화강풍화토 모형사면의 인공강우 침투거동 해석

Seepage Behavior by Artificial Rainfall in Weathered Granite Model Slope

이 금 성¹⁾ · 한 희 수[†] · 장 동 훈²⁾ · 윤 동 구³⁾

Kumsung Lee · Heuisoo Han · Donghun Chang · Donggu Yoon

Received: August 14th, 2013; Revised: August 21st, 2013; Accepted: October 10th, 2013

ABSTRACT : In this study, weathered granite model tests were performed to investigate the variation of volumetric water content and matric suction by the adsorption and desorption processes of artificial rainfall. It has been compared with numerical analysis in unsaturated condition. As the results, the behaviors of volumetric water content and matric suction were distinguished by the seepage distance separated into higher, middle and lower area, and the drainage layer located at the bottom of the experimental device. In the adsorption process, the instantaneously large change of matric suction and water content were related to the increase of permeability in soil. However, in the desorption process, the change of matric suction and water content were gradually small because of the decrease of permeability. The volumetric water content and matric suction showed the difference according to the seepage distance, however the typical characteristic curves were made by the adsorption and desorption processes.

Keywords : Unsaturated soil, Slope model, Matric suction, Rainfall, Volumetric water content

요 지 : 본 연구에서는 인공강우의 침투·배수에 의한 모형사면의 침투거동을 정확히 파악하고자 대구·경북권의 화강풍화토를 이용한 실내모형실험을 수행하였다. 강우의 침투과정과 배수과정에 대한 함수비와 모관흡수력 변화를 측정하고 부정류상태의 수치해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다. 실험결과, 함수비와 모관흡수력의 거동은 사면의 상부, 중간부, 하부 영역에 따라 침투 거리와 하부 배수층의 영향으로 다르게 나타났다. 공극 속 지하수량 변화에 따른 투수계수 변화는 침투과정에서 함수비 증가 및 모관흡수력 감소를 즉각적이고 큰 값으로 유발하였다. 그러나 배수과정에서는 함수비 감소 및 모관흡수력 증가가 완만하고 작은 값으로 발생하였다. 강우로 인한 체적함수비와 모관흡수력이 위치에 따라 값의 차이는 있지만, 침투 및 배수시간에 따른 전형적인 함수특성 곡선을 나타내었다.

주요어 : 불포화토, 모형사면, 강우, 모관흡수력, 체적함수비

1. 서 론

강우의 침투는 사면의 안정성에 많은 영향을 미친다. 불포화 사면에 강우가 침투하게 되면 토층의 모관흡수력 감소로 인한 전단강도의 감소와 침투수의 무게 증가로 인한 단위 중량의 증가가 동시에 발생하며, 사면의 안전율이 감소하게 된다(Ng & Shi, 1998). 따라서 사면안정의 합리적인 해석을 위하여 지반 내의 강우 침투거동에 대한 이해가 요구되며, 실내모형실험과 수치해석을 통한 실제 지반의 침투 특성을 파악하고자 하는 연구가 여러 연구자에 의해 수행되었다. 국내에서는 Kim & Kim(1991)과 Kim et al.(2001)이 모형실험을 통해 강우 침투로 인한 간극수압의 변화를 측정하고 사면의 안정성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Jeung

et al.(2008)은 강우재현장치를 활용한 실내모형실험을 통해 유한사면 내의 간극수압 변화를 측정하고 이를 바탕으로 강우 지속시간에 따른 강우 시 유한사면 내의 침투거동을 분석하였다.

국외의 경우, Meiketsu(1999)는 강우로 인한 사면의 표층 붕괴규모를 고려하여 토조를 제작하고 인공강우를 재현하여 강우 시 사면 내 침투거동에 대한 실험을 실시한 결과로 사면붕괴의 이론모델을 제시하였다. 습윤대의 발달과정과 투수계수가 크고 표층토가 얇을수록 단기간의 호우에 약하며, 투수계수가 작고 표층토가 두꺼울수록 장기간의 호우에 약하다는 것을 밝혔다. Tami et al.(2004)은 세립토와 조립토층으로 구성된 경사사면 토조를 제작하여, 인공강우 실험 장치로부터 정상상태의 침투시험을 통한 불포화토의 정상

1) Kunhwa Engineering & Consulting

† Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology (Corresponding Author : hanhs@kumoh.ac.kr)

2) JL Foundation ENG. Co., Ltd.

