

침투실험을 통한 투수성 포장재의 흡-수분특성곡선 역해석 Back-Calculation of Soil-Water Characteristics Curve for Permeable Pavement Material Based on Infiltration Tests

김형원* · 안재훈** · 신현석***

Kim, Hyoungwon*, Ahn, Jaehun**, and Shin, Hyunsuk***

Abstract

Permeable pavement systems, an Low Impact Development technique, are widely used for pedestrian and bicycle roads, and parking lots, to relieve the flooding and enhance water cycle, which arises due to climate change and urbanization. However, due to lack of analytical means, permeable pavements are constructed most of time without knowing their performance in reducing runoff. In this paper, saturated permeability and porosity of a pervious concrete sample were experimentally estimated, and a set of infiltration model test was conducted; then, finally, the soil-water characteristics curve of the sample was back-calculated. In inverse analysis, van Genuchten model was selected, and Levenberg-Marquardt method was used for parameter searching algorithm. The results of soil-water characteristics curve presents the air-entry suction pressure is little below 1 kPa, and all the water expels at a suction pressure of 10 kPa. When compared to typical sands, the volumetric water content of pervious concrete drops more steeply with increasing suction pressure.

Key words : Permeable pavement, Pervious concrete, Low Impact Development, Soil-water characteristics curve, Infiltration test, Inverse analysis

요 지

최근 기후변화와 지속적인 도시화로 인한 도심 홍수 및 물순환의 왜곡을 해결하기 위한 저영향개발 기법 중 하나로 투수성 포장시스템이 보도, 주차장, 자전거 도로 등 경하중 하의 포장시설로서 활발하게 적용되고 있으나, 평가 및 해석방법의 미비로 투수성 포장은 많은 경우 유출저감효과에 대한 정량적 해석 없이 적용되고 있다. 본 논문에서는 투수성 포장을 구성하고 있는 다공성 재료에서의 침투 해석을 위해 필요한 주요 물성치인 포화투수계수와 간극률을 시험을 통해 산정하고, 침투모형실험을 통해 투수성 콘크리트의 침투특성을 관찰한 후, 본 결과를 사용하여 투수성 콘크리트의 흡-수분특성곡선을 역해석한다. 역해석을 위한 흡-수분특성곡선 모델로는 van Genuchten 모델을 사용하였고, 계수조정 알고리즘은 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하였다. 투수성 콘크리트 시료의 흡-수분특성곡선은 포화상태에서 흡입압력이 1 kPa보다 작은 지점부터 불포화가 되기 시작하여, 흡입압력이 10 kPa에 이르러서는 체적함수비가 0에 가까운 상태에 이르렀으며, 사질토와 비교했을 때 흡입압력의 증가에 따라 체적함수비의 감소가 더 급격한 경향을 보이는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 투수성 포장, 투수성 콘크리트, 저영향개발, 흡-수분특성곡선, 침투해석, 역해석

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 국지적으로 나타나는 강우강도의 변화, 이에 더해 지속적인 도시화에 따른 불투수면의 증가로 인

한 도심 홍수 및 물순환의 왜곡을 해결하기 위해 저영향개발 (Low Impact Development, LID)의 도입이 국제적으로 확산되고 있는 추세이다. 저영향개발의 개념을 따라 사회기반시설의 불투수면을, 물순환 개선을 위해 투수면으로 설계하는 경

*학생회원. 부산대학교 건설융합학부 석사과정(E-mail: viva_won@naver.com)

Member. Graduate Student. School of Urban, Architecture and Civil Engineering. Pusan National University

**교신저자. 정회원. 부산대학교 건설융합학부 부교수(Tel: +82-51-510-7627. Fax: +82-51-513-9596. E-mail: jahn@pusan.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Professor. School of Urban, Architecture and Civil Engineering. Pusan National University

***정회원. 부산대학교 건설융합학부 교수

Member. Professor. School of Urban, Architecture and Civil Engineering. Pusan National University

우, 도심 물순환의 개선에 더해, 오염저감, 열섬현상 저감 등의 부가적인 효과를 얻을 수 있다.

