

모형토조실험을 이용한 강우시 토층의 포화속도 산정

김철민^{1,2} · 송영석^{1*} · 김학준²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²대전대학교 지반방재공학과

Estimation of Saturation Velocity in Soils During Rainfall using Soil Box Test

Chul-Min Kim^{1,2}, Young-Suk Song^{1*}, and Hak-Joon Kim²

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geotechnical Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

Received 22 July 2015; received in revised form 2 August 2015; accepted 10 August 2015

본 연구에서는 강우강도에 따른 토층내 포화속도를 산정하기 위하여 모형실험장치를 개발하고 일련의 모형실험을 수행하였다. 모형실험장치는 모형토조, 강우재현장치 및 계측장치로 구성되어 있다. 모형지반(60 cm × 50 cm × 15 cm)은 상대밀도 75%의 주문진 표준사로 조성하였으며, 강우재현장치는 강우강도의 조절이 가능하도록 하였다. 그리고 토층내 강우침투시 깊이별 체적함수비 및 모관흡수력의 변화를 측정하기 위하여 TDR과 Tensiometer를 설치하였다. 모형실험결과 토층의 입도가 균등하고 투수계수가 상대적으로 크므로 강우시 지표면에서 습윤전선이 형성되어 하강하는 것이 아니라 하부 바닥면에서부터 지하수위가 형성되어 상승하면서 포화가 진행되었다. 강우시 토층내 흡입응력의 변화를 살펴본 결과 토층 내에서 체적함수비가 증가함에 따라 흡입응력은 감소하며, 체적함수비가 20-30% 사이에서 흡입응력은 비교적 빠르게 감소하였다. 강우강도와 토층의 평균포화속도를 회귀분석한 결과 강우강도에 따른 평균포화속도는 $V_{s,avg}$ (cm/sec) = $0.068I_R$ (mm/hr)와 같이 제안할 수 있다.

주요어: 모형토조, 강우재현장치, 강우강도, 포화속도, 흡입응력

We constructed a model test apparatus to evaluate the dependence of the saturation velocity (V_s) in soils on rainfall intensity (I_R). The apparatus comprises a soil box, a rainfall simulator, and measuring sensors. The model grounds (60 cm × 50 cm × 15 cm) were formed by Joomunjin standard sand with a relative density of 75%. The rainfall simulator can control the rainfall intensity to reenact the actual rainfall in a soil box. Time Domain Reflectometer (TDR) sensors and tensiometers were installed in the soils to measure changes in the volumetric water content and matric suction due to rainfall infiltration. During the tests, the soil saturation was determined by raising the groundwater table, which was formed at the bottom of the soil box. [Please check that the correct meaning has been maintained.] The wetting front did not form at the ground surface during rainfall because the soil particles were uniform and the coefficient of permeability was relatively high. Our results show that the suction stress of the soils decreased with increasing volumetric water content, and this effect was most pronounced for volumetric water contents of 20%-30%. Based on a regression analysis of the relationship between rainfall intensity and the average saturation velocity, we suggest the following equation for estimating the saturation velocity in soils: $V_{s,avg}$ (cm/sec) = $0.068I_R$ (mm/hr).

Keywords: soil box, rainfall simulator, rainfall intensity, saturation velocity, suction stress

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

우리나라의 경우 대부분의 산사태는 6월에서 9월 사이의 우기철에 집중적으로 발생된다. 그러므로 우리나라 산사태의 발생요인 중 가장 큰 외적요인은 강우임을 알 수 있다. 이와 같이 강우가 산사태의 가장 중요한 외적요인이 되고 있는 것은 사실이지만 강우강도, 누적강우량, 강우지속시간 등이 산사태에 어떻게 관련되어 있는지는 아직 확실하게 규명되지 못하고 있다.

기존 강우시 산사태의 발생에 대한 연구는 크게 두 가지로 구분되어 진행되어 왔다. 첫째는 불포화 토층 내 강우 침투로 인하여 습윤전선(wetting front)이 형성 및 하강하고 임계 포화깊이에 도달하였을 때 얇은 파괴가 발생하는 경우에 대한 연구(Hong et al., 1996; Cho and Lee, 2001; Kim et al., 2004)이며, 둘째는 토층 내 강우 침투로 인하여 지하수위가 상승하여 사면 파괴가 발생하는 경우에 대한 연구이다. 한편, Song and Hong (2011)는 강우시 습윤전선의 하강과 지하수위의 상승을 모두 고려한 절취사면의 안정성을 해석한 연구도 있다. 그러나 이들 연구에서는 강우의 침투로 인하여 발생하는 토층 내 변화에 대한 정확한 메카니즘은 제시되지 못하고 있다. 따라서 강우로 인한 산사태 발생의 합리적인 해석을 위해서는 토층내 강우 침투흐름에 대한 이해가 필요하다.