3) Korea Consultants International Co., Ltd.

침투상태에서의 함수특성곡선 이력현상의 영향을 연구하고, 수치해석과 비교·검토하였다. 그 결과, 불포화토의 이력 거동이 모관흡수력에 영향을 미치고, 선행강우조건도 이력 현상에 많은 영향을 미치는 것을 규명하였다.

또한, 불포화 사면의 침투·배수거동과 이력현상 등은 흙의 고유한 특성에 기인하므로 국내의 화강풍화토를 대상으로 수행된 모형실험이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 인공강우의 침투·배수에 의한 화강풍화토 모형사면의 침투거동을 정확히 파악하고자 실내 모형실험을 수행하였다. 강우의 침투과정과 배수과정에 대한 함수비와 모관흡수력 변화를 측정하고 부정류상태의 수치해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다.

2. 화강풍화토 모형사면

대구·경북권 화강풍화토의 기본 물성시험 결과는 Table 1과 같다. 통일분류법상 SW로 산정되었고, 비중은 2.53, 최대진조단위중량은 18.95 kN/m^3 , 최적함수비는 11.50%로 산정되었다. 모형사면의 다짐도(85%)와 동일한 조건에서 삼축압축시험과 정수위 투수시험을 수행하였으며, 점착력은 0kPa, 내부마찰각은 36.9, 포화투수계수는 0.013 cm/sec 로 산정되었다.

모형사면은 사면 경사부에 합판을 이용하여 각 다짐층 높이를 20cm씩 다짐도 85%에 맞게 축조하였다. Fig. 1(a)는 모형사면의 단면도를 나타낸 것이다. 모형사면의 경사는 50도, 높이는 60cm이다. 함수비와 모관흡수력 센서는 Fig. 1(b)와 같이 2단면 4개소씩 총 8개소에 설치하였다. 최하단 A와 E 센서는 지중 60cm 지점, B와 F 센서는 지중 40cm

지점, C와 G 센서는 지중 20cm 지점, D와 H 센서는 지중 10cm 지점에 설치하였다. 즉, Section I에 설치된 계측기는 A, B, C, D이며, Section II의 경우, E, F, G, H로 두 열로 배치되었다(Fig. 1(b)).

함수비는 TDR(Time Domain Reflectometer)센서를 이용하여 측정하였다. TDR센서의 프루브는 Decagon Devices사에서 제작된 EC-5이며, 크기는 $8.9 \times 1.8 \times 1.7 \text{ cm}$ 이고, 정확도는 사질토에서 $\pm 3\%$, 분해능은 0.1%이다. 함수비 측정용 데이터로거는 Decagon Devices사에서 제작된 Em50을 이용하여 5분 간격으로 측정하였다.

모관흡수력은 토양수분장력계를 이용하여 측정하였으며, 다공질 세라믹 파이프와 압력 센서로 구성된다. 다공질 세라믹 파이프는 Soilmoisture사에서 제작한 Jet Fill Tensiometer와 압력 센서는 ICT International Pty사에서 제작한 Tensiometer Transducer를 이용하였다. Jet Fill Tensiometer는 다공질 세라믹 컵과 흙의 접촉부에서 물의 표면장력에 의해 부의 간극수압이 발생하고 이를 압력 센서가 측정하게 된다. 압력 센서의 측정범위는 0~100kPa이며, 분해능은 0.1kPa, 정확도는 $\pm 1.0\%$ 이다. 모관흡수력 측정용 데이터로거는 OTT hydrometric사에서 제작한 LogoSens를 이용하였으며, 총 8채널을 사용하여 5분 간격으로 측정하였다.