투수성 포장재는 저영향개발의 기법 중 하나로 분류할 수 있으며, 현재 우리나라에서는 도심 홍수 및 유출의 문제를 해결하기 위한 대안으로 보도, 주차장, 자전거 도로 등 경하중 하의 포장시설로서 투수성 포장재를 활발하게 적용하고 있는 실정이다(Seoul Metropolitan Government, 2014; Ministry of Public Safety and Security, 2014). 하지만 이러한 현실에도 불구하고, 아직까지 투수성 포장재의 물순환 성능 평가 및 설계 방법에 대한 기준이 분명하지 않으며, 많은 경우 투수성 포장재의 적용은 유출저감효과에 대한 정량적 해석 없이 적용되고 있는 실정이다.

투수성 포장재를 구성하고 있는 지반재료, 투수성 포장재 등 다공성 물질을 통한 침투의 해석을 위해 필요한 주요 물성치로, 흡수분특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC), 투수계수함수(Hydraulic Conductivity Function, HCF), 포화 투수계수, 간극률(혹은 공극률)을 들 수 있다. 투수성 포장재의 포화투수계수는 정수두 혹은 변수두 투수시험을 통해 산정할 수 있으며(KS F 2322,; ASTM D2434), 간극률은 투수성 포장재의 건조중량과 수중중량을 측정하여 산정하거나(Montes *et al.*, 2005; Ahn *et al.*, 2013), 외측 경계를 밀봉한 투수성 포장재에 들어가는 유량으로부터 계산할 수 있다(Neithalath *et al.*, 2006). 투수계수함수는 침투해석 시에 중요한 입력치이기도 하나, 시험절차가 까다롭기 때문에 흔히 흡수분특성곡선으로부터 경험적으로 투수계수함수를 산정하여 해석에 사용한다.

투수성 포장재의 흡수분특성곡선에 대한 연구는 많지 않으나, 그 예로 Kim *et al.*(2015)의 연구에 보인 투수성 콘크리트의 흡수분특성곡선을 들 수 있으며, 해당 문헌의 흡수분특성곡선은 최대입경 6 mm 정도의 골재로 배합한 직경 48 mm 인 투수성 콘크리트를 압력판 셀 시험(GCTS, 2014)을 수행하여 산정하였다. 하지만, 투수성 포장재에 크기가 큰 골재가 배합된 경우, 이에 따라 시험에 사용되는 시료의 크기 또한 증가시켜야 하나, 이 경우 기존의 압력판 셀 시험장치 크기의 한계로 흡수분특성곡선 산정이 힘들게 된다.

본 연구에서는 30×30 cm의 평면단면을 가진 투수성 포장재의 흡수분특성곡선 산정을 위한 침투시험 및 역해석 절차를 보이고, 이에 따라 투수성 콘크리트의 흡수분특성곡선을 산정한다.

2. 흡수분특성곡선 산정 절차

본 연구에서는 다음과 같은 절차를 통해 투수성 포장재의 흡수분특성곡선을 산정한다.

- 투수성 포장재의 포화투수계수를 산정한다. 일반적으로 투수성 포장재의 포화투수계수는 0.01 cm/s 이상의 큰 값

을 가지므로, 본 연구에서는 정수두시험을 통해 포화투수계수를 산정하였다.

