투수성 폴리머 콘크리트의 공극률, 투수계수 및 동결융해 후 압축강도

Porosity, Permeability, and Compressive Strength after Freezing and Thawing of Permeable Polymer Concrete

이윤제* · Aryssa Kathreen Marcaida** · 안재훈*** · 이태형**** · 차명환*****

Lee, Yunje*, Marcaida, Aryssa Kathreen**, Ahn, Jaehun***, Lee, Taehyeong****, and Cha, Myunghwan*****

Abstract

Permeable pavements are one of the most widely employed low impact development techniques. In this study, the physical characteristics of permeable polymer concrete materials were assessed. For varying contents of silica sand, the porosity, permeability, and compressive strength were experimentally evaluated before and after freeze-thaw cycles. The results indicate that specimens with a high content of silica sand possess low porosity, low permeability, and high compressive strength. Additionally, under identical compaction efforts, specimens with greater content of silica sand had higher unit weights. After 300 freeze-thaw cycles, the compressive strength of the specimens reduced to approximately 60% of the initial value. The standards for moisture conditions associated with freezing and thawing of permeable concrete have not been established yet. Hence, it is necessary to develop testing standards that take Korean environments into consideration.

Key words : Permeable Pavement, Polymer Concrete, Permeability, Compressive Strength, Freezing and Thawing

요 지

도시 수환경 개선을 위한 저영향개발 기법의 요소 기술 중 하나인 투수성 포장에 현재 국·내외에서 그 적용 사례가 빠른 속도로 증가하고 있다. 본 연구에서는 투수성 폴리머 콘크리트 포장재를 대상으로, 콘크리트 배합에의 규사 함유량에 따른 공극률과 투수계수를 분석하고, 또한 동결융해 처리 전·후의 압축강도를 평가하였다. 규사 함유량이 증가함에 따라 같은 다짐 정도에서 단위중량이 증가하였으며, 이에 따라 공극률과 투수계수가 감소하는 결과를 보였다. 압축강도의 경우, 규사 함유량 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 전체 골재 중 규사가 30%에 해당하는 경우에는 경교통량 하의 설계기준을 만족할 것으로 예측되었다. 본 논문에서는 300회의 동결융해 반복과정을 거쳤으며, 이 후의 압축강도는 초기 값의 약 60% 정도에 해당하는 것으로 나타났다. 투수성 포장재의 동결융해 시험에 대한 기준은 아직 정립된 바 없으며, 국내 기후환경에 적합한 동결융해 사이클과 포화 조건의 개발을 통해 동결융해 저항성에 대한 시험 기준을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 투수성 콘크리트, 폴리머 콘크리트, 투수계수, 압축강도, 동결융해

*정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(E-mail: leeyunje@pusan.ac.kr)

Member, M.S Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(E-mail: mkaaath@gmail.com)

M.S Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

***교신저자, 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수(Tel: +82-51-510-7627, Fax: +82-51-510-9596, E-mail: jahn@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

****에스비비(주) 대표(E-mail: satumi68@naver.com)

CEO, SBB Co., Ltd.

*****에스비비(주) 부장(E-mail: cha8081@naver.com)

General Manager, SBB Co., Ltd.

1. 서 론

최근 심화되고 있는 기후변화와 지속적인 도시화는 도심의 침수피해를 증가시키고 있다. 이에 따라, 도시 수환경 개선을 위한 방법의 하나로, 그린인프라(Green Infrastructure, GI) 및 저영향 개발(Low Impact Development, LID) 기법의 적용이 확대되고 있는 추세이다(Han, 2011). 저영향개발 요소 기술 중 하나로 투수성 포장을 들 수 있으며, 투수성 포장은 보도, 자전거도로 및 저교통량 도로등에서 적용 사례가 늘고 있다. 투수성 포장의 기능으로는 유출량 저감, 침투유량 감소, 열섬 현상 완화, 도로 표면 결빙 및 수막현상 방지, 소음 공해 저감 등을 들 수 있다.