최근 들어 실내모형실험을 통하여 토층내 강우의 침투속도를 파악하기 위한 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. Park et al. (2011)은 칼럼시험을 동일지반 조건에서 강우강도에 따른 침투속도를 측정할 바 있

으며, Kim et al. (2012)은 칼럼시험을 통하여 강우강도에 따른 침투 유출량을 측정하였다. 그러나 기존 모형실험의 경우 강우시 토층내 습윤전선의 하강에만 초점이 맞추어져 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 모형토층내 토층을 형성하고 강우를 재현시켜 강우강도에 따른 토층내 포화속도를 산정하기 위한 모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 주문진 표준사를 이용하여 강우강도에 따른 모관흡수력과 체적함수비의 변화를 측정하고자 한다. 이를 토대로 강우강도에 따른 토층 내 포화속도 및 흡입응력에 대한 상관관계를 분석하고, 강우강도에 따른 토층의 포화속도를 정량적으로 제시하고자 한다.

모형실험장치

실험장치 구성

불포화 지반 내 강우침투 특성을 파악하기 위하여 모형토조(soil box)를 이용한 실내모형실험을 수행하였다. Fig. 1은 불포화 지반 내 강우침투 모형실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 모형토조, 강우재현장치 및 계측장치로 구분할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모형토조에는 지표면 상부에서 강우가 침투되지 못하고 표면 유출되는 강우의 유량을 측정하기 위하여 밸브와 저울이 연결되어 있다. 그리고 강우재현장치는 살수장치, 강우조절장치 및 물탱크로 구성되어 있다. 강우조절장치는 2대의 연동펌프(peristaltic pump)로 구성되어 있고, 바늘(needle)로 구성된 살수장치에 일정하게 물을 공급한다. 또한 계측장치는 TDR 및 Tensiometer의 계측센서와 테

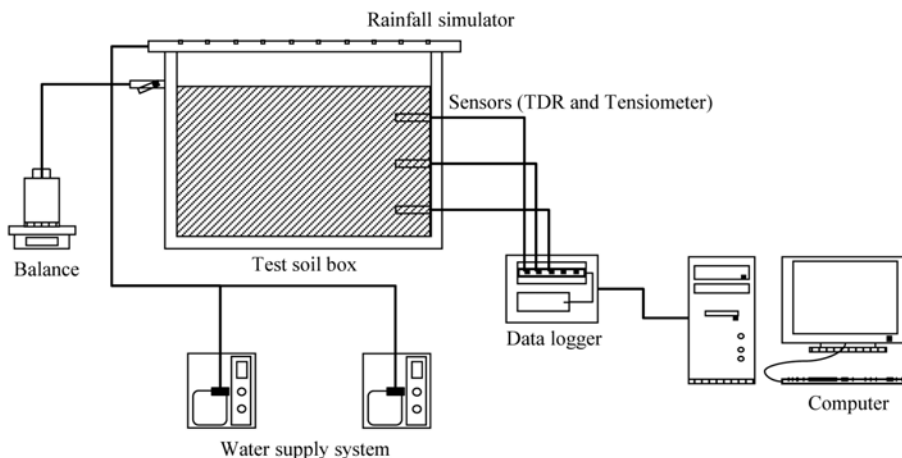


Fig. 1. Schematic diagram of rainfall infiltration test using a soil box.

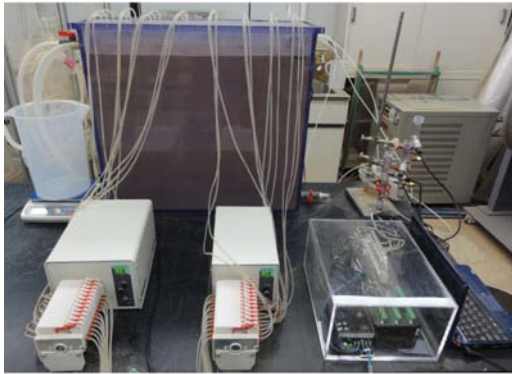


Fig. 2. Panoramic view of a rainfall infiltration test using a soil box.

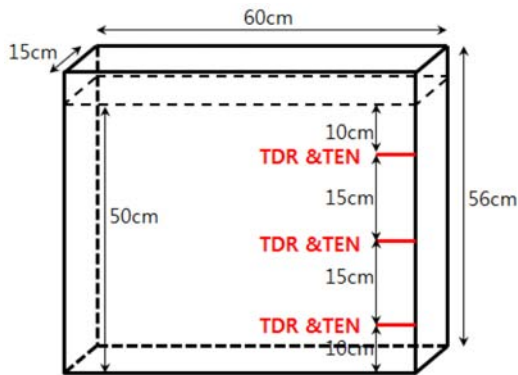


Fig. 3. Dimensions of the soil box and sensor locations.