- 투수성 포장재의 간극률을 산정한다. 본 연구에서는 건조중량과 수중중량의 측정값으로부터 간극률을 계산한다.
- 침투시험을 수행하고, 역해석에 필요한 결과를 선정 및 계측한다. 본 논문에서는 30×30 cm 평면단면의 침투계와 강우모사기를 사용하여 침투 모형시험을 수행하였으며, 입력 강우와 포장재 하부로 배수되는 유량을 계측하여 역해석에 사용하였다.
- 역해석을 통해 흡수분특성곡선을 산정한다. 이를 위해 먼저 흡수분특성곡선과 투수계수함수의 모델을 선정하여야 하며, 본 논문에서는 지반공학 분야에서 널리 쓰이는 모델 중 하나인 van Genuchten-Mualem 모델(van Genuchten, 1980; Mualem, 1976; PC-Progress, 2011)을 사용하였다.

3. 투수계수 및 간극률

3.1 시료

본 연구에서는 부산광역시에 위치한 ○○○공원 내 차도와 산책로에 시공을 위해 플랜트에서 배합한 투수성 콘크리트 혼합물(The GL, 2015)을 30×30×20 cm의 몰드에 부어 시료를 성형하였다. 본 혼합물은 혼합골재(최대입경 12 mm와 4 mm를 가진 두 골재의 혼합)에, 시멘트, 물, 안료를 혼합하여 제작하였으며, 다짐방법은 KS F 2043에 따라 전체 20 cm 높이를 10 cm 씩 2층으로 나누고 다짐봉(16 mm)을 이용하여 각 층을 다짐하여 시료를 제작하였다. 시료의 중량은 345 kN, 단위중량은 19.23 kN/m³이며, 완성된 시료는 Fig. 1에 제시되어 있다.

3.2 포화투수계수 및 간극률 산정

정수두시험을 통해 투수성 콘크리트의 포화투수계수를 산정하였다. 시험에는 30×30 cm 평면단면의 투수성 포장재를



Fig. 1. Pervious concrete sample.



Fig. 2. Equipment to measure submerged weight.

실험할 수 있도록 개발된 정수두 시험장비(Jeong, 2016)를 사용하였으며, 그 원리는 흙의 투수시험(KS F 2322)의 원리와 동일하다. 시험은 30×30×20 cm 크기의 투수성 콘크리트를 20 cm의 수두를 유지하며 수행하였으며, 시험 지속시간은 600 s (10 min)으로 하였다. 시험을 통해 산정된 투수계수는 $K=0.0755$ cm/s로 계산되었다.

Montes et al. (2005), Ahn et al. (2013)은 투수성 콘크리트의 간극률을 산정하기 위해 콘크리트의 건조중량 W_D , 수중중량 W_S , 시료 전체부피 V_T 를 측정하여, 식 (1)을 통해 간극률 P 를 계산하였다.

$$P(\%) = 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_w} \left(\frac{W_D - W_S}{V_T} \right) (\times 100\%) \quad (1)$$

이 때, γ_w 는 물의 단위중량을 나타낸다. 식 (1)을 이용하기 위해서는 콘크리트가 포화되었을 때의 수중중량 W_S 를 측정하여야 하며, 본 논문에서는 수중에서 콘크리트를 포화시키기 위하여 수중에 24시간 동안 잠기게 한 후에, 포화를 확인하기 위하여 더 이상 콘크리트 내에서 기포가 발생하지 않을 때까지 고무망치로 투수성 포장재에 충격을 주는 과정을 거친 후에 수중중량을 측정하였다. Fig. 2에 투수성 콘크리트의 수중중량을 측정하기 위한 장비가 주어 있다. 본 과정을 통해 투수성 콘크리트의 간극률 P 는 21.6 %로 산정되었다.

4. 침투 모형실험

강우모사기와 투수성 포장시스템 침투성 측정장비를 사용하여 투수성 포장재의 침투성을 파악하고, 역해석에 사용할 결과를 계측하였으며 세부사항은 다음과 같다.



Fig. 3. Mobile rainfall simulator.



Fig. 4. Infiltrometer for permeable pavement systems.

