

강우침투실험을 통한 불포화 풍화토 지반의 강우 침투속도 분석

Analysis of Seepage Velocity in Unsaturated Weathered Soils Using Rainfall Infiltration Test

김 훈 ¹	Kim, Hoon	신 호 성 ²	Shin, Hosung
김 윤 태 ³	Kim, Yun-Tae	박 덕 근 ⁴	Park, Dug-Keun
민 덕 기 ⁵	Min, Tuk-Ki		

Abstract

Rainfall infiltration test under one dimensional condition is conducted to evaluate the effect of rainfall intensity on seepage velocity and infiltration characteristics for initial unsaturated sediment. Experimental results are compared with those numerical simulations with respect to variations of pore water pressure, degree of saturation and discharge velocity with time, and both results give good agreement. High rainfall intensity tends to increase seepage velocity almost linearly. But it shows rapid increase as rainfall intensity approaches saturated hydraulic conductivity of the sediment. In addition, the upper part of wetting front depth is partially saturated, not fully. Therefore, actual wetting front depth is considered to advance faster than theoretical prediction, which leads to slope instability of unsaturated slope due to surface rainfall.

요 지

본 연구에서는 실내 강우침투실험을 통하여 강우강도에 따른 지반 내 침투속도를 산정하였으며, 침투특성을 분석하여 보았다. 또한 수치해석을 이용한 해석결과와 비교·검증을 수행하였으며, 시간에 따른 간극수압과 포화도 그리고 유출속도의 변화는 대체로 잘 일치함을 보였다. 강우강도에 따른 침투속도는 실내실험과 수치해석에서 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 강우강도가 지반의 포화투수계수에 근접시 침투속도가 급격히 증가하였다. 또한 강우 침투시 습윤전선의 상부는 부분적으로 포화되어 침투하는 경향을 보였다. 따라서 실제 지반에서 습윤전선은 비교적 빠르게 진행하여 사면의 불안정을 초래할 것으로 판단된다.

Keywords : 1D column test, Rainfall intensity, Seepage velocity, Unsaturated soil, Wetting front

1. 서 론

최근 들어 세계적으로 이상기온 등의 영향으로 집중 호우가 빈번히 발생하고 있으며 이로 인한 자연재해 사망자수도 급격히 증가하고 있는 실정이다. 우리나라의

1999~2008년 자연재해로 인한 연평균 사망자수는 80.1 명으로 집계되었으며, 이중 급경사지 사면재해 사망자 수는 연평균 21.7명으로 전체 자연재해 사망자의 27.1%로 높은 비율을 차지하고 있다(박덕근 등 2008). 사면재해의 발생 원인으로 강우특성이 큰 영향을 미치게 되는

1 학생회원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan)

2 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, shingeo@ulsan.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, 부경대학교 해양공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ.)

4 정회원, 국립방재연구원 시설연구관 (Member, Senior Analyst, National Disaster Management Institute)

5 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

데, 최영은 등(2002)의 연구결과에 따르면 최근 우리나라 남부지방의 강우특성으로 강우일수는 감소하나 강수량과 강우강도는 증가하는 경향을 보여주고 있어 사면붕괴에 대한 대책이 시급하다.

실제 사면파괴 형상은 불포화 지반으로 강우 침투에 의한 지표면 하부 부근의 임계 포화깊이에 도달하여 얇은 파괴가 발생하는 경향이 있다(조성은과 이승래 2000; 김재홍 2002). 불포화 사면으로 강우가 침투하게 되면 토층의 음의 간극수압 감소로 인한 전단강도의 감소와 단위중량의 증가로 인해 사면의 안전율이 감소하게 된다(Ng과 Shi, 1998). 따라서 사면안정의 합리적인 해석을 위하여 지반내의 강우 침투흐름에 대한 이해가 요구되며, 실내모형실험을 이용하여 실제 지반의 침투특성을 파악하고자 하는 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되었다.

