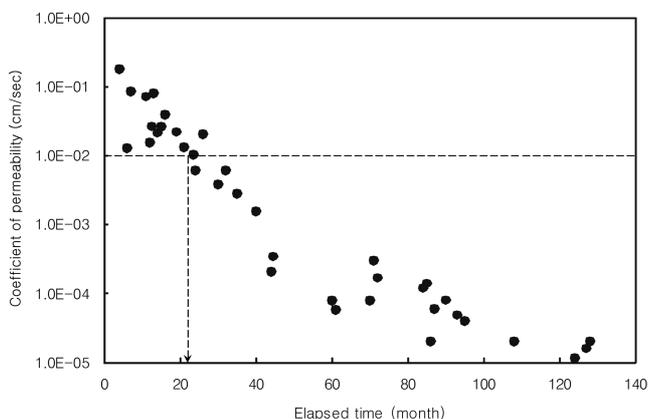


Fig. 5. The coefficient of permeability of porous concretes for various used times

재에서 요구되는 투수계수인 0.01cm/sec를 수명한계 기준으로 설정할 경우 투수콘크리트 포장재의 수명한계는 약 22개월인 것으로 나타났다.

4.3 공극막힘현상

4.3.1 막힘재의 농도에 따른 영향

앞서 설명한 바와 같이 공극막힘시험을 위하여 공극막힘재를 선정하고, 투수콘크리트에 적용될 공극막힘재량을 산정하였다. 공극막힘재량을 기준으로 막힘재의 1회 투입농도를 0.27g/L, 0.80g/L, 1.07g/L 및 1.61g/L으로 구분하고, 이를 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 골재를 이용하여 제작된 투수콘크리트 공시체에 투과시킴으로서 공극막힘현상을 재현하였다. 막힘재의 투입농도는 투수콘크리트 공시체의 단면적에 대하여 12개월에 해당하는 막힘재량을 산정하고, 이를 1개월, 3개월, 4개월 및 6개월로 각각 나누어 35L의 물과 함께 1회씩 누적투과시킴으로서 환산할 수 있다. 이때 투수계수의 변화는 정수위투수시험 원리를 적용하여 구할 수 있다.

Fig. 6은 막힘재의 투입농도에 따른 투수콘크리트 공시체의 투수계수 변화를 나타낸 것이다. 투수콘크리트의 수명한계는 투수콘크리트 포장재에서 요구되는 투수계수인 0.01cm/sec를 기준으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 공극막힘재의 농도가 커질수록 투수콘크리트의 수명한계는 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 막힘재의 투입농도가 0.27g/L인 경우 수명한계에 이르는데 약 38개월이 소요되지만, 막힘재의 투입농도가 각각 1.07g/L과 1.61g/L인 경우 약 20개월과 약 11개월이 소요되는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 투수콘크리트의 투수계수 수명한계에 이르는 시간과 공극막힘재의 농도에 따른 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 투수콘크리트의 투수계수 수명한계에 이르는 시간은 공극막힘재의 농도와 반비례 관계가 있음을 알 수 있으며, 이는 식 (2)와 같은 상관식을 도출할 수 있다. 따라서 일반적으로 사용되는 굵은 골재 최대치수 (G_{max})가 13mm인 투수콘크리트의 내구연한을 공극막힘재의 농도에 따라 간접적으로 예측할 수 있다.

$$y(\text{month}) = -19.5x(\text{g/L}) + 41.5 \quad (2)$$

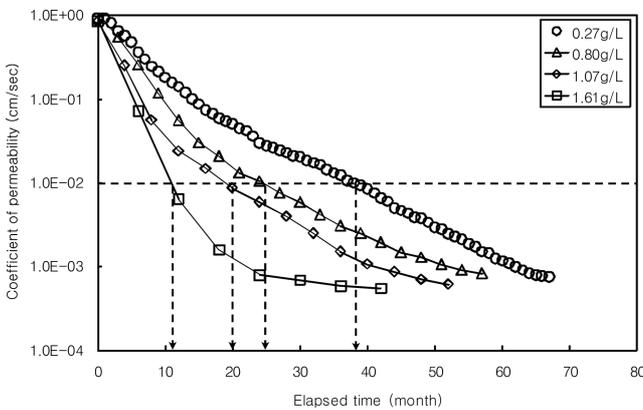


Fig. 6. Coefficient of permeability of porous concrete specimen according to the concentration of pore-clogging material