4.1 실험장비

투수성 포장재에 강우를 분사하기 위하여 Fig. 3에 보인 이동형 강우모사기를 사용하였다. 본 강우모사기는 프레임, 노즐, 펌프, 유량계, 밸브, 오실레이터, 물탱크 등으로 구성된다. 강우모사기 작동 시 먼저 펌프를 통해 물탱크의 물을 노즐 쪽으로 끌어올리며, 이 때 유량의 조절은 밸브를 통해 이루어지며, 유량은 유량계를 통해 확인 가능하다. 강우의 고른 분포와 자유낙하를 유도하기 위해 오실레이터 및 노즐을 사용하여 분사하게 되며, 노즐의 종류에 따라 허용되는 유량과 물입자의 크기, 분사각 등을 조절할 수 있다. 본 강우모사기의 원리에 대한 상세 사항은 Jang et al.(2014)에서 찾아볼 수 있다.

투수성 포장재의 침투성 측정장비는 침투계(상,하부), 중량식 침투계(Lysimeter), 전도식 버킷(Tipping Bucket), 데이터 로거로 구성된다(Fig. 4). 침투계에는 평면단면 30×30 cm의 상부 침투계(투수성 포장재)와 하부 침투계(침투 노반층)에

투수성 포장시스템 모형의 성형이 가능하며, 상부의 경우 최대 25 cm, 하부의 경우 최대 40 cm까지의 시료를 제작 혹은 설치할 수 있다. 실험 시 하부 배수량과 증발산량은 각각 전도식 버킷과 침투계를 통해 측정할 수 있으며, 필요 시 유출량 또한 전도식 버킷(혹은 유량계)을 추가하여 계측할 수 있도록 설계되어 있다.

4.2 실험절차

강우모사기와 투수성 포장시스템 침투계를 통해 투수성 콘크리트의 침투실험을 수행하였다. 본 논문은 투수성 포장재만을 대상으로 하기 때문에, 침투계 상부에 투수성 콘크리트를 고정하고, 하부를 비운 채로 해석을 수행하였으며, 그 절차는 다음과 같다.

- 투수성 포장재 시료를 준비한다. 본 실험의 목적은 흙수분특성곡선의 산정이기 때문에, 가능한 넓은 범위에서의 함수비를 실험할 수 있도록, 초기에 시료를 건조한 상태에서 침투실험을 수행하였다.
- 투수성 포장재를 침투계 상부에 고정한다. 이 때, 시료와 침투계 사이 틈으로의 누수를 방지하기 위해, 투수성 포장재를 비닐 랩으로 감싼 후 투수계에 고정한다.
- 이동형 강우모사기를 통해 침투계에 강우를 분사하며, 침투계로부터 배수되는 유량을 측정한다.

위의 과정을 통해, 본 논문에서는 136 mm/hr의 일정한 강우(상세내용 4.3절 참조)를 약 1400 s(23 min)의 시간 동안 분사하며 배수량을 계측하였다. 앞 절에 언급한 대로 본 장비의 전도식 버킷과 증량식 침투계를 통해 하부배수량과 증발산량의 측정이 모두 가능하나, 본 실험에서는 실내 조건에서 실험 동안 증발산은 무시할 수 있다고 가정하고, 침투계의 로드셀을 통해 투수성 포장재 내의 유량 변화를 계측하고 이로 부터 하부배수량을 계산하였다.

4.3 실험결과

상기 설명된 절차를 통해 수행된 실험의 결과가 Fig. 5에 제시되어 있다. 먼저, 그림의 투수계 내 유량(그림에 Infiltrometer 표기)은 증량식 침투계의 로드셀로부터 계측한 값을 유량으로 환산한 값으로, 증량식 침투계에 계측된 무게 증가는 모두 투수계 내 유량의 증가에 해당한다. 본 그림으로부터 투수계 내 유량이 강우 시작 후 260 s까지는 선형적으로 증가하다가 260 s 후로는 증가 추세가 둔화되고 서서히 일정한 값에 수렴하게 되는 것을 확인할 수 있다.