이터 로거, 컴퓨터로 구성되어 있다. TDR센서를 통하여 토층내 체적함수비를 측정하고, Tensiometer를 통하여 토층내 모관흡수력을 측정한다. 그리고 이들 센서는 깊이별로 설치하여 강우강도 혹은 강우지속시간에 따른 체적함수비와 모관흡수력을 측정한다. Fig. 2는 모형토조를 이용한 강우침투 실험의 전경을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 모형토조의 개략도를 나타낸 것으로 모형토조의 크기는 길이 60 cm, 높이 56 cm 및 폭 15 cm이며, 강우침투로 인한 침투수의 거동을 직접 관찰할 수 있도록 아크릴로 제작하였다. 실험시 설치되는 토층의 실제크기는 길이 60 cm, 높이 50 cm 및 폭 15 cm이다. 그리고 모형토조의 바닥으로부터 10 cm, 25 cm 및 40 cm 깊이에 TDR센서와 Tensiometer가 동일한 높이에서 서로 평행하게 설치될 수 있도록 제작되었다.

한편 살수장치는 직경 1 mm의 needle이 4.5 cm × 4.5 cm 간격으로 일정하게 설치되어 있다. 이 살수장치는 2대의 연동펌프(peristaltic pump)와 연결되어 있어



Fig. 4. TDR sensor used in the tests (EC-5).



Fig. 5. Tensiometer used in the tests (2100F).

일정하게 강우가 내릴 수 있도록 고안되었다. 본 실험에서 물을 일정하게 공급하기 위하여 사용된 연동펌프(peristaltic pump)는 Baoding Shenchen Precision Pump Co.사의 BT 100 M을 사용하였다. 본 펌프의 유동량(Flow rate)은 0.1-100 rpm 범위에서 물의 공급이 가능하며, 두 펌프의 조합을 통하여 강우강도를 제어하도록 고안하였다.

토층 내 강우침투시 시간에 따른 깊이별 체적함수비 및 모관흡수력의 변화를 측정하기 위하여 일련의 계측 시스템을 설치하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 강우침투시 깊이별 체적함수비 및 모관흡수력의 변화를 측정하기 위하여 모형토조의 바닥으로부터 10 cm, 25 cm 및 40 cm 깊이에 TDR 및 Tensiometer를 각각 설치하였다. 모형토조 내 성형된 토층의 깊이별 체적함수비를 측정하기 위한 TDR은 Decagon사의 EC-5를 설치하였고, 모관흡수력을 측정하기 위한 Tensiometer는 Soil moisture사의 2100F를 설치하였다. 모형토조 내 설치된 TDR 및 Tensiometer는 5초 간격으로 측정하도록 하였으며, 측정된 체적함수비와 모관흡수력은 데이터 로거를

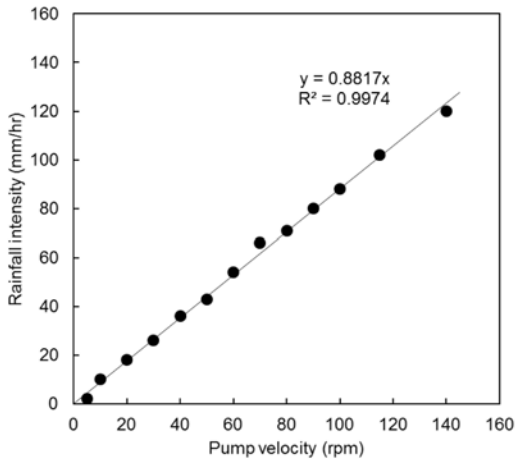


Fig. 6. Estimation of rainfall intensity according to pump rotation speed.

통하여 컴퓨터에 자동 저장하도록 하였다. 본 모형실험에서 사용된 데이터 로거는 Campbell사의 CR 1000을 사용하였다. Fig. 4 및 5는 본 실험에서 사용된 TDR과 Tensiometer의 모습을 나타낸 것이다.

