동결융해에 따른 투수성 폴리머 콘크리트의 인장강도와 동탄성계수

Tensile Strength and Dynamic Modulus of Pervious Polymer Concrete with Freezing and Thawing Cycles

이윤제* · 안재훈** · 오영탁*** · 이재건****

Lee, Yunje*, Ahn, Jaehun**, Oh, Yungtak***, and Lee, Jaegeon****

Abstract

The expansion of impervious areas owing to urbanization has adverse effects on water circulation. The application of low-impact development techniques to solve these problems is gaining popularity. Among others, Permeable pavements are the most widely employed low-impact development techniques. In this study, the dynamic modulus and tensile strength of pervious polymer concrete pavement were evaluated before and after freezing-thawing cycles. A tensile strength test, performed to check the soundness of the pervious polymer concrete, yielded a tensile strength and tensile strength ratio of 0.66 to 0.96 MPa, and 72 to 83%, respectively. The ultrasonic pulse velocity was measured to determine the dynamic modulus according to the freezing-thawing cycles. When 300 freezing-thawing cycles were performed, the dynamic modulus was analyzed to drop to a level of 77~85% of the initial value. The standards for freezing and thawing tests of pervious concrete have not yet been established. It is necessary to develop test standards for freezing-thawing resistance of pervious concretes considering climate change.

Key words : Pervious Polymer Concrete, Freezing-Thawing, Tensile Strength, Dynamic Modulus, Ultrasonic Pulse Velocity

요 지

도시화에 따른 불투수지역의 확대는 물순환에 악영향을 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 저영향개발 기법의 적용이 확대되고 있는 추세이다. 도시 수환경 개선을 위한 저영향개발 기법의 요소 기술 중 하나인 투수성 포장재는 현재 국내외에서 적용 사례가 빠른 속도로 증가하고 있다. 본 연구에서는 투수성 폴리머 콘크리트 포장재의 동결융해 전·후의 인장강도, 동탄성계수를 평가하였다. 투수성 폴리머 콘크리트의 건전도를 알아보기 위한 수단으로 인장강도 시험을 수행하였으며, 인장강도는 0.66~0.96 MPa, 인장강도비는 72~83% 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다. 동결융해 온도 사이클에 따른 동탄성계수를 알아보기 위해 초음파 펄스 속도를 측정하였으며, 300회의 동결융해 사이클이 진행됨에 따라 동탄성계수는 초기 값의 77~85% 수준으로 떨어지는 것으로 분석되었다. 투수성 포장재의 동결융해 시험에 대한 기준은 아직 정립된 바없으며, 국내 기후변화를 고려한 시험방법의 개발을 통해 동결융해 저항성에 대한 시험기준을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 투수성 폴리머 콘크리트, 동결융해, 인장강도, 동탄성계수, 초음파 펄스 속도

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

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

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

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

***에스비비(주) 전무(E-mail: terry.oh.8157@gmail.com)

Executive Director, SBB Co., Ltd.

****에스비비(주) 대리(E-mail: dlworms8311@naver.com)

Assistant Manager, SBB Co., Ltd.

1. 서 론

도시화에 따른 불투수면적 증가는 지반으로의 우수침투를 막아 지표면의 표면유출량을 증가시키고, 도시오염물의 하천유입을 증가시키며, 기저유량을 감소시키는 등 물순환 체계에 악영향을 끼치고 있다(Brattebo and Booth, 2003; Smith, 2011). 이에 따라, 도시의 수환경 문제를 개선하기 위한 방법의 하나로, 저영향개발 시설의 적용이 확산되고 있는 추세이다. 독일의 분산식 도시계획(Decentralized Urban Design, DUD), 일본의 자연순응형 개발(Sound Water Cycle on National Planning, SWCNP), 호주의 지속가능 도시계획(Water Sensitive Urban Design, WSUD) 등과 같이 많은 선진국에서 수환경 및 도시화 문제를 해결하기 위해 대안을 제시하였다. 저영향개발의 대표적인 기술 요소 중 하나인 투수성 포장은 세계 각국에서 사용되고 있다(Kumar et al., 2016). 투수성 포장은 공극을 통한 우수 침투를 허용하여 도로 표면 결빙 방지, 열섬 현상 완화, 수자원 오염방지, 유출량 감소 등의 효과가 있으며, 저교통량 도로 및 자전거 도로, 주차장, 보도 등에서 적용 사례가 늘고 있다(Fig. 1).