실험 시작 후 260 s까지는 투수계 하부로의 배수가 관측되지 않았으며, 이에 따라 초기 260 s까지의 투수계 내 유량은 곧 강우 유량값과 동일하게 되는 것을 알 수 있다. 실험 시 강우량은 일정하게 고정하였으므로, 투수계 내 유량 계측값의 초기 기울기로부터 강우 유량을 산정하였다. 본 강우 유량은, 투수계의 평면단면을 고려하여 강우량으로 환산하면, 136

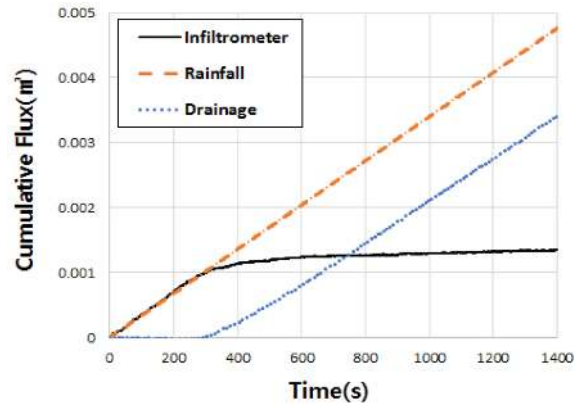


Fig. 5. Results of infiltration test.

mm/hr이며, 이 값은 서울시와 부산시의 확률강우강도의 재현 기간 80년, 지속시간 30분에 해당한다(서울시의 경우 134.6 mm/hr, 부산시의 경우 135.6 mm/hr; Korea Precipitation Frequency Data Server, <http://www.k-idf.re.kr>). 강우 유량과 투수계 내 유량의 차로부터 투수계 하부로의 배수량을 산정하였으며, 계산된 강우 유량과 하부배수량이 모두 Fig. 5에 제시되어 있다.

Fig. 5의 결과로부터, 초기에 건조된 상태의 투수성 포장재에, 136 mm/hr의 일정한 강우를 분사하였을 때, 초기 260 s까지는 강우를 모두 포장재 내에 체류하며 하부로의 배수가 없다가, 260 s에 이르러 침투수가 포장재 하부에 도달하여 배수가 시작되고, 약 600 s에 이르러서는 입력강우가 모두 배수가 되는 것을 확인할 수 있다.

5. 흙수분특성곡선 산정

본 절에서는 침투실험 결과로부터 투수성 포장재의 흙수분특성곡선을 산정하기 위해, 흙수분특성곡선의 모델을 선정하고 모델계수를 역해석 하는 과정을 보인다.

5.1 흙수분특성곡선 모델

지반의 내 압력 수두와 체적함수비를 나타내는 흙수분특성곡선의 대표적인 모델로 Brooks and Corey(1964), van Genuchten(1980), Vogel and Cislserova(1988), Kosugi(1996), Durner(1994)의 제안식을 들 수 있다. 본 논문에서는 이 중 van Genuchten(1980)의 제안식을 침투해석 및 역해석에 사용하였다. Van Genuchten(1980)은 압력수두 h 에 따른 지반 내의 체적함수비 $\theta(h)$ 를 나타내기 위한 모델로 식 (2)를 제안하였다.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h^n|^m]} & \text{for } h < 0 \\ \theta_s & \text{for } h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

이 때, θ_r 은 잔류체적함수비를, θ_s 는 포화체적함수비(혹은 간극률)를 나타내며, α 는 공기유입 흡입수두와 관련된 계수로 0보다 큰 값을 가지고($\alpha > 0$), n 은 간극 크기 분포와 관련된 계수로 1보다 큰 값을 갖는다($n > 1$). 또한, 계수 m 은 n 의 함수이다($m = 1 - 1/n$).

한편, Mualem(1976)은 압력수두 h 에 따른 투수계수 $K(h)$ 를 나타내기 위한 모델로, 식 (3)을 제안하였다.