강우재현에 따라 지반내로 침투 발생시 불포화상태인 지반은 포화도 증가에 따른 부의 간극수압 감소가 나타나며 점차 하부로 진행하며 습윤전선의 진행을 나타낸다. 일반적으로 심도가 깊어질수록 단위중량의 증가와 간극비가 감소하는 경향을 나타내므로 점차 습윤전선의 진행은 약화되며 상부방향으로 포화도가 증가되는 양상을 나타낸다(김상규 등 1999; 한국과학기술원 2007). 강우강도는 침투특성에 직접적인 영향을 미치게 되는데 지표면으로 침투할 수 있는 한계 강우강도는 포화투수계수의 최대 8배로 나타났다(류지협과 김만식

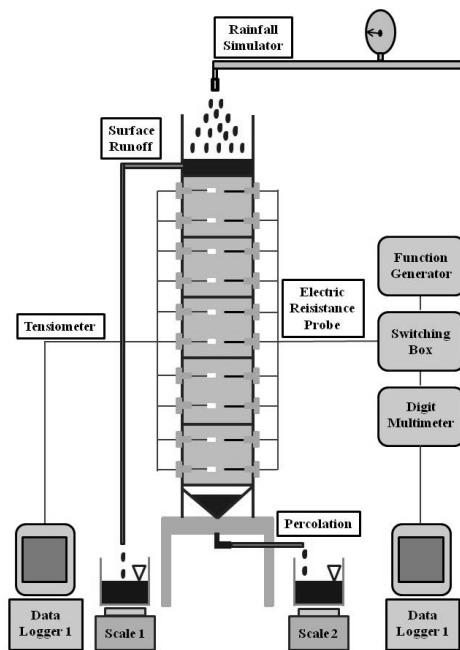
2003). 동일한 지반조건에서 강우강도가 증가하여 단위 시간당 더 많은 강우를 주입할수록 강우 침투속도가 증가하였으며(채병곤 등 2011), 초기 함수비가 높을 경우 모관흡수력 감소에 따른 불포화투수계수의 증가로 초기 함수비가 낮은 경우에 비하여 빠른 침투속도를 보였다(박규보 등 2011).

본 연구에서는 실제 사면에서 얇은 파괴가 주로 발생하는 풍화토층의 시료를 대상으로 강우강도를 달리하여 실내침투실험을 수행함으로써 침투속도의 산정방법에 따른 비교와 침투특성 분석을 하였으며, GEO-SLOPE사의 침투류 수치해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 비교·검증을 수행하였다.

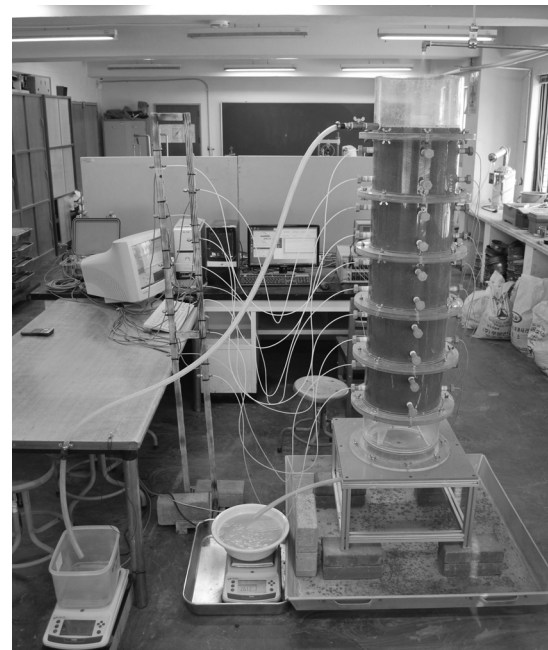
2. 실내 강우침투실험

2.1 실험장치

불포화 지반 내의 강우 침투 특성을 파악하기 위하여 원형 컬럼을 이용한 실내 강우침투실험을 수행하였다. 그림 1은 실내 강우침투실험 개요도와 실험 전경을 나타낸다. 실험시 사용된 컬럼의 높이는 100cm(5 segments)이며, 강우 재현을 위해 사용된 노즐의 제한된 분사범위와 컬럼 내부벽면의 영향을 최소화하기 위하여 28cm의 직경으로 제작되었다. 또한 컬럼 상부 지표면에서 침투