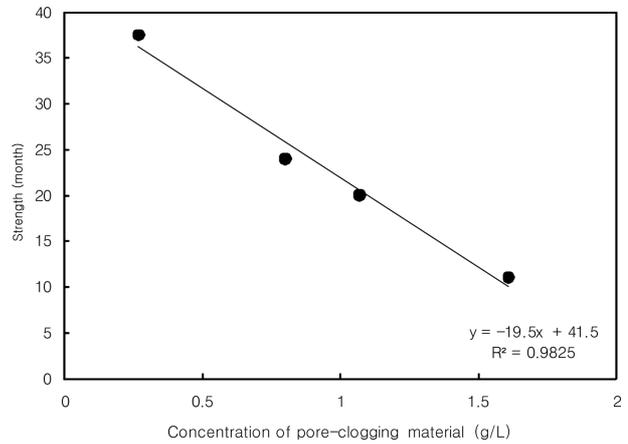


Fig. 7. Relationship between the service life and the concentration of pore-clogging material

4.3.2 굵은 골재 최대치수의 영향

현장에서 측정된 투수계수를 토대로 유사한 막힘재 농도를 도출하기 위하여 현장투수시험결과와 공시체를 이용한 투수시험결과를 서로 비교하였다. Fig. 8은 투수콘크리트 포장재가 시공된 제주지역의 37지점에서 측정된 현장 투수계수와 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 투수콘크리트 공시체에 대한 투수계수를 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 현장에서 측정된 투수계수의 추세선과 공극막힘재의 농도가 1.07g/L인 경우의 투수계수가 유사한 것으로 나

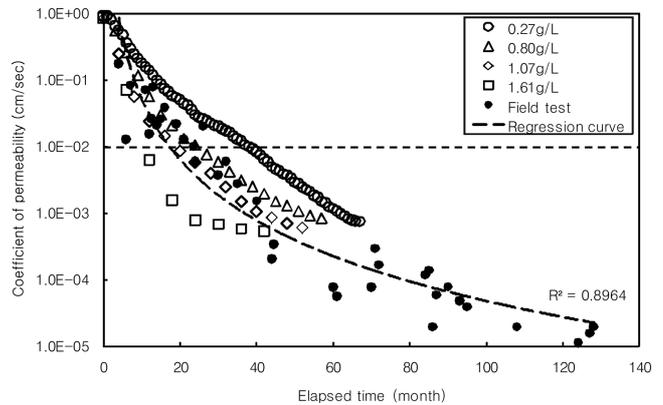


Fig. 8. Comparison between field permeability and permeability of porous concrete specimen

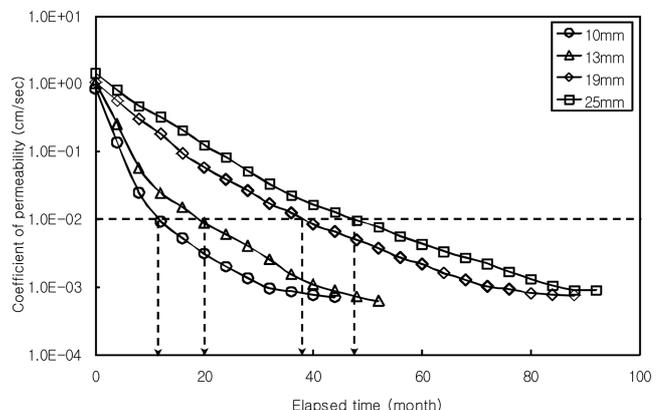


Fig. 9. Coefficient of permeability of porous concrete specimen according to the maximum size of coarse aggregate

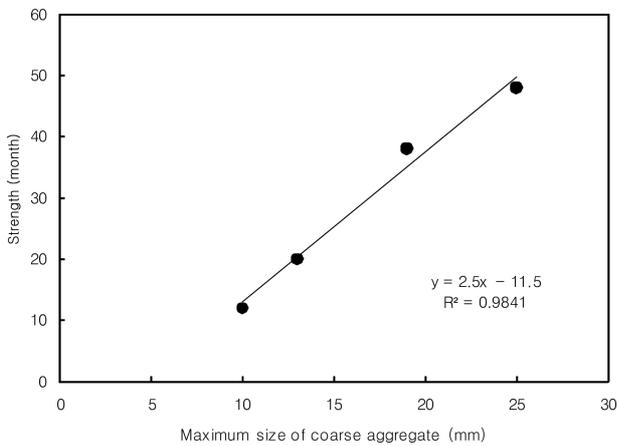


Fig. 10. Relationship between the service life and the maximum size of coarse aggregate

타났으며, 투수콘크리트의 수명한계도 유사함을 알 수 있다. 따라서 투수콘크리트의 굵은 골재 최대치수에 대한 영향을 조사하는데 적용될 공극막힘재의 농도는 1.07g/L로 선정하여 현장조건을 반영하도록 하였다.