기존의 실험적 연구결과로부터 투수성 콘크리트의 공극률, 강도, 투수계수 등에 대해 알아보았다. Moon et al. (1997)은 투수성 콘크리트 포장의 특성을 파악하기 위해 골재의 최대치수와 잔골재율을 변화시켜 투수성 콘크리트의 공극률, 인장강도 등을 측정된 결과, 공극률의 범위는 6.8~28.2%, 인장강도의 범위는 35.4~116.6 kg/cm²으로 측정되었다. Choi and Park (2003)은 슬래그, 물, 시멘트 등 재료의 비율을 달리하여 고로슬래그를 사용한 투수성 콘크리트와 제강슬래그를 사용한 투수성 콘크리트의 강도 및 투수계수를 측정하였다. 그 결과, 압축강도는 12.3~25.1 MPa, 인장강도는 2.2~3.1 MPa, 투수계수는 0.05~0.43 cm/s 범위로 측정되었다. Yu et al. (2007)은 순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 역학적 특성을 조사하기 위하여 물-시멘트비, 단위중량을

달리한 공시체를 제작하여 압축강도와 투수계수 시험을 실시하였다. 전체적으로 단위중량이 커짐에 따라 압축강도는 작아졌으며, 투수계수는 단위중량과 물-시멘트비의 크기와 관계없이 평균적으로 0.9 cm/s로 측정되었다. Sung and Kim (2010)은 결합력이 높은 불포화폴리에스터 수지와 폴리프로필렌섬유를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트를 제작하여, 섬유의 재생골은골재 및 혼입물에 따른 투수성 폴리머 콘크리트의 공극률, 강도 및 동결융해저항성 등과 같은 역학적 특성에 대한 연구를 진행하였다. 투수성 폴리머 콘크리트의 폴리프로필렌섬유의 혼입률이 증가할수록 공극률과 투수계수는 감소하였고, 압축강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 동결융해 후 중량감소율은 섬유의 혼입율이 증가할수록 중량감소율이 다소 감소하는 경향을 보였으나, 중량감소율이 5% 미만으로 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

본 연구에서는, 투수성 폴리머 콘크리트 포장재의 동결융해 전·후의 인장강도, 동탄성계수를 분석하였다.

2. 투수성 폴리머 콘크리트 공시체

본 연구에서 사용된 투수성 폴리머 콘크리트는 골재와 폴리우레탄(Polyurethane)을 바인더를 사용하여 배합된 연속된 공극을 가지는 강우 침투가 가능한 폴리머 콘크리트를 말한다.

공시체 제작을 위해 사용한 바인더로는 이소시아네트와 폴리올 화합물을 결합한 폴리우레탄을 사용하였으며, 폴리우레탄 바인더 함유율은 5%로 배합하였다. 골재의 직경은 8 mm 이하인 안산암을 사용하였다. 공시체는 KS F 2403 (2019)의 기준을 따라 직경 150 mm, 높이 300 mm가 되도록 제작하였으며, 시험에 사용할 공시체 크기에 따라 코어링 및 커팅을 진행하였다. 공시체 예는 Fig. 2에 제시되어 있으며, 직경 100 mm, 높이 100 mm와 직경 150 mm, 높이 150 mm인 공시체로 시험을 진행하였다.

수중중량을 이용한 공극률 산정 방법을 사용하여 투수성 폴리머 콘크리트의 공극률을 측정하였다(Ahn et al., 2013). 공시체를 포화시킨 후 수중중량을 측정하였다. 이를 위해

Fig. 1. Permeable Pavement

Fig. 2. Pervious Polymer Concrete Samples

아스팔트의 이론최대밀도 시험기를 사용하여 진동과 부압을 가하여 투수성 폴리머 콘크리트 공시체를 포화시켰다. 공시체의 포화를 위한 과정은 용기에 공시체를 넣고 진동대를 가동한 후 20분간 진행되었다(Fig. 3).

수중중량을 측정하기 위해서 Fig. 4 장비를 사용하였으며, 공극률 산정하는 식은 Eq. (1)과 같다.

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

이때, n 은 백분율로 나타낸 공시체의 공극률(%), V_T 는 공시체의 부피(cm^3), W_D 는 공시체의 건조중량(g), W_S 는 공시체의 수중중량(g), γ_w 는 물의 단위중량(g/cm^3)을 나타낸다.

본 연구에서 사용된 투수성 폴리머 콘크리트 공극률의 범위는 20~22%로 나타났다.

Fig. 3. Theoretical Maximum Density Tester

Fig. 4. Measurement of Submerged Weight (Ahn et al., 2013)

3. 인장강도 및 동탄성계수 시험 방법

본 연구에서는 투수성 폴리머 콘크리트 포장재의 동결융해 전·후의 인장강도, 동탄성계수를 산정하기 위한 시험을 수행하였으며, 그 시험과정은 다음과 같다.

3.1 동결융해 전·후의 인장강도

동결융해시험은 MOLIT (2020) 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침의 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험기준과 KS F 2456 (2018) 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법을 적용하였다.

