투수성 폴리머 블록 포장에 의한 우수 유출 저감 효과에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Rainfall Runoff Reduction Effects by Permeable Polymer Block Pavement

성찬용* · 김영익*†

Sung, Chan Yong · Kim, Young Ik

ABSTRACT

Most of the roads are paved with impermeable materials such as asphalt concrete and cement concrete, and in the event of heavy rainfall, rainwater directly flows into river through a drainage hole on the pavement surface. This large quantity of rainwater directly spilled into the river frequently leads to the flooding of urban streams, damaging lowlands and the lower reaches of a river. In recent years there has been a great deal of ongoing research concerning water permeability and drainage in pavements. Accordingly, in this research, a porous polymer concrete was developed for permeable pavement by using unsaturated polyester resin as a binder, recycled aggregate as coarse aggregate, fly ash and blast furnace slag as filler, and its physical and mechanical properties were investigated. Also, 3 types of permeable polymer block by optimum mix design were developed and rainfall runoff reduction effects by permeability pavement using permeable polymer block were analyzed based on hydraulic experimental model. The infiltration volume, infiltration ratio, runoff initial time and runoff volume in permeability pavement with permeable polymer block of 300×300×80 mm were evaluated for 50, 100 and 200mm/hr rainfall intensity.

Keywords: permeable polymer block; rainfall runoff reduction; void ratio; strength; permeability coefficient

1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경오염으로 인한 기후변화 및 지구의 온난화 등이 심각해지면서 탄소배출 억제 및 폐기물의 재활용 등 환경보전에 대한 관심이 고조됨에 따라 환경을 고려한 정책 및 신기술에 대한 연구개발이 요구되고 있다. 이에 건축 및 토목 분야의 주재료인 콘크리트를 분야에서도 지구환경 부하량을 저감시키기 위하여 환경친화형 콘크리트 (Eco-concrete)에 관한 연구가 진행되고 있으며, 특히 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말과 같은 산업 폐기물 및 부산물을 콘크리트 혼화재료로 활용하기 위한 연구와 연속적인 공극을 가지는 포러스 콘크리트를 제조하여 투수, 흡음 및 수질정화 등에 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다 (Choi et al., 1998; Park et al., 2004; Roy, 2009; Wang et al., 2010).

한편, 우리나라에서 대부분의 도로 포장은 아스팔트 콘크리트

와 시멘트 콘크리트 등의 불투수성 포장 재료에 의한 전면포장으로 호우시 포장면에서 배수구를 통한 우수가 그대로 하천에 유입된다. 이와 같이 우수의 직접 유출에 의하여 도시 하천의 홍수량이 증가되어 저지대 및 하류지역에서 홍수 피해가 빈번하게 발생하고, 침투수 부족으로 인하여 지하수 고갈 등의 문제가 대두되고 있다 (Sung et al., 1996; Lee et al., 2002; Park et al., 2005). 따라서 최근에는 홍수에 의한 침수 피해를 방지하고 지하수자원을 확보하기 위하여 기존 불투수성 시멘트 콘크리트 및 아스팔트 포장을 크게 개선한 투수 및 배수성 포장에 관심이 높아짐에 따라 투수성 콘크리트나 투수성 아스팔트를 사용한 차도, 보도, 광장 및 주차장 등의 시공사례가 증가하고 있으며, 포러스 콘크리트를 활용한 투수 블록 제품 등의 개발에 관한 연구가 많이 진행되고 있다 (Chae et al., 2002; Chindaprasirt et al., 2008; Ko et al., 2009).

그러나 기존의 투수성 시멘트 콘크리트 및 아스팔트 포장의 경우 결합재의 낮은 결합력으로 인하여 겨울철 동결융해의 반복 작용시 균열 및 골재의 탈락 등에 기인한 부분 침하 및 파괴 등이 빈번하게 발생하며, 장기적으로 내구성이 크게 저하되는 문제점을 내포하고 있다. 이에 시멘트의 단점을 개선하기 위한 고분자 결합재의 사용이 크게 증가하고 있으며, 특히 불포화 폴리 에스터수지는 강도 발현, 작업성 및 성형성이 우수하여 높은 결

* 충남대학교 지역환경토목학과

** 충남대학교 농업과학연구소

† Corresponding author Tel.: +82-42-821-7866

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: yikim@cnu.ac.kr

2012년 3월 5일 투고

2012년 3월 27일 심사완료

2012년 3월 27일 게재확정

합력이 요구되는 포러스 콘크리트에 활용할 경우 효과가 우수한 것으로 알려져 있다 (Fannet al., 1996; Pindado et al., 1999; Muthkumar et al., 2004; Kim et al., 2005).