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

이 때, K_s 는 포화투수계수를 나타내며, S_e 는 유효포화도로서 $S_e = [\theta(h) - \theta_r] / [\theta_s - \theta_r]$ 로 정의된다. 또한 계수 l 은 간극의 연속성을 나타내는 계수로서 Mualem(1976)에 의해 대부분의 지반재료에 대해 0.5로 산정되었다($l = 0.5$).

5.2 흡수분 특성곡선 역해석

Van Genuchten-Mualem 모델의 입력계수 중 계수 l 을 제외한($l = 0.5$) 나머지 5개의 계수 중, 포화투수계수 K_s 와 포화체적함수비(혹은 간극률) θ_s 는 3.2절에 제시한 정수투수시험 및 수중중량을 이용한 간극률 측정 실험을 통해 산정할 수 있다. 잔류함수비 θ_r 는 침투실험에 사용한 투수성 포장재가 초기에 건조한 조건이므로, 충분히 작은 값(0.0001)으로 설정하였다. 실제로 Kim et al.(2015)이 보인 압력관 셀 시험의 결과도 흡입압력이 증가함에 따라 매우 급속하게 체적함수비가 0에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 모델계수 α , n 을 대상으로 역해석을 수행하였다.

본 논문에서 투수성 포장재료의 침투해석을 위해 유한요소 침투해석 프로그램인 HYDRUS 2D(PC-Progress, 2011)를 사용하였다. 해석은 침투실험에 사용한 평면단면 30×30 cm, 높이 20 cm인 시료를 해석하기 위해, 2차원 평면상에 단위 폭(1 m)을 가진 너비 30 cm, 높이 20 cm인 유한요소모델을 대상으로 해석을 수행하였다. 유한요소모델 상 투수성 포장재의 하부면은 자연배수로 설정하였고, 역해석을 위해 상부에 침투실험에 사용한 강우강도(136 mm/hr)를 단위폭을 가진 2차원 유한요소모델에 맞도록 환산하여 적용하였다.

역해석은 침투실험을 통해 측정한 투수성 포장재의 하부 배수량과 수치해석을 통해 계산한 하부 배수량 사이의 오차가 최소가 되도록 수행하였다. 이 때, 계수조정 알고리즘은 HYDRUS 프로그램에서 지원하는 비선형 최소자승법, Levenberg-Marquardt 방법(Levenberg, 1944; Marquardt, 1963)을 사용하였다.

역해석 결과, 두 계수 α 와 n 이 각각 $\alpha = 3.69$, $n = 4.42$ 가 될 때, 침투실험의 측정값과 수치해석 계산값의 오차가 최소가 되었으며, 이 때 침투실험에서 측정한 배수량과 수치해석 결과가 Fig. 6에 제시되어 있다. 그림으로부터 침투실험에서 측정한 하부배수량과 수치해석의 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

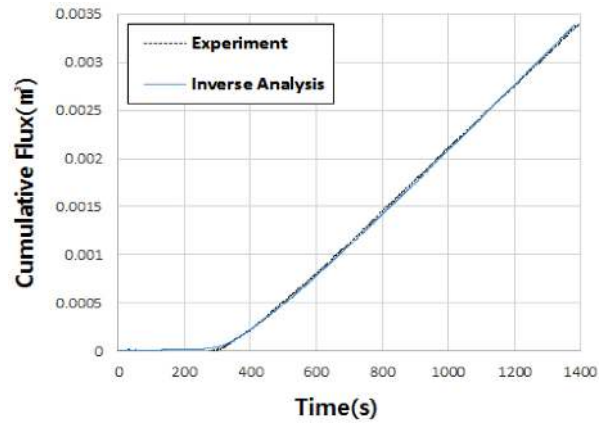


Fig. 6. Discharge of drainage at the bottom of porous concrete sample.