투수성 포장은 강우 침투를 위한 충분한 침투 능력과 공극률을 확보해야 한다. 동시에 투수성 포장은 보행자, 자전거, 차량 등의 교통 하중을 지지해야 하므로 이에 대한 충분한 안정성 및 내구성을 만족해야 한다. 특히, 겨울철 기온이 낮은 지역에서는, 포장체 공극사이에 침투한 물이 기상요인에 의해 동결과 융해를 반복하며 포장체의 강도를 저하시킬 가능성이 있기 때문에 동결융해에 대한 저항성을 확보하여야 한다.

기존의 실험적 연구결과로부터 투수성 콘크리트의 골재 배합에 따라 강도, 투수계수, 공극률 등이 차이를 보이는 것으로 나타났다. Chae et al. (2000)은 폴리머 혼화재량, 골재의 크기, 단위시멘트량을 변수로 하여 투수성 폴리머 콘크리트의 배합을 통해 강도, 투수계수, 공극률의 변화를 측정하였다. Park et al. (1998)은 투수성 폴리머 콘크리트의 폐색으로 인하여 역학적 성질 및 투수성능에 영향을 미칠 수 있는 것을 고려하여 각종 필터용 폴리머 모르타르를 투수성 폴리머 콘크리트 위쪽에 타설한 후 강도 및 투수계수를 측정하였다. Choi and Hwang (2002)은 폴리머 혼화재량, 충전재(탄산칼슘), 잔골재 및 굵은 골재량을 변수로 하여 투수성 폴리머 콘크리트의 배합을 통해 강도, 투수계수, 공극률을 측정하였다. Yin et al. (2002)은 폴리머 혼화재량, 충전재(석회석 미분말), 골재(부순돌)량을 변수로 하여 투수성 콘크리트의 배합을 통해 압축강도, 투수계수, 공극률을 측정하였다.

하지만 투수성 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성 측정을 위한 시험방법과 그 결과는 아직 정립된 바 없다. 이에 따라, 투수성 폴리머 콘크리트의 규사 함유율에 따른 공극률과 투수계수를 먼저 평가하고 동결융해 전·후의 압축강도를 분석하였다.

2. 투수성 폴리머 콘크리트 시료

본 연구의 투수성 폴리머 콘크리트는 폴리우레탄(Polyurethane)을 바인더로 사용하여 골재와 배합된 강우 침투를 위한 연속된 공극을 가지는 폴리머 콘크리트를 말한다.

시료 제작을 위한 바인더로 폴리올과 기타 첨가제, 엠디아 이 화합물을 결합한 폴리우레탄을 사용하였으며, 폴리우레탄 바인더 함유율은 5%로 배합하였다. 골재는 직경 10 mm이하인 화강암과 규사를 정해진 비율로 섞어서 사용하였다. 투수성 폴리머 콘크리트의 배합 정보와 시료 번호가 Table 1에 제시되어 있다. 골재와 혼합하여 사용한 규사는 3호(직경 1.4 mm ~ 2.2 mm)를 사용하였다. 공시체는 KS F 2403 (2014)을 따라 직경 100 mm, 높이 200 mm가 되도록 제작하였으며, 시료의 예가 Fig. 1에 제시되어 있다. Table 1에 보인 바대로 기준에 따라 공시체를 제작하였을 때, 규사의 함유량이 많을수록 공극이 틈틈이 채워지는 효과가 있어, 단위중량이 더 커지는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이 단위중량의 차이로 인한 포장재 물성의 차이를 분석하고자 한다.

Fig. 1. Pervious Polymer Concrete Samples

Table 1. Pervious Polymer Concrete Specimen Composition

Case	Aggregate content (%)	Sand content (%)	Binder content (%)	Unit weight (kN/m ³)
P0	100	0	5	15.7
P1	90	10		16.1
P2	80	20		16.3
P3	70	30		16.8

3. 시험 방법

본 연구에서는 투수성 폴리머 콘크리트의 공극률, 투수계수, 동결융해 전·후의 압축강도를 산정하기 위한 시험을 수행하였으며, 그 시험과정은 다음과 같다.