따라서 본 연구에서는 보통 시멘트 포러스 콘크리트의 낮은 강도 및 내구성 등의 단점을 개선하기 위하여 결합력이 높은 불포화 폴리에스터수지 및 충전재로 산업부산물인 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을 활용한 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트를 개발하여 물리·역학적 특성을 구명하고, 최적배합의 투수성 폴리머 블록을 개발하여 투수성 블록 포장의 수리모형 실험을 통한 우수유출 저감 효과를 분석하여 투수 포장에 활용할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트를 제조하기 위하여, 결합재는 메틸에틸케톤 프록사이드가 55 % 함유된 DMP 용액을 개시제로 사용하는 올소타입의 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였으며, 이에 대한 일반적 특성은 Table 1과 같다. 굵은골재로는 폐기물의 활용측면에서 한국의 경기도 I사에서 폐콘크리트를 재활용하여 생산된 재생골재를 사용하였으며, 잔골재는 강에서 채취된 모래를 사용하였다. Table 2는 사용된 굵은골재와 잔골재의 물리적 특성을 보여준다. 결합재의 점성 및 결합재와의 페이스트 형성으로 골재와 골재의 결합력을 증가시

키기 위하여 사용되는 충전재는, 폴리머 콘크리트의 충전재로 주로 사용되는 탄산칼슘, 화력발전소 및 제철소에서 부산되어지는 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을 사용하였다. Table 3은 사용된 충전재의 물리적 특성 및 모습을 보여준다.

2. 배합설계 및 제작

포러스 콘크리트의 강도, 투수계수, 공극률 및 동결융해저항성 등의 성능을 좌우하는 가장 중요한 인자는 사용되는 결합재의 특성 및 사용량으로서 결합재인 불포화 폴리에스터 수지가 너무 많으면 결합재가 골재를 피복한 후 여분의 결합재에 의해 공극이 채워지고, 바닥면에 불투수층의 형성으로 인하여 투수 포장의 기능을 할 수 없게 된다. 투수 포장을 위한 포러스 콘크리트는 일반 콘크리트와는 달리 투수를 위한 많은 연속적인 공극을 가져야 하며, 우수를 실시간으로 투수시키기 위해서 충분한 투수계수와 공극률을 확보하여야 한다.

Table 4는 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 충전재 종류에 따른 배합설계를 보여준다. 본 연구에서는 투수성 아스팔트 포장의 공극률 기준 8 %와 투수성 아스팔트 혼합물의 투수계수 기준인 1×10^{-2} cms를 만족할 수 있도록 배합을 하였다 (KS F 2385, 2008). 결합재량은 충전재의 종류에 따른 특성을 분석하기 위하여 충전재의 종류에 관계없이 동일량을 사용하였으며, 결합재량에 따른 강도 및 공극률을 평가하기 위하여 6~9 %의 결합재량을 사용하였다. 경화제는 작업시 온도 및 제작 시간을 고려하여 결합재 중량의 1 %를 사용하였다. 굵은골재 및 잔

Table 1 General properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity at 20 °C	Viscosity at 20 °C (poise)	Styrene content (%)	Acid value
1.12	3.5	37.2	26.5

Table 2 Physical properties of aggregate

Type	Size (mm)	Bulk density (kg/m ³)	Specific gravity (20 °C)	Absorption ratio (%)	Fineness modulus
Recycled coarse	5~20	1,597	2.64	1.28	6.84
Fine	0.15~5	1,675	2.62	0.87	2.66

Table 3 Physical properties of filler

Type	Specific gravity (20 °C)	Specific surface (cm ² /g)	Grain size (mm)	Color
CaCO ₃	2.92	3,150	< 0.15	White
Fly ash	2.39	3,152	< 0.15	Gray
Blast furnace slag	2.92	4,401	< 0.15	White

Table 4 Mix design of porous polymer concrete with different Fillers (Unit : wt.%)

Mix Type	G _{max}	Binder	Aggregate		Filler		
		Unsaturated polyester resin	Coarse	Fine	CaCO ₃	Fly ash	Blast furnace slag
PC-CA	20	6	72	14	8	—	—
		7	71	14	8	—	—
		8	70	14	8	—	—
		9	69	14	8	—	—
PC-FA		6	72	14	—	8	—
		7	71	14	—	8	—
		8	70	14	—	8	—
		9	69	14	—	8	—
PC-BS		6	72	14	—	—	8
		7	71	14	—	—	8
		8	70	14	—	—	8
		9	69	14	—	—	8

* PC : Porous Polymer Concrete,

CA : CaCO₃, FA : Fly Ash, BS : Blast Furnace Slag

Fig. 1 Interlocking block view with block type

Table 5 Mix design of permeable polymer block for permeability model and field application (Unit : wt.%)

Mix Type	Gmax (mm)	Binder	Aggregate		Filler
		Unsaturated polyester resin	Coarse	Fine	Blast furnace slag
PC-BS	20	8	70	14	8

골재는 다수의 연속 공극을 가질 수 있도록 일반 콘크리트에 비하여 굵은골재의 비율을 높이고 잔골재의 비율은 감소시켰으며, 충전재는 결합재와의 페이스트 형성으로 골재를 피복할 수 있는 체적을 확보할 수 있도록 전체 중량의 8 %를 사용하였다. 포리스 폴리머 콘크리트의 제작은 진동기에 의한 진동 다짐을 하였으며, 성형된 몰드는 3시간 후 탈형하여 28±1 °C의 양생실에서 재령 7일 동안 양생하였다.