(a) Section view

(b) Schematic of sensors

Fig. 1. Laboratory model slope

Table 1. Physical properties of soil

Specific gravity		2.53	
Compaction test	Max. dry unit weight(kN/m^3)	18.95	
	Optimum w/c(%)	11.50	
Sand replacement method	Dry unit weight(kN/m^3)	16.05	
	w/c(%)	8.42	
Constant head permeability test(cm/sec)		0.013	
Triaxial compression test	Cohesion(kPa)	0.0	
	Internal friction(°)	36.9	
Uniformity coefficient C_u		7.47	
Coefficient of curvature C_c		1.32	
Plastic limit		N.P	
D_{10} (mm)	0.25	Coarse sand(%)	78.80
D_{30} (mm)	0.78	Fine sand(%)	13.20
D_{60} (mm)	1.87	Silty(%)	2.00
Gravel(%)	6.05	USCS Texture	SW

강우재현은 Fig. 2에 보인 바와 같이 세굴방지 및 지표 침투과정을 위해 30mm/hr의 강우를 10분 재현, 50분 침투 과정을 하루에 4회 반복하였다. 4시간의 연속강우로 고려하면 강우강도는 5mm/hr이다. 이러한 과정을 3일 반복하여 강우의 침투·배수에 의한 침투거동을 파악하고자 하였다.

또한, 인공강우는 표면 유출과 세굴 등의 영향을 없애기 위해 모형사면의 상부($1m \times 1m = 1m^2$)에만 재현하였다. 상기 조건에 따른 강우 침투·배수에 따른 함수비와 모관흡수력을 측정하였다.

Fig. 2. Rainfall condition

(a) SWCC

(b) Permeability function

Fig. 3. Characteristic of unsaturated soil

3. 수치해석

수치해석을 수행하여 모형실험 결과와 침투거동을 비교하였다. 수치해석은 유한요소프로그램인 SEEP/W(GEO-SLOPE, 2007)를 이용하였다.

3.1 불포화 물성

수치해석에 필요한 대구·경북권 화강풍화토의 불포화 물성은 Fig. 3(a)와 같이 압력판 추출시험을 통하여 함수특성곡선을 획득하였고, RETC 프로그램을 이용하여 Van Genuchten 모델로 회귀분석을 하였다(Van Genuchten et al., 1991). 공기함입치 u_b 와 계수 n , 포화 체적함수비, 잔류함수비는 Table 2에 정리되었다. 불교란 시료의 투수계수는 함수특성곡선으로부터 Mualem 이론에 의하여 추정하는 방법을 이용하였다. 그 결과 그림 Fig. 3(b)와 같이 평가되었으며, Table 2에 정리되었다.

3.2 해석조건

수치해석을 위한 모형사면의 Geometry는 Fig. 4(a)와 같

Table 2. Input data for numerical analysis

Parameter	Soil	Crushed Stone
u_b (kPa)	0.452	-
n	1.189	-
θ_s (%)	0.38	-
k_s (m/s)	1.30E-04	0.13

(a) Geometry

(b) Initial condition(kPa)

Fig. 4. Geometry and initial condition of model slope

다. 요소망 생성은 사각형과 삼각형을 혼합한 형태이며 대략적인 Element size는 0.03m로 설정하여 942개의 Node와 853개의 Elements로 요소망을 세분화하였다.

유량 경계조건은 모형실험과 동일하게 인공강우를 사면 상부에 적용하였고 사면의 경사부 표면에서는 지하수가 유출될 수 있도록 설정하였다. 또한, 좌우 측면과 바닥면은 불투수경계를 주었다.

부 정류조건에서 해석을 수행하였으며, 초기조건은 Spatial function을 이용하여 실험과정에서 측정된 각 계측기의 모관흡수력을 입력하였다. Fig. 4(b)는 초기 모관흡수력 분포를 나타낸 것이다.