강우재현장치를 이용한 강우강도 산정

본 모형실험에서는 다양한 강우강도에 따른 토층 내 침투흐름을 측정하기 위하여 고안된 강우재현장치를 활용하여 특정 강우강도를 재현하기 위한 예비실험을 수행하였다. 전술한 바와 같이 강우재현장치는 2대의 연동펌프(peristaltic pump)와 연결된 살수장치를 통하여 일정하게 강우가 내릴 수 있도록 고안되었다. 2대의 펌프 회전속도에 따라서 살수장치로 공급되는 물의 양이 다르게 되므로, 펌프의 회전속도를 증가시키면서 살수장치로부터 발생하는 강우의 양을 측정하였다. 이때 2대의 펌프 회전속도는 동일하게 하였다. 실험방법은 펌프의 회전속도를 결정한 상태에서 30분 동안의 강우량을 측정하고 이를 강우강도로 환산하였다. 그리고 다양한 펌프의 회전속도에 따라 강우강도를 측정하였다. Fig. 6은 펌프의 회전속도에 따른 강우강도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 펌프의 회전속도가 증가함에 따라 강우강도가 증가하며, 식 (1)과 같이 펌프의 회전속도에 따라 강우강도를 산정할 수 있는 회귀식을 산정하였다. 이를 이용하여 본 모형실험에서 특정 강우강도를 재현할 수 있다. 예를 들어 강우강도 80 mm/hr를 재현하고자 할 경우 2대 펌프의 회전속도는 각각 90 rpm으로 조절하면 가능하다.

Table 1. Engineering properties of Jumoonjin standard sand.

Description	Symbol	Property
Specific gravity	G_s	2.621
Max. dry density	γ_{dmax}	1.613 g/cm ³
Min. dry density	γ_{dmin}	1.366 g/cm ³
Effective particle size	D_{10}	0.42 mm
Uniformity coefficient	C_u	1.5
Coefficient of curvature	C_c	1.0
Soil classification	USCS	SP

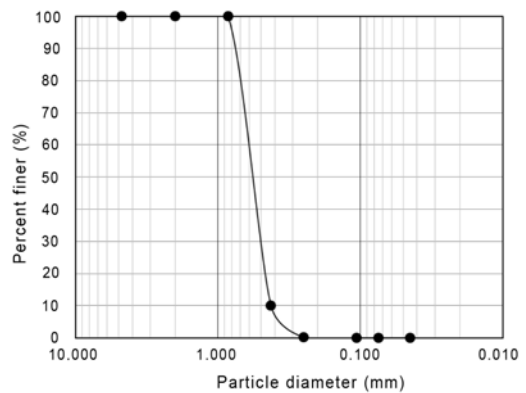


Fig. 7. Grain size distribution curve of Jumoonjin standard sand.

$$I_R = 0.8817V_{pump} \quad (1)$$

모형지반

모형지반의 공학적 특성

본 모형실험에서는 지반재료로서 상대밀도 75%의 주문진 표준사를 사용하였다. 상대밀도 75%의 주문진 표준사의 공학적 특성을 조사하기 위하여 각종 토질시험을 수행하였다. 주문진 표준사의 경우 ASTM D 4254-83 및 ASTM D 4254-83 시험기준에 따라 시료에 대한 최대 및 최소건조단위중량을 측정하였고 상대밀도 75%의 조건으로 주문진 표준사의 시료를 성형하였다.

Table 1은 상대밀도 75%의 주문진 표준사의 공학적 특성을 조사하기 위하여 수행된 토질시험결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 경우 비중은 2.62이며, 유효입경은 0.42 mm, 균등계수와 곡률계수는 각각 1.5 및 1.0, 통일분류법으로 SP에 해당하는 것으로 나타났다. 한편 Fig. 7은 주문진 표준사의 입도 분포곡선을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같

Table 2. Curve-fitting parameters estimated by the van Genuchten model.

Curve-fitting parameter		α (kpa ⁻¹)	n	m	R^2
Standard sand	Drying	0.393	8.553	0.883	0.995
	Wetting	0.593	5.561	0.820	0.984

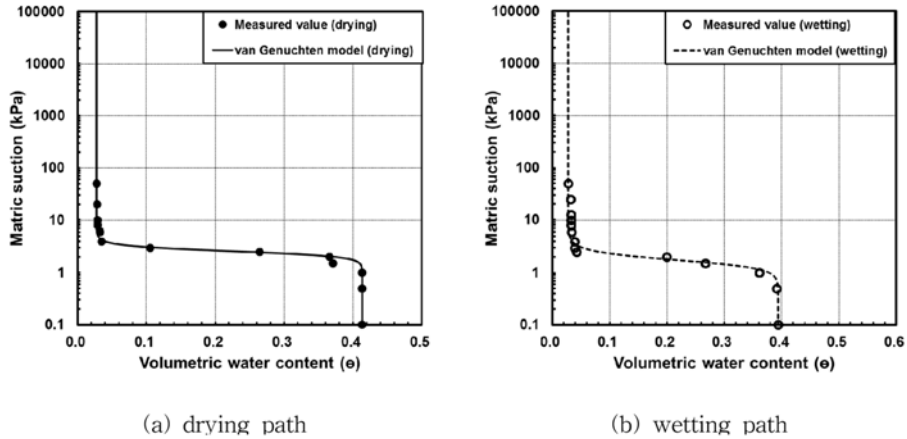


Fig. 8. Soil-Water Characteristics Curves of Jumoonjin standard sand with a relative density of 75%.