또한, 투수성 포장 모형 실험 및 현장 적용을 위한 투수성 폴리머 블록은 충전재 및 결합재에 따른 포리스 폴리머 콘크리트의 역학적 특성 실험 결과를 토대로 최적배합으로 판단된 Table 5에서 제시된 배합으로 제작하였다. 투수성 폴리머 블록의 형상은 기존 블록과의 비교를 위하여 300×300×80 mm의 평판블록, 200×100×80 mm의 I형 블록과 300×300×80 mm의 H형 블록으로 하였으며, Fig. 1은 형상별 블록의 인터로킹 모습을 보여 준다.

3. 시험방법

가. 공극률

포리스 폴리머 콘크리트의 공극률 시험은 일본 에코콘크리트 연구위원회의 포리스 콘크리트의 공극률 시험방법(안) 중 용적법에 의하여 측정하였으며, 다음 식(1)에 의하여 산출하였다.

$$V_0 = \left[1 - \frac{(W_2 - W_1)}{V} \right] \times 100 \quad (1)$$

여기서, V_0 = 공극률 (%)

W_1 = 수중에서의 공시체 중량 (g)

W_2 = 기건 양생한 공시체의 중량 (g)

V = 공시체의 체적 (cm^3)

나. 강도

압축강도 시험은 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 공시체를 제작하여 재령 7일에 KS F 2481 (폴리에스터 레진 콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 규정된 방법에 준하여 130 kgf/s의 속도로 하중을 재하 하였으며, 휨강도 시험은 60×60×240 mm의 공시체를 제작하여 KS F 2482 (폴리에스터 레진 콘크리트의 휨강도 시험방법)에 규정된 방법에 준하여 5 kgf/s의 속도로 하중을 재하 하였다. 투수성 폴리머 블록의 휨강도는 KS F4419 (보·차도용 콘크리트 인 터로킹 블록) 규정에 준하여 측정하였다.

다. 투수계수

포리스 폴리머 콘크리트의 투수계수는 일본 에코콘크리트연구위원회의 포리스 콘크리트의 투수계수 시험방법(안)에 준하여 Fig. 2와 같은 시험장치를 이용하여 투수계수를 측정하였으

Fig. 2 Water permeability test apparatus

며, Darcy법칙에 근거하여 식 (2)에 의하여 산출하였다.

$$K = \frac{HQ}{Ah(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

여기서, K = 투수계수 (cm/s)

H = 시료 높이 (cm)

A = 단면적 (cm²)

h = 수위차 (cm)

Q = ($t_2 - t_1$) 시간내에 통과한 수량 (cm³)

라. 동결융해저항성

동결융해저항성 시험은 60×60×240 mm의 공시체를 제작하여 재령 7일에 KS F 2456 (급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)에 준하여 수중 급속 동결융해시험을 하였으며, 이때 공시체의 온도는 동결시 -18 ℃, 융해시 4 ℃가 되게 하였고 동결융해의 1사이클은 4시간이 소요되었다. 시험동안 매 50 사이클 간격으로 중량변화율을 측정하였고, 동결융해의 반복이 300 사이클이 되었을 때 시험을 완료하였다.

마. 우수 침투-유출 특성

투수 블록 포장에 의한 우수 유출 저감 특성을 평가하기 위하여 투수 블록 포장에 대한 수리모형 실험을 실시하였으며, Fig. 3은 수리모형 실험을 위한 투수 블록 포장의 구성을 보여준다. 투수 블록 포장은 노상층, 자갈층, 모래층 및 투수성 폴리머 블록의 표층으로 구성된다. 또한 수리모형 실험을 위하여 강우강도 재현을 위한 강우모사장치, 포장체 상부 및 하부에서 실시간 강우량 및 우수 침투량 산정을 위한 저수조를 설치하였다. 투수 블록 포장체의 제원에서 포장 두께는 차도용 블록 포장 기준에 준하여 노상층 200 mm, 자갈층 200 mm 및 모래층 30 mm로 하였으며, 모래층의 유실방지를 위하여 자갈층과 모래층 사이에 섬유 슈트를 설치하였다. 투수 포장 단면은 1800 cm×900 cm의 크기로 하였으며, Fig. 4에서 보는 바와 같이 300×300×80 mm의 전단면 투수성 폴리머 평판 블록을 설치하였다. 강우모사장치는 저수조, 모터펌프, 유량계, 압력계 및 분사노즐로 구성되었으며, 압력계 및 조절밸브에 의하여 다양한 강우강도를 재현할 수 있을 뿐만 아니라 강우포장 단면에 전체적으로 강우를 공급할 수 있도록 분사노즐을 분산 배치하였다. 강우강도 재현을 위하여 실험 시작 전에 강우량 및 강우강도를 측정하였으며, 유출량 및 저류량 (투수 포장체의 노상층을 완전히 통과해 하부 저수조에서의 유량)은 저수조를 이용하여 직접 측정하였다. 포장체에서의 포화량은 침투량에서 저류량을 제외한 부분으로 계산하였으며, 침투량은 표면 유출이외의 유량 손실은 없다는 가정하에 다음 식