4. 모형사면실험 결과

모형사면실험 결과는 함수비와 모관흡수력의 변화로 나타내었다. 사면의 상부면을 기준으로 센서가 설치된 심도에 따라 인공강우의 침투·배수에 의한 함수비와 모관흡수력의 분포와 변화량을 나타내었다. 또한, 실험결과를 토대로 모형사면 내의 침투거동을 정리하였다.

Table 3과 Fig. 5는 인공강우의 침투·배수에 의한 함수비와 모관흡수력의 변화를 나타내었다. 함수비의 분포는 초기

Table 3. Variation of volumetric water content and matric suction

Section I	Sensor	Volumetric water content(%)			
		Initial	Wetting	Drying	Variation
	A	17.69	32.31	21.60	10.71
	B	17.01	21.51	19.56	1.95
	C	11.91	19.64	14.63	5.01
Section II	Sensor	Matric suction(kPa)			
		Initial	Wetting	Drying	Variation
	A	7.11	5.79	4.41	1.38
	B	9.02	7.31	5.65	1.66
	C	9.89	7.08	5.64	1.44
Section I	Sensor	Volumetric water content(%)			
		Initial	Wetting	Drying	Variation
	A	18.96	29.73	23.73	6.03
	B	16.08	22.96	18.20	4.76
	C	14.71	23.30	17.78	5.52
Section II	Sensor	Matric suction(kPa)			
		Initial	Wetting	Drying	Variation
	A	6.37	4.80	3.65	1.15
	B	8.79	7.10	5.87	1.23
	C	9.42	6.56	5.77	0.79
Section I	Sensor	Volumetric water content(%)			
		Initial	Wetting	Drying	Variation
	A	17.69	32.31	21.60	10.71
	B	17.01	21.51	19.56	1.95
	C	11.91	19.64	14.63	5.01
Section II	Sensor	Matric suction(kPa)			
		Initial	Wetting	Drying	Variation
	A	7.11	5.79	4.41	1.38
	B	9.02	7.31	5.65	1.66
	C	9.89	7.08	5.64	1.44

(a) Volumetric water content profiles(section I)

(b) Matric suction profiles(section I)

(c) Volumetric water content profiles(section II)

(d) Matric suction profiles(section II)

Fig. 5. Variation of volumetric water content and matric suction

Fig. 6. Variation of matrix suction

와 침투·배수상태 모두에서 사면 상부와 하부에서 높게 나타났고 사면 중간부는 작게 나타났다. 함수비 변화량은 상·하부에서 함수비 변화량이 크게 나타났다.

모관흡수력의 분포는 초기에는 사면의 상부에서 크고 하부로 갈수록 작게 나타났다. 인공강우의 침투로 인해 사면의 상부와 하부에서 크게 감소하였으며, 배수로 인해 초기의 모관흡수력 분포와 같이 상부에서 크고 하부에서는 작게 나타났다. 모관흡수력 변화량은 함수비 변화량과는 달리 상부에서만 크게 나타났다. 함수비와 모관흡수력의 분포와 변화량은 사면의 하부에서 다소 차이가 발생하였으며, 이는 사면 하부배수층의 영향으로 판단된다.

초기 상태에서의 함수비와 모관흡수력은 강우 침투로 인한 습윤과정에서 급격히 발생하여 함수비는 증가하고 모관흡수력은 감소하였다. 반면 강우의 배수과정은 습윤과정에 비해 천천히 변화하였다.

Fig. 6은 강우 침투·배수에 의한 화강풍화토 모형사면의 침투거동에 대한 개념도이다.

함수비는 강우의 침투에 의해 급격히 증가하였고 배수에 의해서는 완만히 감소하였다. 지표가 가까운 D 센서(Section I)와 H(Section II) 센서에서는 인공강우의 침투·배수에 의한 체적함수비 변화가 즉각적으로 나타났으며, 지표와 먼 A 센서(Section I)와 E 센서(Section II)에서는 침투시간이 필요하므로 상대적으로 천천히 변화가 발생하였다.