이 주문진 표준사의 경우 입도분포가 균등함을 알 수 있다.

모형지반의 불포화 특성

본 연구에서는 상대밀도 75%의 주문진 표준사와 용인 현장토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 건조 및 습윤과정의 흡-함수 특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다. 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울 등으로 구성되어 있으며, 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하여 압력을 0-300 kPa 범위까지 적용할 수 있다(Song, 2013).

본 실험장치를 이용하여 상대밀도 75%의 주문진 표준사에 대한 흡-함수특성곡선 산정을 위한 실험을 수행하였다. 시료에 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다(Song, 2013).

측정된 모관흡수력과 간극수량은 van Genuchten (1980)의 제안식을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측할 수 있다. van Genuchten (1980)은 Mualem (1976) 모델을 토대로 유효포화도와 압력수두의 상관관

계를 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 제안하였다. 식 (2)는 van Genuchten (1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC)의 식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right]^m \quad (2)$$

여기서, S_e 는 유효포화도, S_r 는 잔류포화도, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 는 잔류체적함수비, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, α 는 공기유입값 관련 계수, m 은 변곡점의 경사 관련 계수, 그리고 n 은 잔류함수비 관련 계수이다.

측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 비선형 최소제곱법(nonlinear least squares analysis)을 적용하여 van Genuchten (1980) 제안식의 불포화 계수인 α , n 및 m 을 산정하였다. Table 3은 상대밀도 75%의 주문진 표준사에 대한 불포화 계수를 산정한 것이다.

Table 2에 제시된 불포화 계수를 이용하여 상대밀도 75%의 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 나타낼 수 있다. Fig. 8은 상대밀도 75%의 주문진 표준사의 흡-함수특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선은 일반적인 흡에서 나타나는 S자 모양의 비선형적인 관계를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력보다 상대적으로 큰 값을 나타낸다.

실험방법

본 연구에서는 모형토조를 이용하여 강우강도 및 흙의 종류에 따라 토층내 강우침투에 대한 모형실험을 수행하였다. 본 연구에서는 강우강도에 따른 토층 내 강우침투 흐름을 조사하기 위하여 상대밀도 75%의 주문진 표준사를 대상으로 100 mm/hr, 80m m/hr, 50 mm/hr, 30 mm/hr, 10 mm/hr의 강우강도에서 각각 실험을 수행하였다.

한편 본 연구에서 수행된 모형실험은 다음과 같은 순서로 진행되었다.

- ① 주문진 표준사를 건조로에 넣고 105°C에서 24시간 이상 건조시킨다.
- ② 상대밀도 75%의 주문진 표준사를 조성하기 위하여 건조된 일정량의 주문진 표준사를 모형토조내 3층으로 구분하여 다짐장비와 고무망치를 이용하여 다진다.
- ③ TDR 및 Tensiometer는 모형토조에 시료를 조성하면서 함께 설치하며, 토조 바닥면으로부터 10 cm, 25 cm 및 40 cm에 위치시키다.
- ④ 모형토조 상부에 살수장치를 설치하고 튜브를 이용하여 연동펌프(peristaltic pump)와 연결한다.