3.1 공극률

투수성 폴리머 콘크리트의 공극률을 측정하기 위해서 수중중량을 이용한 투수성 콘크리트의 공극률 산정 방법을 사용하였다(Ahn et al., 2013). Fig. 2의 수중중량을 측정하기 위한 장치를 사용하였으며, 공극률을 산정하는 식은 Eq. (1)과 같다.

$$n = 1 - \frac{\frac{W_D - W_S}{\gamma_w}}{V_T} (\times 100) \quad (1)$$

이 때, n 은 백분율로 나타낸 시료의 공극률, V_T 는 시료의 부피, γ_w 는 물의 단위중량, W_D 는 시료의 건조중량, W_S 는 시료의 수중중량을 나타낸다.

Fig. 2. Measurement of Submerged Weight (Ahn et al., 2013)

공시체의 수중중량을 측정하기 전에 시료를 포화시키는 과정이 필요하며, 이를 위해 아스팔트의 이론최대밀도를 측정하기 위한 장비를 사용하여 부압과 진동을 가하여 투수성 폴리머 콘크리트를 포화시키는 과정을 거쳤다. Fig. 3에 이론최대밀도 시험기가 제시되어 있으며, 시료의 포화를 위한 작업은 용기에 시료를 넣고 진동대를 가동한 후 20분간 진행되었다.

Fig. 3. Theoretical Maximum Density Tester (Heung Jin Testing Machine Co., Ltd., 2015)

3.2 투수계수

투수성 폴리머 콘크리트의 투수계수는 정수두 시험을 통해 산정하였다. 정수두 시험은 투수성 포장재의 투수계수 산정을 위해 Ahn et al. (2017)이 개발한 장비를 사용하였으며

(Ahn and Shin, 2018), Fig. 4에 해당 시험장비가 제시되어 있다. 장비의 상세 사항과 시험과정에 대한 상세 내용은 Ahn et al. (2017)에 보인 바와 같다.

Fig. 4. Equipment to Measure Permeability of Permeable Pavement Materials (Ahn et al., 2017)

투수성능을 나타내는 지표인 투수계수를 결정하기 위해 Eq. (2)를 사용하였다.

$$q = kiA \quad (2)$$

이 때, q 는 단위시간당 유량, k 는 투수계수, i 는 동수경사, A 는 시료의 단면적을 나타낸다. 본 연구에서는 동수경사 $i=1$ 바탕으로 투수계수를 측정하였다. 단, 투수성 포장재는 공극의 크기가 커서 동수경사와 유출속도 혹은 단위시간당 유량과의 관계가 직선이 아닌 경우가 많으며, 이에 따라 동수경사가 달라질 경우 측정되는 투수계수의 값도 달라질 수 있음을 밝힌다.

3.3 동결융해 전·후의 압축강도

동결융해시험은 KS F 2456 (2013)의 콘크리트의 급속 동결 융해 시험의 동결융해 온도 사이클을 바탕으로 투수성 포장재의 특수한 사항을 고려하여 새로운 시험 방법을 설정하였다.

동결융해 사이클의 온도는 KS F 2456의 $-18 \sim 4^\circ\text{C}$ 로 동결융해 1사이클 소요 시간은 3시간으로 설정하였다. Fig. 5에 동결융해 온도 사이클이 제시되어 있다. 기존의 시험법에 고려되지 않는 투수성 포장재의 강우에 의한 포화상태를 고려하기 위해 시료를 담을 수 있는 용기를 제작하여 사용하였다. 동결융해 시험 과정 중에 항상 시료를 포화시키도록 제작한 용기의 내부 크기는 직경 10.8 cm, 높이 21.5 cm이며, 본 용기를 바탕으로 한 동결융해 과정이 Fig. 6에 제시되어 있다.

Fig. 5. Freezing and Thawing Cycle

Fig. 6. Specimens During Freezing and Thawing

동결융해 사이클은 총 300회를 수행하였다. 시료의 압축 강도 시험을 동결융해 과정 전·후에 실시하여 동결융해로 인한 시료 강도의 변화를 측정하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405 (2010)를 기준으로 진행하였으며, Eq. (3)에 의해 압축강도를 계산하였다.

$$f_c = \frac{P}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3)$$

이 때, f_c 는 압축강도, P 는 최대 파괴하중, d 는 시료의 직경을 나타낸다.