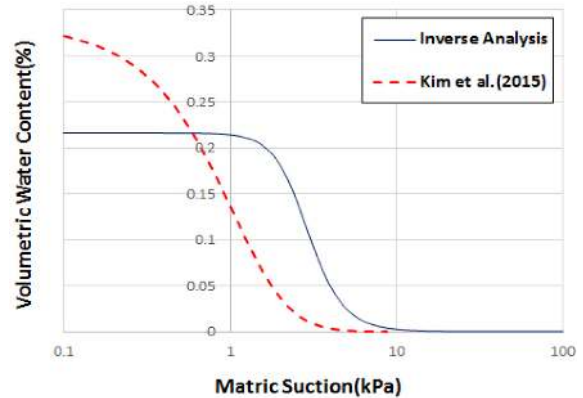


Fig. 7. Soil-water characteristic curve of porous concretes.

본 논문에서 역해석을 통해 산정한 투수성 콘크리트의 흡수분 특성곡선과, 비교를 위해, Kim et al.(2015)에 보인 흡수분 특성곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 일반적인 지반재료와의 비교를 위해, 모래, 실트, 점토의 흡수분 특성곡선의 예(Schanz, 2007)를 Fig. 8에 제시하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯, 본 논문에서 역해석을 통해 산정한 투수성 콘크리트 시료의 흡수분 특성곡선은 포화상태에서 흡입압력이 1 kPa 보다 작은 지점부터 불포화가 되기 시작하여, 흡입압력이 10 kPa에 이르러서는 체적함수비가 매우 작은 상태에 이르는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 투수성 콘크리트의 공기함입 흡입수두는 1 kPa 정도로서 Fig. 8에 보인 사질토와 유사하나, 흡입압력의 증가에 따라 체적함수비가 사질토와 비교해 더욱 급격하게 떨어지는 경향을 보인다. 이는 일반적인 사질토에 비해 실험에 사용된 투수성 콘크리트의 간극이 크고 또한 연결성(connectivity)이 좋아 흡입압력 증가에 따른 함수비 변화의 경향이 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, Fig. 7에 보인 Kim et al.(2015)의 투수성 콘크리트는 간극률이 30% 정도로, 본 논문에 보인 콘크리트의 간극률(21.6%)

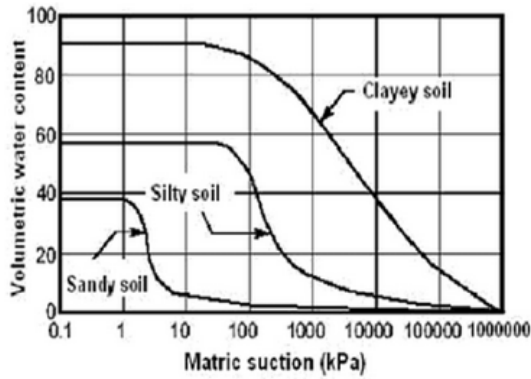


Fig. 8. Soil-water characteristic curve of typical soils (Schanz, 2007).

보다 크며, 공기함입 흡입압력 값이 매우 작고, 5 kPa의 흡입압력에서는 체적함수비가 0에 가깝게 되는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 침투실험과 역해석을 통해 투수성 포장재의 흡수분특성곡선을 산정하는 절차를 제시하고, 투수성 콘크리트 시료의 흡수분특성곡선을 산정하였다.

역해석을 위한 흡수분특성곡선과 투수계수함수 모델로는 van Genuchten-Mualem 모델을 사용하였다. 본 모델의 입력 계수 중 포화투수계수와 포화체적함수비(혹은 간극률)는 정수투수시험 및 수증중량을 이용한 간극률 측정 실험을 통해 산정하고, 잔류함수비 θ_r 는 투수성 콘크리트의 특성 및 문헌의 결과를 고려하여 매우 작은 값으로 설정하였다. 이 후, 모델계수 α , n 을 대상으로 역해석을 수행하였다.