Fig. 3 Hydraulic model for rainfall runoff and infiltration

Fig. 4 Permeable polymer block view in permeable block pavement

(3)에 의하여 산출하였다.

$$F = Q - \sum_{t=0}^n Q_t \quad (3)$$

여기서, F : 총 침투량 (m³)

Q : 총공급량 (m³)

Q_t : 시간에 따른 유출량 (m³)

III. 결과 및 고찰

1. 공극률

투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트는 우수가 쉽게 통과될 수 있도록 충분한 공극을 가져야 할 뿐만 아니라 상부의 하중을 표층 아래로 안전하게 전달할 수 있도록 충분한 강도 및 내구성이 확보되어야 한다. Fig. 5는 결합재량 및 충전재에 따른 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 공극률을 보여준다. 충전재의 종류에 관계없이 KS F 2385 (투수성 아스팔트 혼합물)에서 규정하고 있는 공극률 8 % 이상을 모두 상회하는 것으로 나타났으며, 결합재량이 증가할수록 공극률은 감소하는 경향

Fig. 5 Void ratio with fillers and binder contents

을 나타내었다. 충전재에 따른 공극률에서, PC-BA 배합의 공극률은 결합재에 따라 12~22 %의 범위를 나타내어 PC-CA 및 PC-FA의 공극률 14~26 % 및 13~24 % 보다 다소 낮게 나타났다. 포러스 폴리머 콘크리트의 공극률은 사용된 굵은골재 및 잔골재의 입도 및 배합에 의해 좌우 될 뿐만 아니라 결합재와의 결합으로 페이스트를 형성하는 충전재의 사용량 및 비표면적에 크게 좌우된다. 충전재의 사용량 및 비표면적이 크면 페이스트의 점성이 커져서 골재의 피복 두께가 증가되고 결과적으로 공극률이 감소한다. 반면에 충전재의 사용량 및 비표면적이 작은 경우에는 페이스트의 점성이 감소되어 골재의 피복 두께 감소로 인한 공극률의 증가를 가져오게 된다. 따라서 비표면적인 큰 고로슬래그 미분말을 충전재로 사용한 포러스 폴리머 콘크리트의 배합이 상대적으로 비표면적이 작은 플라이 애시나 탄산칼슘을 충전재로 사용한 포러스 폴리머 콘크리트의 배합에 비하여 페이스트 (결합재 + 충전재)의 점성이 커서 공극률이 다소 감소한 것으로 판단된다. 한편, 결합재량에 따른 공극률은 충전재에 관계없이 결합재량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 9 %의 결합재량을 사용한 배합에서의 공극률은 충전재의 종류에 따라 12~14 %의 범위를 나타내어 투수 포장에서 규정하고 있는 공극률 기준 8 %를 약간 상회하는 것으로 나타났다. 또한 9 %의 결합재량을 사용한 배합에서는 진동 다짐 시간이 길어질 경우 페이스트가 하부로 흘러내려 공시체 하단이 막히는 현상이 일부 발생되어 제작시 주의가 요구되며, 공극률 측면에서 포러스 폴리머 콘크리트 제조시 9 % 이내의 결합재량이 바람직한 것으로 사료된다.

2. 강도

결합재 및 골재의 미세 구조에 의하여 강도를 발현하는 일반 콘크리트와는 달리 포러스 콘크리트의 강도는 포러스 구조 특성

상 골재와 골재의 결합력 및 결합재의 부착력 등에 의하여 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. Fig. 6은 충전재 및 결합재량에 따른 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 압축강도를 보여준다. 충전재의 종류에 관계없이 PC-CA, PC-FA, PC-BS 배합 모두에서 결합재량이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 충전재 종류에 관계없이 결합재량 6 %에서는 18.1~18.4 MPa의 압축강도를 나타내어 투수 포장을 위한 콘크리트의 압축강도 기준인 18 MPa를 약간 상회하였다 (LH 41750, 2010). 또한 충전재 종류에 관계없이 결합재량 9 %에서는 22.8~24.2 MPa를 나타내어 결합재량이 강도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

충전재 종류에 따른 PC-CA, PC-FA, PC-BS의 압축강도는 결합재량에 관계없이 고로슬래그 미분말을 사용한 PC-BS 배합에서 가장 높은 압축강도를 나타내었으며, 탄산칼슘과 플라이 애시를 사용한 PC-CA 및 PC-FA 배합에서는 유사한 압축강도를 나타내었다. 이러한 결과는 고로 슬래그 미분말의 비표면적이 탄산칼슘 및 플라이 애시에 비하여 크기 때문에 페이스트에 의한 골재의 피복두께가 증가되어 골재와 골재의 결합력이 증가하였기 때문으로 판단된다. 특히 산업부산물인 고로슬래그 미분말 및 플라이 애시를 충전재로 사용한 포러스 폴리머 콘크리트 배합의 압축강도가 탄산칼슘을 충전재로 사용한 포러스 폴리머 콘크리트의 압축강도와 거의 유사하거나 약간 크기 때문에 친환경 및 경제적 측면에서 폴리머 콘크리트 제조시 이들의 활용성이 기대된다.