MOLIT (2020) 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험을 위해 동결융해 전·후에 사용할 공시체를 준비하였다. 동결융해에 사용할 공시체는 포화, 수침 과정을 거친 후 수중상태에서 -18 ± 3 °C의 온도로 16시간 이상 냉각한다.

KS F 2456 (2018) 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험을 위해 동결융해 전·후에 사용할 공시체를 준비하고, 동결융해 온도 사이클을 바탕으로 새로운 시험 방법을 설정하였다. 동결융해 사이클 온도 범위는 $-18 \sim 4$ °C로 동결 융해 1 사이클당 소요 시간은 총 2시간으로 설정하였으며, Fig. 5에 동결융해 온도 사이클이 제시되어 있다. 동결융해 시험 과정에서 항상 공시체의 포화상태를 고려하기 위해 담을 수 있는 용기를 제작하였으며, 동결융해 과정은 Fig. 6에 제시되어 있다. 동결융해 온도 사이클은 총 300회를 수행하였으며, 600시간이 소요되었다.

공시체의 인장강도 시험은 동결융해 전·후에 실시하여 동결융해로 인한 공시체의 인장강도 변화를 측정하였으며, 시험장비는 Fig. 7과 같다. 인장강도 시험은 KS F 2423 (2016)를 기준으로 진행하였으며, Eq. (2)에 의해 인장강도를 계산하였다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (2)$$

이때, f_{sp} 는 인장강도(MPa), P 는 최대 하중(N), d 는 공시체

Fig. 5. Freezing and Thawing Cycle

Fig. 6. Specimens During Freezing and Thawing

Fig. 8. Ultrasonic Pulse Velocity Measurement

Fig. 7. Tensile Strength Test Equipment

직경(mm), l 는 공시체 길이(mm)를 나타낸다.

본 연구의 연구 목적 중 하나인 동결융해에 따른 투수성 폴리머 콘크리트의 건전도 변화를 알아보기 위해 동결융해 전·후의 인장강도비(Tensile Strength Ratio, TSR)를 Eq. (3)에 의해 계산하였다.

$$TSR = \frac{f_{sp,treated}}{f_{sp,untreated}} (\times 100) \quad (3)$$

이때, TSR 은 인장강도비(%), $f_{sp,treated}$ 는 동결융해 후 공시체의 평균 인장강도(MPa), $f_{sp,untreated}$ 는 동결융해 전 공시체의 평균 인장강도(MPa)를 나타낸다.

3.2 동탄성계수

투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 온도 사이클에 따른 동탄성계수를 알아보기 위해 KS F 2731 (2018)의 시험방법에 따라 콘크리트의 일정 거리를 통과하는 발진자와 수신자 사이의 펄스 통과 시간으로부터 초음파 속도를 측정하였다. 측정하기 전에 발진자에서 발생하는 초음파 펄스가 콘크리트를 통과하여 수신자에 도달하기 위해서는 적절한 음향학적 연결이 필요하다. 그에 따라 접촉 매질은 바셀린을 사용하였으며, 시험 시 발진자와 수신자는 공시체에 표시된 정중앙에 위치하여 측정하였다. 콘크리트의 표면이 거친 부분에 대해서는 발진자와 수신자가 접촉하는 공시체의 양면을 수평이 되게 컷팅하였으며, 표면을 평활하게 하였다. 초음파 펄스 속도는 100, 200, 300 동결융해 온도 사이클마다 측정하였으며, Fig. 8에 해당 시험장비가 제시되어 있으며, 식은 Eq. (4)와 같다.

$$V = \frac{L}{T} \quad (4)$$

이때, V 는 초음파 펄스 속도(m/s), L 은 공시체의 길이(m), T 는 유효 시간(s)을 나타낸다.

이러한 초음파 펄스 속도에서 동탄성계수는 Eq. (5)와 같이 구할 수 있다.

$$E_d = \rho V^2 \quad (5)$$

이때, E_d 는 동탄성계수(GPa), ρ 은 공시체의 밀도(kg/m³),

v 는 초음파 펄스 속도(m/s)를 나타낸다.

4. 인장강도 및 동탄성계수 시험 결과

본 연구에서 수행한 투수성 폴리머 콘크리트 포장재의 동결융해 전·후의 인장강도, 동탄성계수의 결과는 다음과 같다. 본 논문에 제시된 모든 시험은 각 2회 수행되었으며, 시험결과는 평균치를 나타낸다.