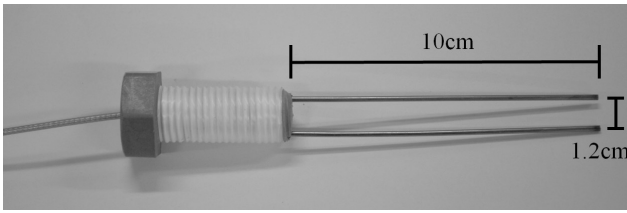


(a) 실험 개요도

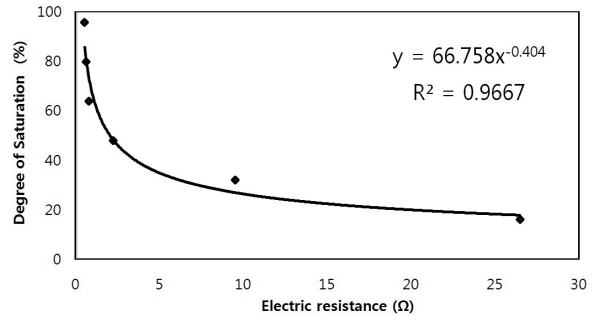


(b) 실험 전경

그림 1. 실내 강우침투실험



(a) 실험 개요도



(b) 실험 전경

그림 2. 포화도 계측 센서

되지 않고 표면유출되는 강우의 유량 측정이 가능하며 컬럼을 통과한 하부 침투유량의 측정이 가능하다. 계측 센서는 컬럼의 벽면을 통하여 원형 단면의 중심부에 위치시켜 정확한 결과를 얻고자 하였으며, 볼트를 이용하여 센서 삽입구의 침투수 누출을 방지하였다. 센서의 연직방향 위치는 컬럼 하부 5cm 높이부터 10cm 간격으로 좌우 각 10개씩 삽입되어 있다.

강우의 침투시 시간에 따른 깊이별 간극수압의 변화와 포화도를 측정하기 위하여 텐시오미터(tensiometer)와 전기저항 탐침봉(electrical resistance probe)을 설치하였다. 본 침투실험에서 사용된 텐시오미터는 Soil moisture사의 Small-tip 텐시오미터(2100F)이며, 몸체에 연결된 얇은 튜브 끝 부분의 세라믹 팁을 통하여 1분 간격으로 깊이별 간극수압을 획득하였다. 깊이별 포화도의 변화를 추정하기 위하여 사용된 전기저항 탐침봉은 크게 스테인리스 강봉과 동축케이블, 강봉을 고정시키는 세라믹 볼트로 구성되어 있다. 흙의 전기저항을 측정하는 탐침봉의 길이는 10cm이고 탐침봉 사이의 측정 간격은 1.2cm이다. 사용된 각각의 탐침봉은 보정을 실시하였으며, 그림 2에 전기저항 탐침봉의 모습과 보정곡선을 나타내었다.

포화도를 추정하기 위한 전기저항의 측정은 AC 전압 발생기에서 일정 전압을 인가하고, 배전 상자(switching box)에서 각 깊이의 탐침봉마다 일정시간 간격으로 인가된 전압을 순차적으로 분배하여 준다. 실험시 배전상자는 전기저항을 동시에 측정함으로써 발생하는 전기적 간섭 효과를 제거하기 위하여 사용되었으며, 각 탐침봉의 전기저항을 측정하여 시간에 따른 깊이별 포화도를 추정한다.

2.2 시료의 물리적 특성

본 침투실험에서 사용된 시료는 석회암 지역에 해당

표 1. 시료의 물리적 특성

기본 물성치	기호	결과
비중	G_s	2.68
균등계수	C_u	5.45
곡률계수	C_g	0.73
통일분류법	U.S.C.S	SP

표 2. 강우 형태

	강우강도 (mm/hr)	강우지속시간 (hr)	총 강우량 (mm)
1	30	12	360
2	60		720
3	80		960

하는 강원도 삼척 지역의 시료가 사용되었다. 시료의 채취시 현장 사면에서 표토층을 제거한 풍화토층을 대상으로 하였으며, No. 4 체를 통과한 시료를 사용하였다.

2.3 실험 방법

침투실험을 위한 준비과정은 먼저 포화도 50%에 해당하는 중량 함수비 15%로 초기 성형을 하였으며, 성형된 시료는 각 20cm 높이의 컬럼을 조립하여 동일한 습윤밀도를($\gamma_t = 16.7kN/m^3$) 가지도록 다짐하였다. 각 컬럼의 조립은 플랜지(flange) 부분에 오링 삽입 후 볼트나 사를 결속하여 침투수의 유출을 방지하였다. 각각의 실험은 깊이별 초기 간극수압 분포양상이 일정하게 수립한 후 강우를 재현하였다. 인공강우의 재현은 수압계이저를 이용하여 강우강도의 조절이 가능하였으며, 12시간 강우지속시간동안 강우강도의 오차범위는 $\pm 5mm/hr$ 로 확인되었다. 본 실험에서 재현된 강우강도와 강우지속시간 및 재현된 총강우량은 표 2에 나타내었다.