투수콘크리트의 굵은 골재 최대치수에 대한 영향을 조사하기 위하여 공극막힘재의 농도를 1.07g/L으로 동일하게 하고, 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 10mm, 13mm, 19mm 및 25mm인 각각의 투수콘크리트 공시체를 대상으로 공극막힘 시험을 수행하였다. Fig. 9는 굵은 골재 최대치수에 따른 투수콘크리트 공시체의 투수계수 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 투수콘크리트의 굵은 골재 최대치수가 커질수록 투수콘크리트의 수명한계는 증가하는 것으로 나타났다. 이때 투수콘크리트의 수명한계는 투수콘크리트 포장재에서 요구되는 투수계수인 0.01cm/sec를 기준으로 하였다. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 10mm인 경우 수명한계에 이르는 데 약 12개월이 소요되지만, 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 각각 19mm와 25mm인 경우 약 38개월과 약 48개월이 소요되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 투수콘크리트의 투수계수 수명한계에 이르는 시간과 굵은 골재 최대치수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 투수콘크리트의 투수계수 수명한계에 이르는 시간은 굵은 골재 최대치수는 서로 비례 관계가 있음을 알 수 있으며, 이는 식 (3)와 같은 상관식을 도출할 수 있다. 따라서 현장시험으로부터 구한 막힘재 농도 1.07g/L를 적용할 경우 투수콘크리트의 내구연한을 굵은 골재 최대치수에 따라 간접적으로 산정할 수 있다.

$$y(\text{month}) = 2.5x(\text{mm}) - 11.5 \quad (3)$$

5. 결 론

본 연구에서는 도로포장재로서 사용되는 투수콘크리트의 공극막힘현상(pore-clogging)을 실험적으로 규명하기 위하여 일련의 현장투수시험과 실내투수시험을 실시하였다. 제주도 내 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 투수콘크리트 포장재에 대하여 현장투수시험을 실시하였고, 투수콘크리트 공시체를 제작하여 공극막힘재 농도에 따른 실내투수시험을 실

시하였다. 이를 토대로 공극막힘재 농도와 투수콘크리트의 굵은 골재 최대치수(G_{max})에 따른 공극막힘현상을 분석하였으며, 투수콘크리트에 대한 수명한계와 이들의 상관관계를 조사하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 10mm, 13mm, 19mm 및 25mm인 투수콘크리트의 압축강도와 휨인장강도는 각각의 소요강도인 18MPa 및 4MPa 이상인 것으로 나타났으므로 도로포장재로서 투수콘크리트의 강도기준을 만족함을 알 수 있다. 그러나 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 40mm인 투수콘크리트의 압축강도와 휨인장강도는 소요강도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
2. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 투수콘크리트로서 시공된 제주지역의 37지점을 대상으로 현장투수시험을 실시한 결과 투수콘크리트 포장재의 투수계수 수명한계를 0.01cm/sec로 설정할 경우 투수콘크리트 포장재의 수명한계는 약 22개월로 확인되었다.
3. 막힘재의 투입농도에 커질수록 투수콘크리트의 수명한계는 급격하게 감소하며, 투수계수 수명한계에 이르는 시간은 공극막힘재의 농도와 반비례 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 일반적으로 사용되는 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 13mm인 투수콘크리트의 내구연한은 공극막힘재의 농도에 따라 간접적으로 예측이 가능하다.
4. 투수콘크리트의 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 커질수록 투수콘크리트의 수명한계는 증가하며, 투수계수 수명한계에 이르는 시간과 굵은 골재 최대치수(G_{max})는 서로 비례 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 현장시험으로부터 구한 막힘재 농도 1.07g/L를 적용할 경우 투수콘크리트의 내구연한은 굵은 골재 최대치수(G_{max})에 따라 간접적으로 산정할 수 있다.
5. 투수콘크리트는 일반적으로 13mm의 굵은 골재 최대치수(G_{max})를 사용하는 것이 일반적이나, 19mm 혹은 25mm의 굵은 골재 최대치수(G_{max})를 사용하는 것이 가능하다고 판단된다. 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 커질수록 노출면이 거칠어지는 단점이 있으나 투수콘크리트층 위에 공극을 갖는 탄성층을 놓는 2층 구조를 적용할 경우 이에 대한 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 그리고 본 논문을 세심하게 검토해주신 익명의 심사위원들에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김무한, 김규용, 백용관, 김재환(2000) 포러스콘크리트의 배합요인 및 골재 혼합비율이 강도 및 투수성에 미치는 영향, **콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제12권 제6호, pp. 91-98.
- 대한주택공사(2000) **주택공사표준시방서 : 투수시멘트 콘크리트 포장**.
- 박승범, 박성현, 장영일, 이병재, 전흥진(2010) 슬래그와 바텀애시를 잔골재로 혼합한 포러스콘크리트의 충전상태 및 물리적