한편, 압축강도 측면에서는 결합재량을 증가시키는 것이 매우 유리한 반면에 투수성 확보를 위한 공극률 측면에서는 결합재량이 너무 많은 경우 공극 막힘 등의 불투수성이 될 수 있기 때문에 상반된 특성을 가지는 강도와 공극률을 만족할 수 있는 배합을 도출하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 9 % 이상의 결합재량은 공극률을 크게 감소시켜 투수 포장 적용시 장기적으로 공극막힘에 의한 투수성이 저하되는 것을 고려할 때 7~8 %의 결합재량이 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 배합에 적절한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 충전재 및 결합재량에 따른 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 휨강도를 보여준다. 압축강도 시험결과와 마찬가지로 충전재 종류에 관계없이 결합재량이 증가함에 따라 휨강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, PC-BS 배합이 다른 배합에 비하여 높은 휨강도를 나타내었다. 결합재를 시멘트로 한 포러스 시멘트 콘크리트의 경우 시멘트의 낮은 결합력으로 인하여 압축강도에 비하여 휨강도가 크게 저하되는 반면에 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 한 포러스 폴리머 콘크리트에서는 결합재의 높은 결합력에 의하여 압축강도 뿐만 아니라 휨강도 특성이 매우 우수한 것을 알 수 있다.

Fig. 6 Compressive strength with fillers and binder contents

Fig. 8 Permeability coefficient with fillers and binder contents

Fig. 7 Flexural strength with fillers and binder contents

Fig. 9 Relation between compressive strength and water permeability coefficient

3. 투수계수

투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 투수계수는 투수 포장의 설계 및 시공을 위하여 가장 중요한 요소이며, 우수시 강 우강도에 관계없이 우수를 전부 투수시킬 수 있는 능력이 요구되어진다.

Fig. 8은 충전재 종류 및 결합재량에 따른 포러스 폴리머 콘크리트의 투수계수를 보여준다. PC-CA, PC-FA 및 PC-BS 배합에서 결합재량에 따른 포러스 폴리머 콘크리트의 투수계수는 각각 5.1×10^{-1} cm/s $\sim$ 6.2×10^{-2} cm/s, 4.6×10^{-1} cm/s $\sim$ 4.9×10^{-2} cm/s 및 4.2×10^{-1} cm/s $\sim$ 3.8×10^{-2} cm/s로 나타났으며, 결합재량이 증가할수록 투수계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 공극률의 시험결과와 마찬가지로 PC-BS 배합의 투수계수가 PC-CA 및 PC-FA 배합의 투수계수에 비하여 다소 감소하는 경향을 나타내었으나, 충전재 종류 및 결합재량에 관계없이 모든 배합에서 투수성 아스팔트 혼합물의 투수계수 기준인 1.0×10^{-2} cm/s를 상회하는 것으로 나타났다.

한편, 충전재 종류 및 결합재량에 관계없이 모든 배합조건에서 투수성 포장을 위한 압축강도 기준 18 MPa와 투수계수 기준 1×10^{-2} cm/s를 만족하는 것으로 나타났으나, 실내시험과는 달리 현장 적용시 품질 저하 및 장기 사용하에서 공극 막힘 및 내구성 저하 등의 문제가 발생될 수 있기 때문에 Fig. 9의 경계조건을 만족하는 배합이 최적배합으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 동결융해저항성

콘크리트에 동결융해가 반복적으로 작용하는 경우 콘크리트 내 수분의 동결 및 융해의 반복으로 체적 팽창이 발생하게 되고, 표면에서 스케일링이나 팍아웃 현상 등이 수반되어 상대동탄성계수의 감소 및 내구성 저하가 나타나는 것으로 알려져 있다 (Pigeon et al., 1995). 반면에 포러스 콘크리트는 일반 콘크리트와 달리 골재와 골재의 결합에 의해 이루어지기 때문에 동결융해 작용시 일반 콘크리트와는 다른 매카니즘을 가지는 것으로

Fig. 10 Weight change for 300 cycle of freezing and thawing

알려져 있다. 특히 투수 포장을 위한 포러스 콘크리트는 내부에 많은 물을 항상 포함하게 되며, 동결시 물의 팽창에 의해 골재와 골재의 결합력 감소로 인하여 골재 탈락 및 파괴가 발생되어지며, 일반 콘크리트에 비하여 동결융해에 대한 저항성이 낮은 것으로 보고되고 있다. 한편, 동결융해저항성은 동탄성계수 측정에 의한 상대동탄성계수를 구하여 내구성 지수로 평가하지만 포러스 콘크리트의 경우 많은 공극으로 인하여 동탄성계수의 측정시 문제점을 내포하기 때문에 본 연구에서는 동결융해사이클에 따른 중량변화 및 골재 탈락 등의 외관을 관찰하여 동결융해에 대한 내구성을 평가하였다.