3. 강우침투실험 결과

3.1 간극수압과 포화도 변화 양상

텐시오미터와 전기저항 탐침봉을 사용하여 강우 침투에 대한 깊이별 간극수압과 포화도 변화를 시간의 변화에 따라 그림 3, 그림 4에 도식화 하였다. 강우가 지표면으로부터 침투하여 각 깊이의 계측 센서에 도달하게

되면 텐시오미터로 계측되는 부의 간극수압은 감소하며, 전기저항 탐침봉에 의해 측정되는 전기저항 값도 급격히 감소하게 된다. 각 그래프에서 깊이별 초기 값은 시료 성형 후 안정화 상태(일반적으로 12시간 이상 경과 후)에서 간극수압과 포화도의 분포양상이다. 각 강우 강도별 실험 모두 컬럼의 상부영역으로 갈수록 부의 간극수압은 커지며 포화도는 약간 감소하는 것을 볼 수 있다. 각 실험마다 동일한 조건을 갖도록 불포화 풍화토

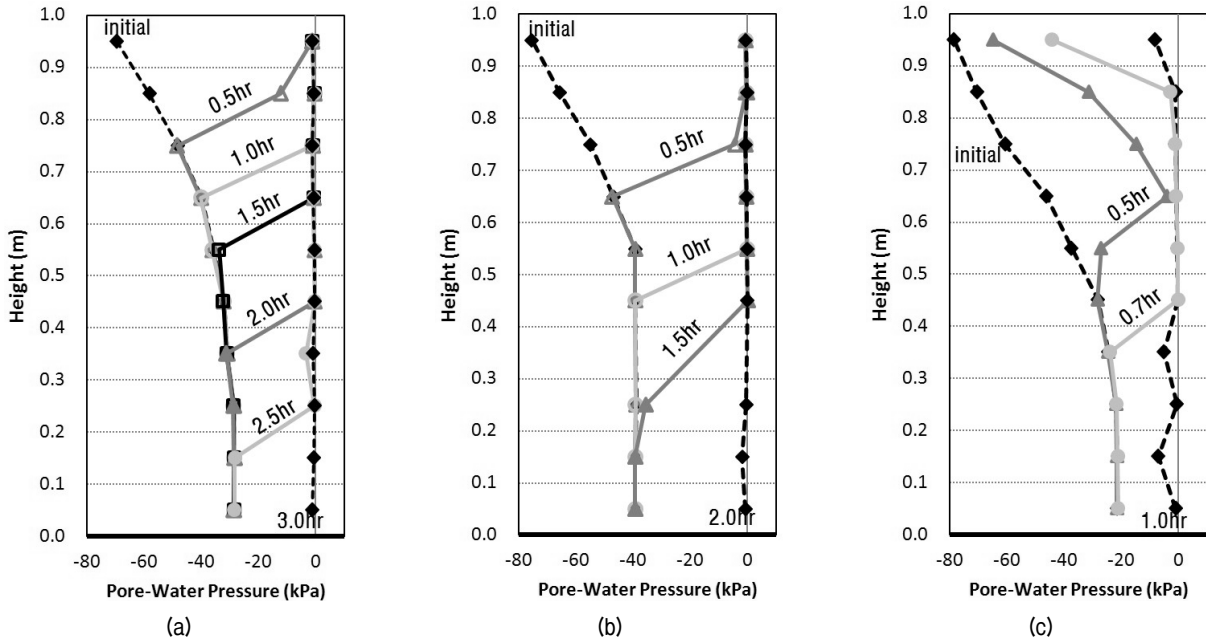


그림 3. 시간에 따른 깊이별 간극수압 변화 (a) 강우강도 30mm/hr인 경우, (b) 강우강도 60mm/hr인 경우, (c) 강우강도 80mm/hr인 경우