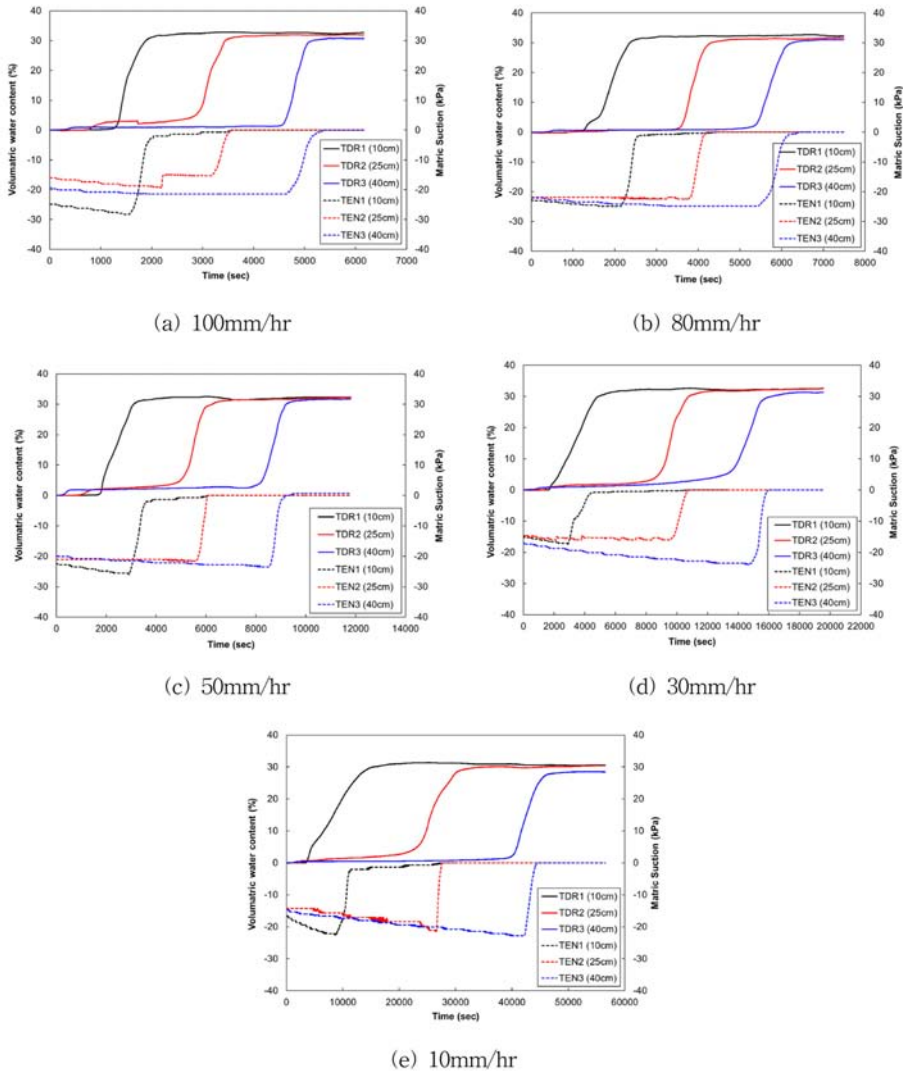


Fig. 9. Results of rainfall infiltration tests for various rainfall intensities



Fig. 10. Saturation process from the bottom of the soil box.

- ⑤ 특정 강우강도로 실험을 수행하기 위하여 연동펌프(peristaltic pump)의 회전속도(rpm)를 조절한다.
- ⑥ TDR 및 Tensiometer로 부터 강우에 따른 체적함수비 및 모관흡수력의 변화를 실시간으로 측정한다.
- ⑦ 측정된 체적함수비와 모관흡수력을 토대로 강우에 따른 포화속도를 분석한다.

모형실험결과 및 분석

모형실험결과

상대밀도 75%의 주문진 표준사를 대상으로 100 mm/hr, 80 mm/hr, 50 mm/hr, 30 mm/hr, 10 mm/hr의 강우

강도에 대한 강우침투 흐름을 파악하기 위한 모형실험을 수행하였다. Fig. 9는 강우강도가 100 mm/hr, 80 mm/hr, 50 mm/hr, 30 mm/hr 및 10 mm/hr 일 경우 주문진 표준사에 대한 강우침투 모형실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 초기 모관흡수력은 15-20 kPa 범위에 있으며, 포화가 진행됨에 따라 0 kPa에 도달하는 것으로 나타났다. 그리고 주문진 표준사의 체적함수비는 초기에 건조상태이므로 0%이며, 포화가 진행됨에 따라 약 30%까지 도달함을 알 수 있다.

한편 Fig. 10은 주문진 표준사에 대한 강우침투 모형실험 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 포화부분이 하부 바닥면으로부터 시작되어 상승하고 있음을 알 수 있다. 주문진 표준사에 대한 강우침투 모형실험의 경우 강우로 인하여 상부 지표면으로부터 습윤전선이 형성되어 하강하는 것이 아니라 하부 바닥면에서부터 지하수위가 형성되어 상승하는 것으로 나타났다. 주문진 표준사의 경우 투수계수가 상대적으로 크므로 강우시 침투수가 상부 지표면에 머무르지 못하고 하부 바닥면으로 이동하여 발생된 것으로 판단된다.