Fig. 10 충전재 종류 및 결합재량에 따른 투수 포장을 위한 포러스 폴리머 콘크리트의 동결융해에 대한 중량변화를 보여준다. PC-CA 배합에서 결합재량에 따른 동결융해 300 사이클 후 포러스 폴리머 콘크리트의 중량 감소율은 1.4~4.2 %로서, 결합재량에 관계없이 중량 감소 및 포러스 폴리머 콘크리트 표면의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 산업폐기물 및 부산물인 플라이 애시 및 고로 슬래그 미분말을 충전재로 사용한 PC-FA 및 PC-BS 배합에서 결합재량에 따른 동결융해 300 사이클 후 포러스 폴리머 콘크리트의 중량 감소율은 각각 1.1~3.6 % 및 1.2~3.6 % 범위로서 PC-CA 배합의 중량 변화와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 시멘트 포러스 콘크리트의 경우 동결융해시 결합재인 시멘트의 낮은 부착력으로 인하여 골재와 골재의 결합력 감소로 골재 탈락 및 내구성 저하가 두드러지게 발생하는 반면에 포러스 폴리머 콘크리트는 부착특성이 우수한 불포화폴리에스터 수지의 사용으로 골재와 골재와의 부착이 매우 우수하여, 동결융해 300 사이클이 경과한 후에도 골재 탈락 등의 내구성 저하 현상이 발생되지 않은 것으로 판단된다.

5. 투수성 폴리머 블록

투수성 포장은 도시에서 발생한 우수의 침투, 도시 유출에서

의 오염 물질의 제거, 지하수 함양 등의 기능을 가지고 있으나 일반 포장재와 비교할 때 강도 및 내구성이 다소 떨어지는 단점을 가지고 있어 보도 및 주차장 등으로 사용이 제한되어 왔다. 특히, 블록 포장은 접근성과 안전성이 요구되는 곳에 적용될 수 있는 공법으로 공용성, 심미적 아름다움 및 시공 즉시 교통개방을 제공할 뿐만 아니라 종류 및 형상의 다양성, 색상의 다양성 등으로 주변 환경과 조화를 이루는 친환경적 기능을 가지고 있으나 기존의 시멘트를 결합재로 한 투수성 블록의 경우 우수 침투에 요구되는 충분한 공극을 확보하면서 강도 및 동결융해저항성과 같은 내구성을 가지는 제품을 생산하는 것이 곤란하다.

KS F 4419에서 보·차용 인터로킹 블록의 강도는 휨강도로 규정되며, 보통 블록의 경우 휨강도는 보도용 및 차도용에 관계없이 5 MPa 이상으로 규정하고 있으며, 투수성 블록의 경우 보도용 및 차도용에 대해 각각 4 MPa 및 5 MPa 이상으로 제한하고 있다. 300×300×80 mm 평판 블록 및 200×100×80 mm I형 블록은 각각 12.9 MPa 및 11.8 MPa로 나타났으며, 300×300×80 mm H형 블록은 10.4 MPa를 나타내어 KS에서 규정하고 있는 투수성 인터로킹 블록의 휨강도 기준인 5 MPa를 크게 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 투수성 폴리머 블록의 경우 투수 블록 포장을 위한 휨강도 뿐만 아니라 동결융해저항성에 따른 내구성 또한 매우 우수한 것을 고려할 때 보도용 및 차도용 포장에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 우수 유출-침투 특성

강우강도 50 mm/hr, 100 mm/hr 및 200 mm/hr에 대한 투수성 폴리머 블록 포장의 수리모형 실험을 통하여 실시간 우수 유출-침투 실험을 실시하였으며, 강우 지속에 따른 표면 유출량, 침투량, 저수조의 저류량 및 포장체 내부에서의 포화량 등이 측정 및 산출되었다.

가. 강우강도 50 mm/hr

Fig. 11 및 Fig. 12는 인공강우 지속시간 12시간 및 강우강도 50 mm/hr에 대한 강우 유출-침투 특성을 보여준다. 강우가 시작되면서 동시에 강우가 포장체 상부 투수성 폴리머 블록을 통과하여 하부지반으로 침투되었으며, 하부지반을 통과한 강우가 하부 저수조에 도달하는 데는 약 7분이 소요되었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 강우 발생 후 240분까지는 강우량과 침투량이 거의 동일한 수준을 나타내어 표면 유출이 전혀 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 강우 발생 후 300분이 경과하면서 표면 유출이 발생하기 시작하였다. 또한 강우 발생 후 360분이 경과하면서 포장체 내부가 점차 포화 상태에 도달하여, 표면유출과 침투가 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 강우가 12시간 지속되는 동안 총 0.97 m^3 의 강우가 공급되어 이 중 0.31 m^3 이 표면 유출되었으며, 0.66 m^3 이 포장체 하부로 침투되었다. 한편 Fig. 12에서 보는 바와 같이 강우강도 50 mm/hr에 대한 투수성

Fig. 11 Accumulated infiltration and runoff with rainfall

Fig. 12 Infiltration capacity with rainfall

폴리머 블록 포장의 수리모형 실험 종료시 최종 유출을 및 침투율은 각각 32 % 및 68 %를 나타내었으며, 투수성 블록 포장에 의해 표면 유출 시점을 크게 지연시킬 수 있을 뿐만 아니라 표면 유출량 또한 크게 저하시킬 수 있을 것으로 판단된다.