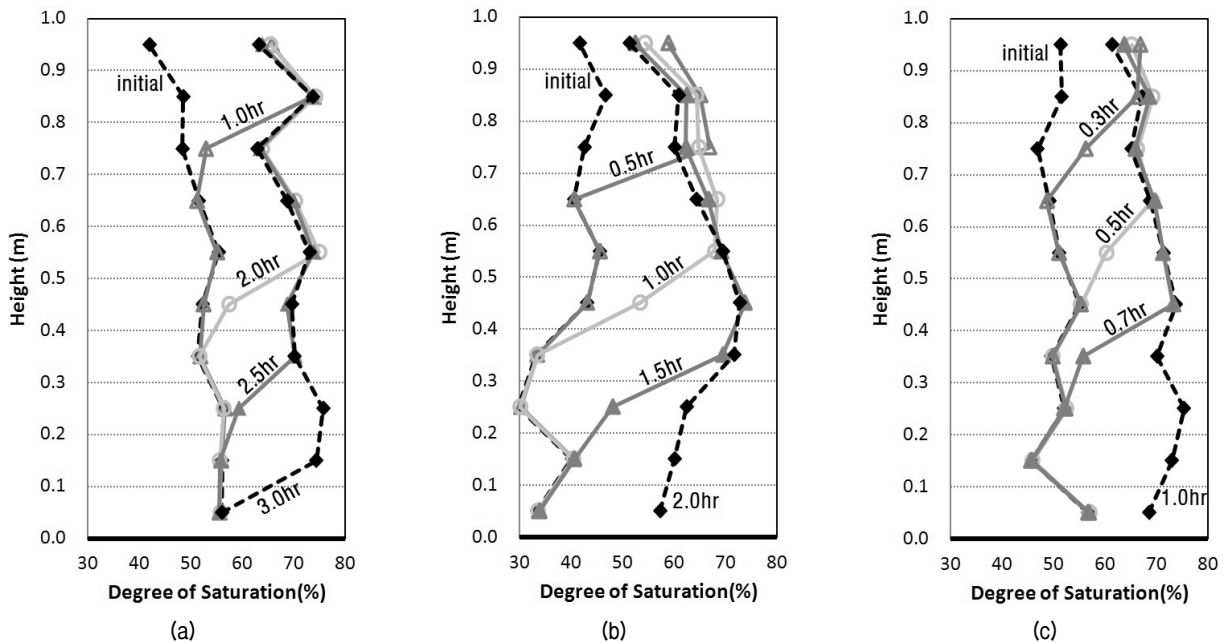


그림 4. 시간에 따른 깊이별 포화도 변화 (a) 강우강도 30mm/hr인 경우, (b) 강우강도 60mm/hr인 경우, (c) 강우강도 80mm/hr인 경우

층을 모사하고자 하였으나 60mm/hr의 강우강도 실험에서 컬럼 하부의 초기 간극수압과 포화도가 다른 실험들에 비하여 다소 초기 함수량이 적게 나타났다.

강우의 재현시 컬럼 상부에서부터 침투가 발생하여 부의 간극수압 감소와 포화도를 증가시키게 된다. 이는 강우에 의한 습윤전선(wetting front)의 하방향 진행을 의미한다. 간극수압의 변화양상은 상부에서부터 부의 간극수압 감소가 하부로 진행하며, 30mm/hr와 60mm/hr의 강우강도에서는 습윤전선의 진행이 비교적 일정하게 진행되는 양상을 보인다. 그러나 80mm/hr의 강우강도 실험은 일정한 진행양상을 보이지 않으며, 습윤전선의 상부에서 부의 간극수압 감소가 느리게 나타났다. 이는 다짐조건에 민감한 컬럼 상부층에서의 불균질한 지층 조건과 간극비가 전 단면에 걸쳐 일정하지 않으므로 투수계수가 큰 불특정한 단면으로 침투가 발생하였을 것으로 판단된다. 또한 불포화 상태인 물-공기-흙의 경계면(interface)에서의 함수량과 모관흡수력의 관계에서 평형상태에 도달하기 위하여 요구되는 시간보다 빠른 강우 침투속도의 영향으로 사료된다.

강우의 침투에 따른 포화도의 변화에서도 상부에서 포화도가 증가하여 하부로 진행되는 양상을 보여준다. 침투 흐름을 해석하기 위하여 제안된 일차원 침투모델인 Green & Ampt 모델과 폰딩을 고려하는 Mein & Larson 모델에서는 침투시 상부로부터 완전 포화되어 습윤전선이 하부로 진행된다고 가정하였다. 하지만 본 실험에서 추정된 깊이별 포화도의 변화는 강우의 침투시 상부로부터 빠르게 증가하며 진행되는 경향을 보이나 습윤전선의 상부는 완전 포화상태보다는 부분 포화상태(대략 70%)로 진행되는 양상을 확인하였다(김상규 등 1999).