4. 시험 결과

본 연구에서 수행한 투수성 폴리머 콘크리트의 공극률, 투수계수, 동결융해 전·후의 압축강도의 결과는 다음과 같다. 본 논문에 보인 모든 시험은 각 2회 수행되었으며, 본 논문에 제시된 결과는 그 평균치를 나타낸다.

4.1 공극률

투수성 폴리머 콘크리트의 공극률의 값이 Fig. 7에 제시되어 있다. 공극률의 범위는 대략 32% ~ 34%로 산정되었으며, 공극률의 크기는 규사를 혼입하지 않은 P0 시료가 가장 크며, 규사를 30%로 가장 많이 배합한 시료 P3이 가장 작게 나타났다. 규사의 함유율이 10%인 P1 시료와 함유율이 20%인 P2 시료 사이에는 공극률의 크기에 큰 차이가 없었다. 대체적으로, 규사의 함유율이 증가할수록 공극률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 공극률 값의 경향은 Table 1에 보인 규사 함량에 따른 시료 단위중량의 차이와 밀접하게 관계되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7. Results of Porosity

4.2 투수계수

투수성 폴리머 콘크리트의 투수계수 값이 Fig. 8에 제시되어 있다. 투수계수는 대략 0.5 cm/s ~ 1.0 cm/s의 값을 가지며, 본 값들은 모두 투수성 포장의 설계기준으로 흔히 사용되는 0.01 cm/s의 값을 만족시킨다. 규사를 혼입하지 않은 투수성 폴리머 콘크리트 시료가 가장 큰 투수계수 값을 보였으며, 규사가 10% 함유되었을 때 투수계수가 30% 정도 감소하였다. 대체적으로 볼 때 규사의 함유율이 증가할수록 투수계수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 투수계수의 영향 역시, 시료의 단위중량과 공극률의 변화 경향과 밀접한 영향을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8. Results of Permeability

4.3 압축강도

동결융해 전후의 시료에 대해 압축강도 시험을 수행하였으며 그 결과가 Fig. 9에 제시되어 있다. 동결융해 전 압축강도는 대략 7.8 MPa ~ 9.9 MPa이며, 동결융해 후 압축강도의 범위는 약 4.5 MPa ~ 6.2 MPa로 나타났다. Table 1에 보인 바대로 시료 P1과 P2의 단위중량이 근접하며, 이에 따라 두 시료의 압축강도 또한 근접하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 본 연구의 목적 중 하나는 동결융해 과정으로 인해 투수성 콘크리트 시료의 건전도 변화를 분석하는 것이었으며, 시료의 건전도를 확인하기 위한 수단으로 압축강도 시험을 수행하였다. 이에, 동결융해 전·후 압축강도비(Compressive strength ratio, CSR)를 Eq. (4)과 같이 정의하였다.

$$CSR = \frac{f_{c,untreated}}{f_{c,treated}} (\times 100) \quad (4)$$

이 때, $f_{c,untreated}$ 와 $f_{c,treated}$ 는 각각 동결융해 과정 전과 후의 압축강도를 나타낸다. 압축강도비가 Fig. 10에 주어져 있으며, 시험에 사용된 시료의 압축강도비는 모두 60% 정도의 값을 가지는 것으로 나타난다.

Fig. 9. Results of Compressive Strength

Fig. 10. Results of Compressive Strength Ratio

Table 2는 본 연구에 사용된 시료와 동일한 바인더를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 배합정보와 압축강도, 휨강도를 나타낸다. 국내 콘크리트 포장에 대한 시방서(MOCT, 1996)와 시공지침(MLTM, 2011)에 따르면, 포장용 콘크리트의 설계기준 휨강도는 4.5 MPa이며, 교통량이 적고 양질의 골재 수급이 어려운 경우 4.0 MPa까지 허용하고 있다. Table 2에 보인 바대로, 본 연구 대상의 시료와 유사한 배합과 재료를 가진 폴리머 콘크리트 시료의 휨강도가 4.5 MPa, 압축강도가 11.2 MPa인 것으로 나타난다. 이에 따라, Fig. 9에 제시된, 규사 30%를 함유한 투수성 폴리머 콘크리트 시료 P3의 압축강도 9.9 MPa는 휨강도 4.0 MPa ~ 4.5 MPa에 해당하는 값으로서, 투수성 콘크리트가 일반적으로 경교통량 하중 하에 사용된다는 것을 생각해 볼 때, 설계기준에 허용되는 값이라고 유추할 수 있다.