모관흡수력과 상부 센서들은 강우의 영향으로 상부체적 함수비 거동과 같이 크고 즉각적인 반응을 보이나, 하부는 침투과정에 따른 작고 늦은 반응을 보여준다. 하부 체적함수비는 반응은 늦으나 큰 변화량을 보여주었다. 이는 하부 배수층에 의해 A, E 센서가 배치된 사면의 하부영역이 일정 부분 모관흡수력이 감소함을 의미한다.

5. 모형실험과 수치해석 결과 비교

Fig. 7은 인공강우의 침투·배수에 의한 모형실험과 수치

해석의 함수비와 모관흡수력 변화를 비교한 것이다.

함수비는 수치해석 결과, 하부에 설치된 A와 B 센서 영역에는 강우의 침투·배수에 의한 거동이 나타나지 않았고, 약 30%의 함수비에서 정상류 침투상태로 나타나 포화상태가 유지됨을 보이고 있다. 그러나 실험결과 하부 A 센서 영역은 체적함수비 변화가 매우 급격히 일어났고, B 센서 영역 역시 완만하지만 변화가 확실히 나타났다. 모형사면 상부에 설치된 C와 D 센서에서는 수치해석 시 강우의 침투·배수에 의한 거동이 나타났다. 하지만 전체적으로 실험결과보다 약 4~6% 정도 높은 영역에서 함수비의 거동이 발생하였다. 또한, 상부 계측자료일수록 민감하여 날카로운 발톱 모양을 하고 있으며, 하부 자료일수록 상대적으로 완만한 곡선 모양을 보이고 있다.

모관흡수력은 수치해석 결과, 하부의 A 센서 영역에는 강우의 침투·배수에 의한 거동이 나타나지 않았고, 약 2kPa의 모관흡수력에서 정상류 침투상태로 나타났다. B 센서 영역에는 강우의 침투·배수에 의한 거동이 명확히 나타나지 않았다. 그러나 하부 A 및 B 센서의 실험결과 모관흡수력 변화가 나타났다. 또한, 상부에 설치된 C와 D 센서에서는 해석결과 모관흡수력 변화가 명확히 나타났다. 하지만 전체적으로 실험결과보다 약 4kPa 정도 낮은 영역에서 모관흡수력의 거동이 발생하였다. 그리고 상부 계측자료가 강우에 민감하여 즉각적인 반응을 보이며, 하부 계측자료일수록 완만한 거동을 보여준다.

즉, 모형실험과 수치해석에서 인공강우의 침투에 의한 함수비 증가 및 모관흡수력 감소는 큰 값으로 급격히 발생하였고, 배수에 의한 함수비 감소 및 모관흡수력 증가는 작은 값으로 천천히 발생하였다.

이는 불포화토의 침투 및 배수과정의 이력현상으로, 강우에 의한 침투과정에서 공극 속의 증가한 지하수량이 투수계수를 증가시켜 함수비 및 모관흡수력의 급격하고 큰 변화를 유발하기 때문이다. 그리고 배수과정에 지하수의 감소량이 투수계수를 감소시켜 함수비 및 모관흡수력의 완만하고 작은 변화를 유발한다.

모형실험과 수치해석에서 유사한 거동을 나타냄에도 차이가 발생한 원인으로는 교란된 시료로부터 구한 함수특성 곡선을 수치해석 시 적용하였기 때문으로 판단된다. 모형사면의 투수계수와 강우강도가 크며, 수치해석에서는 재현된 강우가 모두 침투되는 것으로 해석되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 인공강우의 침투·배수에 의한 모형실험과 수치해석의 함수비와 모관흡수력 변화를 3차원으로 도시한 그림이다. 모형사면 상하부의 체적함수비 변화는 약 18~32% 사이를 급격히 변화하지만, 중간부는 약 18~23% 사이의 좁