3.2 침투유출량

그림 5(a)는 시간에 따라 유입된 강우량과 컬럼을 통과하여 하부로 유출되는 침투유출량을 나타내었다. 강우는 12시간동안 지속되었으며, 강우 종료 이후 유출량은 급격히 줄었으나 컬럼 내부에 존재하는 물의 자중에 의한 영향으로 약간의 유출이 계속 발생하였다. 또한 강우의 침투유출이 처음 발생하는 시간은 간극수압과 포화도의 변화양상에서 습윤전선이 하부에 도달하는 시간과 일치하였다. 인공강우장치에서 재현된 총강우량과 침투유출량과의 차이는 컬럼 내에 잔류되어 있는 유량을 나타내며 강우강도에 대한 잔류 유량은 약 100mm로

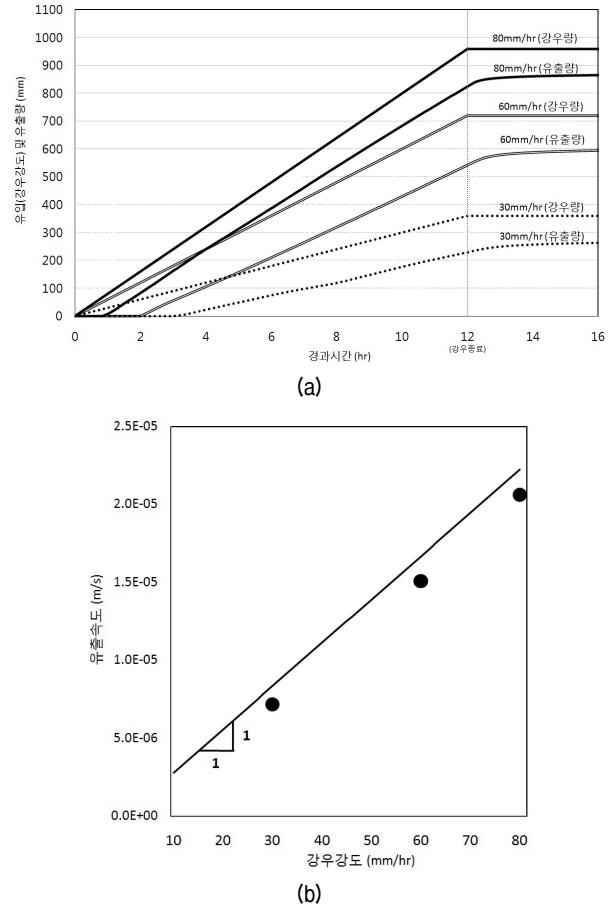


그림 5. 강우강도의 변화에 따른 침투 유출량의 변화 (a) 시간 경과에 따른 누적 강우량과 침투유출량, (b) 강우강도와 유출속도의 상관관계

강우강도에 따른 영향을 받지 않았다.

그림 5(b)는 강우강도와 유출속도(discharge velocity)의 상관관계를 나타냈다. 유출속도는 그림 5(a)의 시간 경과에 따른 누적 유출량의 기울기로부터 산정하였으며, 유출속도는 강우강도에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 유출속도와 강우강도의 비는 0.9 정도로 기존의 Stone 등(2008)의 실험결과(약 0.75)보다 다소 큰 값을 보였다. 유출속도비는 지반의 수리특성과 밀접한 관련이 있으며 이에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 강우침투 수치해석