- 공학특성에 관한 실험적 연구, **한국폐기물자원환경학회지**, 한국폐기물자원환경학회, 제27권 제2호, pp. 165-172.
- 박승범, 서대석, 이준, 송재립, 김정희(2006) 재생골재와 폴리머를 이용한 투수성 포장용 포러스콘크리트의 내구성능에 관한 실험적 연구, **한국폐기물학회 춘계학술연구회 논문집**, 한국폐기물학회, pp. 326-330.
- 박승범, 성성우, 이준, 장영일, 이병재(2008) 폐콘크리트 순환골재를 이용한 폴리머 혼입 포러스콘크리트의 다짐방법에 따른 공극 및 압축강도 특성, **한국폐기물학회지**, 한국폐기물학회, 제25권, 제2호, pp. 110-117.
- 박승범, 윤의식, 서대석, 이준(2005) 재생골재와 폴리머를 이용한 포장용 포러스콘크리트의 역학적 특성, **콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제17권 제4호, pp. 595-602.
- 박승범, 이준, 서택석, 윤의식(2005) 실리카폼 및 강섬유를 이용한 포장용 포러스콘크리트의 품질특성에 관한 연구, **한국도로학회논문집**, 한국도로학회, 제7권 제3호, pp. 31-42.
- 백용관, 김재환, 유범재, 강석표, 박선규, 김무한(2000) 포러스 콘크리트의 강도증진에 미치는 이론공극율 및 실리카흄 대체율의 영향에 관한 실험적 연구, **대한건축학회 학술발표회 논문집**, 대한건축학회, 제20권 제1호, pp. 275-278.
- 서대석, 박승범, 이준, 송재립, 김정희(2006) 포러스콘크리트의 해수정화특성에 관한 실험적 연구, **한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 18, No. 1, pp. 649-652.
- 서범석(2002) **고성능 투수콘크리트의 역학적 특성**, 석사학위논문, 공주대학교 산업대학원, p. 63.
- 조광연, 권혁준(2002) 섬유보강 포러스 콘크리트의 물리 역학적 특성에 관한 실험적 연구, **공주영상정보대학 논문집**, 공주영상정보대학, pp. 403-413.
- 조영수, 김정환, 권혁준, 박승범(2002) 산업부산물을 사용한 포러스콘크리트의 수질정화특성에 관한 실험적 연구, **한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 14, No. 1, pp. 717-722.
- 조은일, 이용두(2006) 제주시에서 배출되는 비점오염물질 유출특성, **한국수처리학회지**, 한국수처리학회, 제14권 제3호, pp. 51-59.
- 하재담, 하상욱(2000) 투수콘크리트 포장의 배합설계 및 시공사례, **한국도로포장공학회논문집**, 한국도로포장공학회, 제2권 제2호, pp. 65-68.
- 홍종현, 김문훈, 양철신(2006) 친환경 도로포장용 투수콘크리트의 제조와 이를 이용한 도로포장시스템의 수질정화특성, **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제15권, 제11호, pp. 1045-1052.
- 安岐(1998) 透水性コンクリート舗装の適用性に関する実験, **道路建設**, pp. 52-56.
- Pindado, M.A., Aguado, A. and Josa, A. (1999) Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes, *The journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1077-1083.
- Schluter, W. and Jefferies, C. (2002) Modelling the outflow from a porous pavement, *The Journal of Urban Water*, Vol. 4, pp. 245-253.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mersi, G. (1996) *Soil mechanics in engineering practice, 3rd Edition*, John Wiley & Sons, Inc. pp. 71-83.

(접수일: 2011.5.3/심사일: 2011.6.9/심사완료일: 2011.6.9)