나. 강우강도 100 mm/hr

Fig. 13 및 Fig. 14는 인공강우 지속시간 12시간 및 강우강도 100 mm/hr에 대한 강우 유출-침투 특성을 보여준다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 강우강도 100 mm/hr에 대한 투수 블록 포장의 수리모형 실험에서 표면 유출은 강우 발생 후 120분이 경과하면서 시작되었으며, 강우강도 50 mm/hr에 비하여 표면 유출 시점이 180분 단축되는 것으로 나타났다. 강우 발생 후 120분이 경과하면서 투수성 블록 포장체 하부 지반이 포화 상태 수준에 도달하면서 표면 유출량의 증가가 두드러지게 나타났으며, 상대적으로 포장체 하부 저수조에서 저류량 및 침투량의 증가 추

Fig. 13 Accumulated infiltration and runoff with rainfall

Fig. 14 Infiltration capacity with rainfall

세가 다소 둔화되는 경향을 나타내었다. 한편, 강우가 12시간 지속되는 동안 총 1.94 m³의 강우가 공급되어 이 중 0.86 m³이 표면 유출되었으며, 1.086 m³이 포장 모형 하부로 침투되었다. 한편 Fig. 14에서 보는 바와 같이 강우강도 100 mm/hr에 대한 투수성 폴리머 블록 포장의 수리모형 실험 종료시 최종 유출율 및 침투율은 각각 56 % 및 44 %를 나타내었으며, 강우강도 50 mm/hr에 대한 최종 유출율 32 %에 비하여 유출율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

다. 강우강도 200 mm/hr

Fig. 15 및 Fig. 16은 인공강우 지속시간 6시간 및 강우강도 200 mm/hr에 대한 강우 유출-침투 특성을 보여준다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 강우강도 200 mm/hr에 대한 투수 포장의 수리모형 실험에서 표면 유출은 강우 발생 후 약 50분이 경과하면서 시작되었으며, 강우강도 50 mm/hr에 비하여 표면 유출 시점

이 250분 단축되는 것으로 나타났다. 또한, 강우 지속시간 190분 이후에는 유출량이 침투량 보다 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 강우가 6시간 지속되는 동안 총 1.94 m³의 강우가 공급되어 이 중 1.18 m³이 표면 유출되었으며, 0.77 m³이 포장 모형 하부로 침투되었다. 한편 Fig. 16에서 보는 바와 같이 강우강도 200 mm/hr에 대한 투수성 폴리머 블록 포장의 수리모형 실험 종료시 최종 유출율 및 침투율은 각각 61 % 및 39 %로서 유출율이 침투율 보다 크게 나타났다.

이러한 결과는 강우 초기에는 상부 포장체인 투수 블록에 의한 투수가 원활히 이루어져 침투량이 증가하였으나 강우가 지속됨에 따라 상대적으로 투수계수가 낮은 하부 지반이 포화되면서 포장체 전체의 투수성이 크게 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 강우강도가 클수록 투수성 포장의 하부 지반의 포화 속도가 빨라지면서 강우가 역류하여 표면 유출량이 크게 증가하는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 불포화 폴리에스테르수지와 충전재로 탄산칼슘, 산업 폐기물 및 부산물인 플라이 애쉬와 고로슬래그 미분말을 활용한 투수성 폴리머 콘크리트의 물리·역학적 특성을 구명하고, 최적 배합을 도출하여 투수 포장을 위한 투수성 폴리머 블록을 개발하여 투수 블록 포장의 수리모형 실험을 통하여 실시간 우수 유출-침투 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 충전재의 종류 및 결합재량에 관계없이 모든 배합에서 투수성 아스팔트 혼합물에서 규정하고 있는 공극률 8 % 이상 및 투수계수 1.0×10^{-2} cm/s를 상회하는 것으로 나타났으며, 결합재량이 증가할수록 공극률 및 투수계수는 감소하는 경향을 나타내었다. PC-BA 배합의 공극률 및 투수계수가 PC-CA 및 PC-FA의 배합에 비하여 다소 낮게 나타났으며, 사용성 측면에서 장기적인 공극 막힘 현상 등을 고려할 때 7~8 %의 결합재량이 바람직한 것으로 판단된다.

2. PC-CA, PC-FA, PC-BS 배합 모두에서 결합재량이 증가할수록 압축강도 및 휨강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 투수성 콘크리트의 압축강도 기준인 18 MPa를 상회하였다. 또한 굵은골재로 재생골재를 사용하였음에도 모든 배합에서 18 MPa 이상의 강도를 나타냄으로써 재생골재를 포리스 폴리머 콘크리트의 골재로 사용하기에 충분한 것으로 판단된다.