흡입응력 산정

Lu and Likos (2006)에 의하면 흡입응력은 고결작용, 반데르발스 인력, 전기이중층 척력에 기인한 입자간의

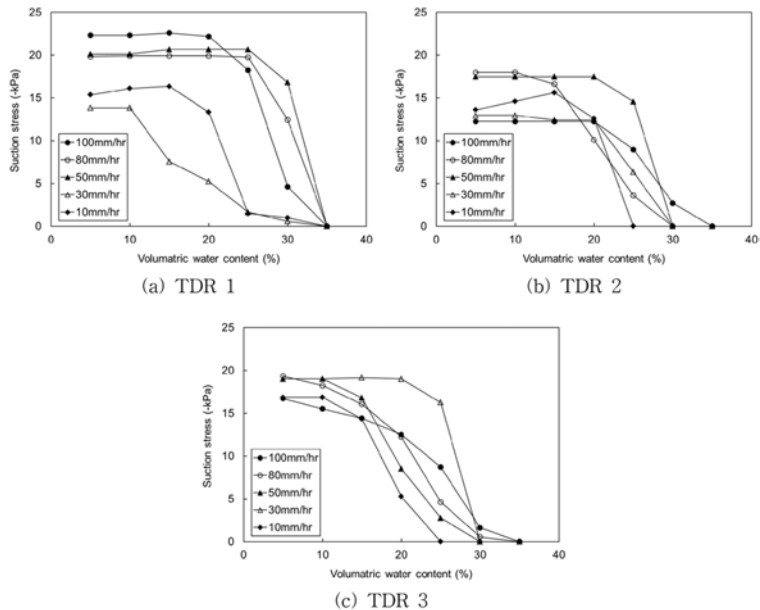


Fig. 11. Suction stress at different depths for various rainfall intensities.

물리화학적 응력과, 표면장력 및 부간극수압으로 인하여 발생하는 모관흡수력의 결과로 개념화 시킬 수 있다. 흡입응력을 구성하는 이러한 입자간 응력들은 함수비, 포화도 혹은 모관흡수력의 함수로 나타낼 수 있다.

Lu and Likos (2006)는 흡입응력항(σ^s)을 적용하여 불포화토의 유효응력을 식 (3)과 같이 Terzaghi (1943)의 유효응력과 유사한 형태로 제안되었다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (3)$$

여기서 σ^s 는 흡입응력이다. 이때 $\sigma^s = -(u_a - u_w)S_e$ 으로 나타낼 수 있다.

강우침투 모형실험결과를 토대로 강우강도에 따른 흡입응력의 변화를 살펴보았다. 먼저 흡입응력을 산정하기 위하여 Fig. 8의 흡-함수특성곡선과 강우침투 모형실험 결과로부터 얻은 모관흡수력 및 체적함수비를 활용하였다. Fig. 11은 주문진 표준사의 강우침투 모형실험을 토대로 강우강도에 따른 흡입응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체적함수비가 증가함에 따라 흡입응력은 감소하는 것으로 나타났다. 특히 체적함수비가 20-30% 사이에서 흡입응력은 비교적 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 강우강도의 크기에 따라 흡입응력의 변화 및 거동에 대한 뚜렷한 특징은 없는 것으로 나타났다.

포화속도 산정

Fig. 12는 주문진 표준사에 대한 강우침투 모형실험 결과로부터 강우강도에 따른 깊이별 토층의 포화속도를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우강도가 증가함에 따라 토층의 포화속도는 증가함을 알 수 있다. 또한 강우강도가 30 mm/hr 이하의 경우 깊이별 토층 내 포화속도는 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났으나, 강우강도가 50 mm/hr 이상의 경우 토층 바닥면에서부터 포화되는 속도가 증가하는 것으로 나타났다.

그리고 Fig. 13은 강우강도와 깊이별 포화속도를 평균하여 나타낸 평균포화속도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우강도가 증가함에 따라 평균포화속도는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이를 토대로 회귀분석을 실시하여 강우강도에 따른 상대밀도 75%의 주문진 표준사로 구성된 토층의 평균포화속도를 식 (4)와 같이 제시할 수 있다.

$$V_{s,avg} \text{ (cm/sec)} = 0.068 I_R \text{ (mm/hr)} \quad (4)$$

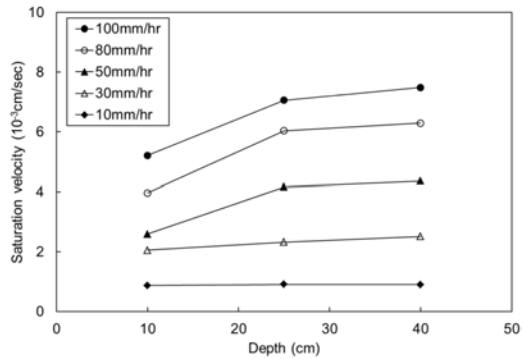


Fig. 12. Saturation velocities at different depths for various rainfall intensities.