역해석은 침투실험을 통해 측정한 투수성 포장재의 하부 배수량과 수치해석을 통해 계산한 하부 배수량 사이의 오차가 최소가 되도록 수행하였으며, 계수조정 알고리즘은 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하였다.

역해석을 통해 산정한 투수성 콘크리트 시료의 흡수분특성곡선은 포화상태에서 흡입압력이 1 kPa 보다 작은 지점부터 불포화가 되기 시작하여, 흡입압력이 10 kPa에 이르러서는 체적함수비가 0에 가까운 상태에 이르렀으며, 이는 사질토와 비교했을 때 유사한 공기함입 흡입수두를 가지나, 흡입압력의 증가에 따라 체적함수비의 감소가 사질토보다 더 급격한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 이는 일반적인 사질토에 비해 실험에 사용된 투수성 콘크리트의 간극의 크기 및 연결도가 높아, 흡입압력 증가에 따른 함수비 변화의 경향이 민감하기 때문인 것으로 판단된다.

이와 같이 본 연구에 제시한 침투실험 및 역해석 절차에 따라, 투수성 포장재의 흡수분특성곡선을 성공적으로 산정하였으며, 향후 다양한 투수성 포장재에 적용하여 투수성 포장시스템의 침투해석 및 성능평가에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기 슬혁신C04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, J.H., Lee, Y.S., Sushrut, V., Kim, J.H., and Lee S.W. (2013) Estimation the Porosity of Pervious Concretes based on X-Ray CT and Submerged Wight, *Journal of KOSHAM*, Vol.13, No.4, pp. 077-081.
- ASTM D2434 (2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), American Society for Testing and Materials.
- Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964) Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers No.3*, Colorado State University Fort Collins, Colorado.
- Durner, W. (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resources Research*.
- GCTS (2014) www.gcts.com
- Jang, Y.S., Kim, M.E., Baek, J.S., and Shin, H.S. (2014) The Study on Development and Verification of Rainfall-Runoff Simulator for LID Technology Verification, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, 513-522.
- Jeong, H.S. (2016) Development and Validation of Test Equipment for Permeability of Permeable Pavement-Soil Systems, M.S. Thesis, Pusan National University (in progress), Busan.
- Kim, S., Ahn, J., Bertrand, T., and Shin, H. (2015) Numerical Analysis of Infiltration to Permeable Pavement Systems, *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 2.
- Kosugi, K. (1996) Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*.
- KS F 2043 (2014) Standard test method for making and curing concrete specimens, Korean Industrial Standards.
- KS F 2322 (2000) Test methods for permeability of saturated soils, Korean Industrial Standards.
- Lee, Y.S. (2013) Estimation the Porosity of Pervious Concretes, M.S. Thesis, Pusan National University, Busan.
- Levenberg, K.A. (1944) Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 2, pp. 164-168.
- Marquardt, D.W. (1963) An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-linear Parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.
- Ministry of Public Safety and Security (2014) Countermeasures against Natural Disasters Act.
- Montes, F., Valavala, S. and Haselbach, L.M. (2005) A New test method for porosity measurements of portland cement pervious concrete, *Journal of ASTM International*, Vol.2, No.1.
- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12(3), pp. 513-522.
- Neithalath, N., Weiss, J., and Olek, J. (2006) Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, No.11, pp. 2074-2085.

PC-Progress (2011) HYDRUS Technical Manual
Schanz, T. (2007) Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer 355-367.
Seoul Metropolitan Government (2014) Seoul Recover the Water Cycle and Low Impact Development(LID) Basic Regulations.
The E&C (2015) www.glenc.co.kr
Van Genuchten, M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Journal of Soil Science Society of America*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.

Vogel, T., and Cislerova, M. (1988) On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, *Transport in Porous Media* 3, 1-15.

Received ■ September 7, 2015

Revised ■ September 14, 2015

Accepted ■ October 5, 2015