3. PC-CA, PC-FA 및 PC-BS 배합에서 결합재량에 따른 동결융해 300 사이클 후 포리스 폴리머 콘크리트의 중량 감소율은 0.9~4.4 % 범위로서 중량 감소 및 골재 탈락 등 표면의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 투수성 폴리머 블록의 형상별 휨강도에서, 300×300×80

Fig. 15 Accumulated infiltration and runoff with rainfall

Fig. 16 Infiltration capacity with rainfall

mm 평판 블록 및 20×10×8 cm I형 블록은 각각 12.9 MPa 및 11.8 MPa로 나타났으며, 300×300×80 mm H형 블록은 10.4 MPa를 나타내어 KS에서 규정하고 있는 투수성 인터로킹 블록의 휨강도 기준인 5 MPa를 크게 초과하는 것으로 나타났다.

5. 강우강도 50 mm/hr 및 200 mm/hr에 대한 투수 블록 포장 수리모형 실험에서 강우 발생 후 각각 300분 및 50분이 경과하면서 표면 유출이 발생하기 시작하였으며, 수리모형 실험 종료 시 최종 유출율 및 침투율은 각각 32 %, 61 % 및 68, 39 %로서 강우강도가 증가함에 따라 최종 침투율이 감소하는 것으로 나타났다.

6. 투수성 블록 포장에 의해 표면 유출 시점이 크게 지연될 뿐만 아니라 표면 유출량 또한 크게 감소될 수 있기 때문에 투수성 포장에 활용할 경우 우수유출 저감 및 지하수 함량 증대 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 2011년도 농림수산식품기술기획평가원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, L., and J. C. Kim. 1998. ECO-Concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute* 10(6): 11~21 (in Korean).
- Chae, C. W., 2002, Physical Properties of Porous Concrete Using Admixtures, *Journal of the Korea Concrete Institute* 14(2): 257~265 (in Korean).
- Chindaprasirt, P., S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima., and Y. Yuasa, 2008, Cement Paste Characteristics and Porous Concrete Properties, *Construction Building Material* 22(5): 894~901.
- Fann, D. M., S. K. Huang., and J. Y. Lee, 1996, Kinetics and Thermal Crystallinity of Recycled PET. II. Topographic Study on Thermal Crystallinity of the Injection-molded Recycled PET, *Journal of Applied Polymer Science* 61(2): 261~271.
- Kim, Y. K., and C. Y. Sung, 2005, Characteristics of Environment-Friendly Porous Polymer Concrete for Permeable Pavement, *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 47(7): 25~33. (in Korean)
- KS F 2385, 2008, Permeable Asphalt Mixtures, *Korean Standard* (in Korean).
- Ko, E. J., E. J. Goh, H. J. Seok., and S. H. Lee, 2009, A Study of Developing Guides for the Construction Site Quality Control of Porous Concrete, *The Journal of the Korean Institute of Building Construction* 9(3): 65~71 (in Korean).
- Lee, Y. S., and M. K. Joo, 2002, Fundamental Properties of Water-Permeable Polymer-Modified Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute* 14(3): 402~408 (in Korean).
- LH 41750, 2010, Permeability Cement Concrete Pavement, *Korea Land and Housing Corporation* (in Korean).
- Muthukumar, M., and D. J. Mohan, 2004, Optimization of Mechanical Properties of Polymer Concrete and Mix Design Recommendation Based on Design of Experiments, *Journal of Applied Polymer Science* 94(3): 1,107~1,116.
- Pigeon, M., and R. Pleau, 1995, Durability of Concrete in Cold Climates: 34.
- Pindado, M. A., A. Aguado., and A. Josa, 1999, Fatigue Behavior of Polymer-modified Porous Concretes, *Cement and Concrete Research* 29(7): 1,077~1,083.
- Park, S. B., D. S. Seo., and J. Lee, 2004, A Study on the Sound Absorption Properties of Porous Concrete by Recycled Aggregate Contents and Target Void Ratio, *Journal of the Korea Concrete Institute* 16(4): 541~548 (in Korean).
- Park, S. B., E. S. Yoon, D. S. Seo., and J. Lee, 2005, Mechanical Properties of Porous Concrete for Pavement Using Recycled Aggregate and Polymer, *Journal of the Korea Concrete Institute* 17(4): 595~602 (in Korean).
- Roy, A, 2009, Sulfur Speciation in Granulated Blast Furnace Slag: An X-ray Absorption Spectroscopic Investigation, *Cement and Concrete Research* 39(8): 659~663.
- Sung, C. Y., and H. J. Jung, 1996, Engineering Properties of Permeable Polymer Concrete with Stone Dust and Fly ash, *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 38(4): 147~154 (in Korean).
- Wang, X. Y., H. S. Lee, 2010, Modeling the Hydration of Concrete Incorporating Fly Ash or Slag, *Cement and Concrete Research* 40(7): 984~996.