4.1 수치해석 개요

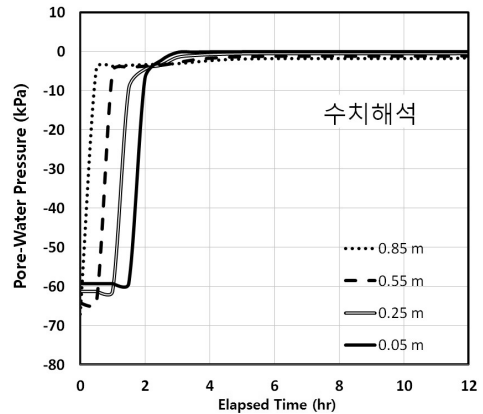
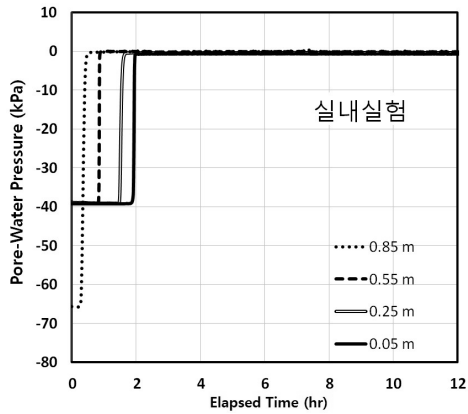
실내 강우침투실험 결과의 검증을 위하여 수치해석 프로그램인 GEO-SLOPE사의 SEEP/W를 사용하였으며, 해석단면은 실내모형컬럼과 동일한 높이 100cm와 폭

28cm을 사용하였다. 수치해석의 초기 간극수압의 분포는 컬럼 하부에서 60kPa, 컬럼의 상부 지표면에서는 70kPa의 선형적인 분포를 갖는 것으로 가정하였다. 침투 해석에서 수리학적 물성치로 포화투수계(2.35×10^{-5} m/s), 함수특성곡선($\theta_w = C_\psi \frac{\theta_s}{\ln[e + (\Psi/a)^n]^m}$, $a=2.9893$, $n=3.8329$, $m=0.50764$), 그리고 Fredlund & Xing의 추정식을 이용한 불포화 투수계수를 사용하였다. 경계조건은 컬럼의

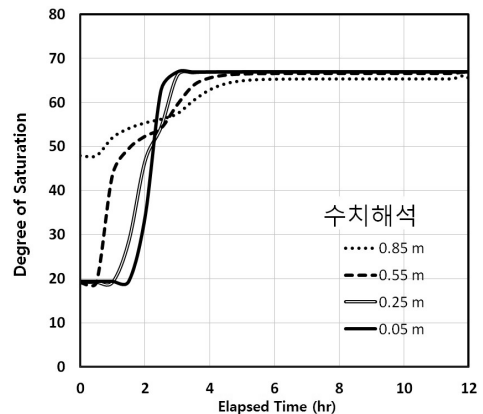
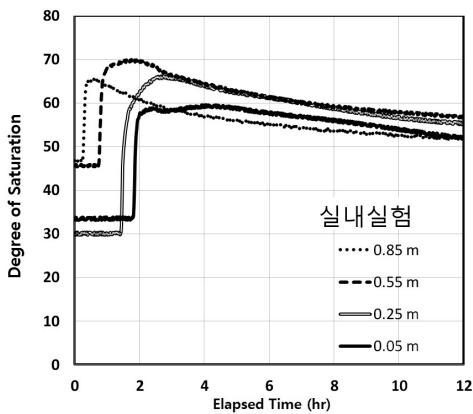
벽면은 불투수층으로 가정하고 지표면에 각 적용 강우 강도를 재현하여 실험조건과 동일하게 재현하였다.

4.2 수치해석과 실험결과 비교

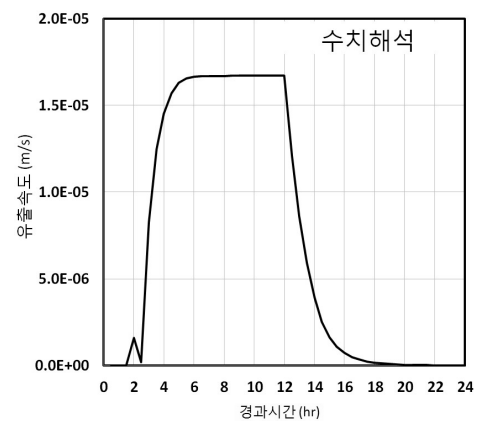
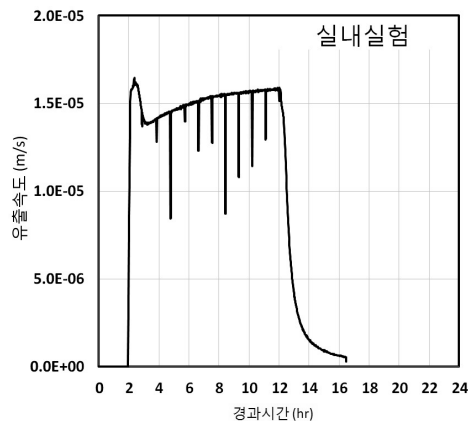
강우강도 60mm/hr에 대한 실내실험결과와 수치해석 결과를 그림 6에 나타내었다. 간극수압의 변화에 따른 습윤전선의 진행은 실내실험과 수치해석에서 비교적