(a) Sensor A

(e) Sensor E

(b) Sensor B

(f) Sensor F

(c) Sensor C

(g) Sensor G

(d) Sensor D

(h) Sensor H

– Section I –

– Section II –

Fig. 7. Comparison of experiment and numerical analysis

(a) Sensor A

(e) Sensor E

(b) Sensor B

(f) Sensor F

(c) Sensor C

(g) Sensor G

(d) Sensor D

(h) Sensor H

– Section I –

– Section II –

Fig. 8. 3D-Variation of volumetric water content and mertyc suction

은 범위에서 움직이고 있음을 볼 수 있다. 그리고 모관흡수력의 경우 상부는 약 3.7~7.9kPa의 범위를, 하부는 3.7~5.8kPa의 범위를 보여준다. 체적함수비와 모관흡수력이 위치에 따라 값의 차이는 있지만, 침투 및 배수시간에 따른 전형적인 함수특성곡선을 보여주고 있음을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 인공강우의 침투·배수에 의한 대구·경북권 화강풍화토 모형사면의 침투거동을 정확히 파악하고자 실내모형실험을 수행하였다. 인공강우의 침투와 배수과정에 대한 함수비와 모관흡수력 변화를 측정하고 부정류상태의 수치해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다.

- (1) 인공강우의 침투·배수에 의한 함수비와 모관흡수력의 분포를 비교, 함수비는 사면 상·하부에서 크게 나타나고 변화량 또한 컸다. 하지만 모관흡수력은 사면 상부에서 크게 나타나고 하부로 갈수록 감소하였으며, 변화량 또한 같은 거동을 나타내었다.
- (2) 모형실험 결과, 사면 상부는 인공강우의 영향을 직접적으로 받아 함수비 변화량이 크고 즉각적이며, 사면 중앙부는 침투 및 배수과정이 길어서 상대적으로 적은 함수비의 변화량을 나타낸다. 그리고 사면 하부는 하단에 설치된 배수층의 영향을 받아 큰 함수비 변화량을 보이거나 침투과정이 길어 늦은 반응을 보임을 볼 수 있다.
- (3) 공극 속 지하수량 변화에 따른 투수계수 변화는 침투과정에서 함수비 증가 및 모관흡수력 감소를 즉각적이고 큰 값으로 유발하였다. 그러나 배수과정에서는 함수비 감소 및 모관흡수력 증가가 완만하고 작은 값으로 발생하였다.
- (4) 강우로 인한 체적함수비와 모관흡수력이 위치에 따라

값의 차이는 있지만 침투 및 배수시간에 따른 전형적인 함수특성곡선을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술S01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. GEO-SLOPE (2007), Seepage modeling with SEEP/W 2007, GEO-SLOPE International Ltd, Canada, pp. 35~166.
2. Jeung, E. J., Kim, H. T., Jang, H. I., Kim, K. S. and Kang, I. K. (2008), A experimental study on the variation of the pore-water pressure in the soil slope during the rainfall, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 9, No. 1, pp. 33~40 (in Korean).
3. Kim, H. T., Yoo, H. K., Kang, I. K. and Lee, H. J. (2001), Investigation of pore water pressure variation in slope during rainfall from laboratory model tests, Korean Geotechnical Society National Spring Conference, pp. 199~206.
4. Kim, S. K. and Kim, Y. M. (1991), Slope instability due to rainfall, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 7, No. 1, pp. 53~64 (in Korean).
5. Meiketsu, E. (1999), Slope failure during rainfall, Soils and Foundation, Vol. 47, No. 5, pp. 17~20.
6. Ng, C. W. W. and Shi, Q. (1998), A numerical investigation of the stability on unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, Computers and Geotechnics, Vol. 22, No. 1, pp. 1~28.
7. Tami, D., Rahardjo, H. and Leong, E. C. (2004), Effects of hysteresis on steady-state infiltration in unsaturated slopes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 9, pp. 956~967.
8. Van Genuchten, M. T., Leij, F. J. and Yates, S. R. (1991), The RETC code for quantifying the hydraulic function of saturated soil, U. S. Salinity Lab., Department of Agricultural Research Service, Riverside, CA., pp. 2~91.