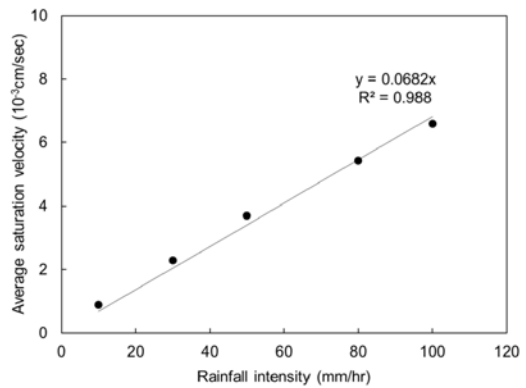


Fig. 13. Estimation on average saturation velocity of Jumoonjin standard sand depending on rainfall intensity.

결론

본 연구에서는 모형토조내 토층을 형성하고 강우를 재현시켜 강우강도에 따른 토층내 포화속도를 산정하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 상대밀도 75%의 주문진 표준사를 이용하여 강우강도에 따른 모관흡수력과 체적함수비의 변화를 측정하였다. 이를 토대로 강우강도에 따른 토층 내 포화속도 및 흡입응력에 대한 현장 모니터링 기준으로 제시하고자 하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 불포화 지반 내 강우침투 특성을 파악하기 위하여 모형토조를 이용한 실내모형실험 장치를 개발하였다. 불포화 지반 내 강우침투 모형실험장치는 모형토조, 강우 재현장치 및 계측장치로 구성되어 있다.

(2) 주문진 표준사의 경우 입도가 균등하고 투수계수가 상대적으로 크므로 강우시 지표면에서 습윤전선이 형

성되어 하강하는 것이 아니라 하부 바닥면에서부터 지하수위가 형성되어 상승하면서 포화가 진행되었다.

(3) 주문진 표준사의 흡·함수특성곡선과 모형실험결과를 이용하여 강우강도에 따른 토층내 흡입응력의 변화를 알 수 있다. 토층 내에서 체적함수비가 증가함에 따라 흡입응력은 감소하며, 체적함수비가 20-30% 사이에서 흡입응력은 비교적 빠르게 감소한다.

(4) 강우강도가 증가함에 따라 깊이별 포화속도를 평균하여 나타낸 평균포화속도는 선형적으로 증가한다. 상대밀도 75%의 주문진 표준사를 대상으로 강우강도와 평균포화속도의 상관관계에 대한 회귀분석을 실시한 결과 강우강도에 따른 평균포화속도는 $V_{s,avg}(\text{cm/sec}) = 0.068 I_R(\text{mm/hr})$ 와 같이 제안할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “실시간 모니터링 기반의 산사태 신속탐지기술 개발 (15-3413)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Cho, S. E. and Lee, S. R., 2001, A comparative study of surficial stability analyses in unsaturated soil slopes, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 17(4), 135-143 (in Korean with English abstract).
- Hilf, J. W., 1956, An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils, Technical Memorandum No.654, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado, 654p.
- Hong, W. P., Choi, S. H., Han, J. G., and Hwang, I. C., 1996, A study on the slope stability analysis method during rainfall, *Proc. Korean Society of Civil Engineering Annual Conference*, 195-198 (in Korean).
- Kim, H., Shin, H., Kim, Y. T., Park, D. G., and Min, T. K., 2012, Analysis of seepage velocity in unsaturated weathered soils using rainfall infiltration test, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 28(2), 71-78 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. H., Jeong, S. S., Park, S. W., and Sharma, J., 2004, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils, *Engineering Geology*, 75(3-4), 251-262.
- Lu, N. and Likos, W. J., 2006, Suction stress characteristic curve for unsaturated soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(2), 131-142.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resource Research*, 12(3), 513-522.
- Park, K. B., Chae, B. G., and Park, H. J., 2011, Analysis of rainfall infiltration velocity in unsaturated soils under both continuous and repeated rainfall conditions by an unsaturated soil column test, *The Journal of Engineering Geology*, 21(2), 133-145 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. S., 2013, Estimation on unsaturated hydraulic conductivity function of Jumoonjin sand for various relative densities, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 33(6), 2369-2379 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. S. and Hong, W. P., 2011, Analysis of slope stability with consideration of the wetting front and groundwater level during rainfall, *The Journal of Engineering Geology*, 21(1), 25-34 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. S., Hwang, W. K., Jung, S. J., and Kim, T. H., 2012, A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions, *Engineering Geology*, 124(4), 90-97.
- Terzaghi, K., 1943, *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 510p.
- van Genuchten, M. T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.

김철민

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3035
E-mail: kcm6114@naver.com

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3035
E-mail: yssong@kigam.re.kr

김학준

대전대학교 공과대학 지방방재공학과
대전광역시 동구 대학로 62
Tel: 042-280-2574
E-mail: hakkim@dju.kr