4.1 동결융해 전·후의 인장강도

투수성 폴리머 콘크리트 포장재의 동결융해 전·후의 인장강도 결과는 Fig. 9에 제시되어 있으며, D100과 D150은 각각 직경 10 cm와 15 cm인 공시체를 나타낸다. 동결융해 전의 인장강도 범위는 0.89~0.96 MPa이며, 동결융해 후의 인장강도 범위는 0.66~0.80 MPa로 나타났다. 본 연구의 목적 중 하나는 KS F 2456 (2018) 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법(C)과 MOLIT (2020) 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침의 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험기준(A)을 적용하여 투수성 폴리머 콘크리트의 건전도 변화를 분석하는 것이며, 공시체의 건전도를 확인하기 위한 수단으로 인장강도 시험을 수행하였다. 인장강도비는 Fig. 10에 주어져 있으며, 시험에 사용된 공시

Fig. 9. Results of Tensile Strength

Fig. 10. Results of Tensile Strength Ratio

체의 인장강도비는 KS F 2456 (2018)의 시험방법의 경우 72~74%, MOLIT (2020)의 시험방법의 경우 82~83% 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.

4.2 동탄성계수

투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 온도 사이클에 따른 직경 100 mm, 직경 150 mm에 대한 초음파 펄스 속도와 동탄성계수 결과는 Figs. 11, 12, 13, 14에 제시되어 있다.

Fig. 11. Results of Ultrasonic Pulse Velocity

Fig. 12. Results of Dynamic Modulus

Fig. 13. Results of Ultrasonic Pulse Velocity

Fig. 14. Results of Dynamic Modulus

여기서, 0C, 100C, 200C, 300C는 각 동결융해 온도 사이클을 나타낸다. 초음파 펄스 속도의 범위는 1,864~2,123 m/s이며, 동탄성계수의 범위는 5.90~7.66 GPa로 나타났다. 동결융해가 진행됨에 따라 초음파 펄스 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라 동탄성계수도 감소하는 것을 볼 수 있다. 직경 150 mm 공시체가 직경 100 mm의 공시체보다 동결융해가 진행됨에 따라 동탄성계수 감소가 더 크게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 전·후의 인장강도, 동탄성계수를 평가하였으며, 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

투수성 포장에 연속된 공극을 통해 우수가 침투함에 따라 연중 낮은 기온이 지속되는 지역에서는 동결융해의 영향으로 인해 내구성 및 안정성 저하 우려가 있다. 이에 따라 본 논문에서는 MOLIT (2020) 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침의 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험기준과 KS F 2456 (2018) 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법을 적용하여 인장강도의 변화를 분석하였다. 동결융해 후 인장강도는 KS F 2456 (2018)의 시험방법의 경우 초기 값의 72~74%, MOLIT (2020)의 시험방법의 경우 초기 값의 82~83% 수준으로 떨어지는 것으로 분석되었다.

투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 온도 사이클에 따른 초음파 펄스 속도를 0~300 사이클까지 100 사이클 마다 측정하였으며, 그 결과에 따른 동탄성계수를 알아보았다. 300회의 동결융해 사이클이 진행됨에 따라 동탄성계수는 초기 값의 77~85% 수준으로 떨어지는 것으로 분석되었다.

투수성 포장재의 동결융해 시험에 대한 기준은 아직 정립된 바 없으며, 국내 기후변화에 적합한 동결융해 사이클 및 온도 범위와 시험방법의 개발을 통해 동결융해 저항성에 대한 시험 기준을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C152124-03).

References

- 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.
- Brattebo, B.O., and Booth, D.B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, Vol. 37, No. 18, pp. 4369-4376.
- Choi, J.J., and Park, W.T. (2003). Physical properties of permeable concrete using slag as an aggregate. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 4, No. 4, pp. 404-408.
- KS F 2403. (2019). *Standard test method for making concrete specimens*.
- KS F 2423. (2016). *Standard test method for tensile splitting strength of concrete*.
- KS F 2456. (2018). *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*.
- KS F 2731. (2018). *Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete*.
- Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., Zhang, H., and Granato, T. (2016). In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four-year study. *Journal of Environmental Management*, Vol. 167, pp. 8-14.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2020). *Guidelines for the production and construction of drainage asphalt concrete pavement*.
- Moon, H.Y., Kim, S.S., Kim, H.S., and Jung, H.S. (1997). An experimental study on the properties of porous concrete pavement. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 3, pp. 329-334.
- Smith, D.R. (2011). *Permeable interlocking concrete pavements* (4th ed.). Herndon, VA, USA: Interlocking Concrete Pavement Institute.
- Sung, C.Y., and Kim, Y.I. (2010). Mechanical properties of permeable polymer concrete for permeability pavement with recycled aggregate and fiber volume fraction. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 1, pp. 69-77.

Yu, S.K., Yu, N.J., Cho, S.M., and Shim, M.B. (2007). Mechanical characteristics of porous concrete using recycled-aggregate. *Journal of the Korea Geosynthetics Society*, Vol. 6, No. 2, pp. 17-20.

<i>Received</i>	October 1, 2021
<i>Revised</i>	October 5, 2021
<i>Accepted</i>	October 19, 2021