Table 2. Example of Compressive Strength and Flexure Strength of Polymer Concrete Material (SBB, 2018)

Item	Value	Remark
Maximum aggregate size (mm)	8.0	-
Polymer binder content (%)	4.5	-
Compressive strength (MPa)	11.2	KS F 2405
Flexure strength (MPa)	4.5	KS F 4419

5. 결 론

본 연구에서는 투수성 폴리머 콘크리트의 규사 함유율에 따른 공극률, 투수계수, 압축강도 및 동결융해 전·후의 압축강도를 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

규사의 함유량이 증가함에 따라 같은 다짐 조건에서 단위중량이 더 크고 공극률이 더 작은 시료를 성형하게 되었으며, 본 결과는 투수계수와 압축강도의 결과에 밀접하게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 규사의 함유량 증가에 따라 투수계수는 감소하고 압축강도는 증가하는 경향을 보였다. 규사의 함유율이 10%와 20%일 때, 단위중량이 유사한 시료가 형성되었기 때문에, 두 시료의 투수계수와 압축강도는 유사한 값을 보였다.

투수성 포장은 포장재가 늘 수분에 노출되어 있고, 연중 낮은 기온이 지속되는 지역에서는 동결융해에 따른 포장재 구조적 성능 저하의 우려가 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 포장재가 물 속에 잠긴 상황을 가정하여 300회의 동결융해 반복과정을 거친 후 압축강도의 변화를 분석하였다. 300회의 동결융해 후 압축강도는 초기 값의 60% 수준으로 떨어지는 것으로 분석되었다.

투수성 포장재의 동결융해 시험에 대한 기준은 아직 정립된 바 없으며, 국내 기후환경에 적합한 동결융해 사이클과 포화 조건의 개발을 통해 동결융해 저항성에 대한 시험 기준을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의해 연구되었습니다.

References

- Ahn, J., Jalmasco, M., Shin, H.S., and Jung, J. (2017). Test equipment and procedure to evaluate permeability characteristics of permeable pavements. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 359-365.
- Ahn, J., Lee, Y., Vaidya, S., Kim, J.H., and Lee, S.W. (2013). Estimation the porosity of pervious concretes based on X-Ray CT and submerged weight. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 77-81.
- Ahn, J., and Shin, H.S. (2018). *Equipment to test non-linear permeability characteristics of permeable pavement base materials considering clogging*. Korean Intellectual Property Office, Patent No. 10-1900706.
- Chae, C.U., Min, B.Y., and Shim, J.W. (2000). An experimental study on the physical properties of porous cement concrete using polymer as an admixture. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 12, No. 5, pp. 131-139.
- Choi, J.J., and Hwang, E.H. (2002). Physical properties of permeable polymer concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 1, pp. 41-48.
- Han, W.S. (2011). US low impact development applications and implications for urban rainwater management improvements. *KRIHS Policy Brief*, Vol. 344, pp. 1-6.
- KS F 2403. (2014). *Standard test method for making and curing concrete specimens*.
- KS F 2405. (2010). *Standard test method for compressive strength of concrete*.
- KS F 2456. (2013). *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (1996). *Guide specification for pavement concrete - Quality control and inspection*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Pavement roadway manual*.
- Piao, Y.M., Jo, Y.K., and Soh, Y.S. (1998). A study on the physical properties and permeability of permeable polymer concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 6, pp. 213-222.
- SBB. (2018). *Personal communication*.
- Yin, J.F., Hwang, Y.S., Lee, B.Y., Jeon, C.K., Yang, S.H., and Han, C.G. (2002). Influence on the grading of aggregates on properties of permeable polymer concrete. *Proceedings of 2002 Spring Conference*, the Korea Concrete Institute, pp. 111-116.

Received	January 24, 2019
Revised	January 25, 2019
Accepted	February 12, 2019