(a)



(b)



(c)

그림 6. 강우강도 60mm/hr에 대한 실내실험과 수치해석 결과의 비교 (a) 간극수압의 변화, (b) 포화도의 변화, (c) 유출속도의 변화

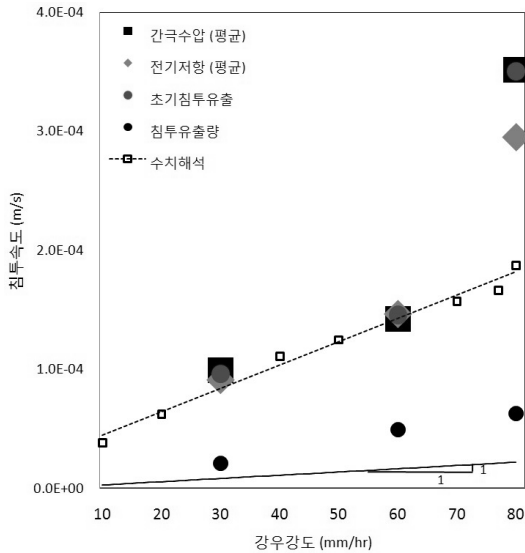


그림 7. 강우강도에 따른 침투속도의 변화

잘 일치하며, 수치해석의 결과에서 0의 간극수압에 도달하지 않는 것은 그림 6(b)의 포화도의 결과에서 강우 침투시 부분적으로 포화되었기 때문이다. 실내실험의 간극률을 이용하여 추정된 시간에 따른 포화도의 변화는 실내실험과 수치해석 모두 약 70%의 포화도를 보여 준다. 그림 6(c)는 컬럼을 통과한 유량으로 산정한 유출 속도(discharge velocity)로 실내실험과 수치해석의 결과는 비슷한 값을 보여주었다.

5. 강우강도에 따른 침투속도의 비교·분석

그림 7은 강우강도에 따른 침투속도(seepage velocity)의 변화를 나타내기 위하여 실내 강우침투실험에서 산정한 침투속도와 수치해석으로부터 구한 침투속도를 나타내었다. 간극수압과 전기저항의 변화에 의한 침투속도 산정은 10cm 간격으로 설치된 계측센서의 구간별 침투속도이며, 초기 침투유출에 의한 침투속도는 컬럼 하부에서 첫 유출이 발생한 시점으로부터 산정하였다. 그러나 침투유출량에 의한 침투속도는 컬럼 전 단면을 통과하여 나오는 유출속도이므로 식($V_s = V / (n \cdot S)$)를 이용하여 침투속도를 계산하였다.

강우강도의 증가에 따라 침투속도가 증가하는 경향을 보였으며, 실내실험과 수치해석의 침투속도는 30mm/hr, 60mm/hr 강우강도에서 좋은 결과를 보여주었다. 다만, 80mm/hr의 강우강도에서는 실내실험의 침투속도가 수치해석 결과에 비하여 비교적 빠르게 나타났다. 이는 주어진 유입유량이 물-흙-공기의 평형상태에 도달하기 위

한 시간보다 빨리 동일한 음의 간극수압 상태에서 포화도 증가에 의한 불포화 투수계수가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 강우강도가 흙의 포화 투수계수에 접근할수록 뚜렷해지고, 강우강도가 지반의 포화 투수계수에 도달하면 표면유출(runoff)이 발생하게 된다.

강우가 지속되는 동안 컬럼 하부로 유출되는 유출량으로 구한 침투속도는 다른 방법으로 산정된 침투속도에 비하여 낮게 산정되었다. 이것은 그림 6(c)의 유출속도의 비교에서 수치해석과 실내실험의 결과가 잘 일치하는 것으로 보아 유출속도를 침투속도로 나타냄에 있어서 강우의 침투에 따른 흙의 간극률의 변화가 고려되지 않았기 때문으로 판단된다.

6. 결론

강우로 인한 사면붕괴는 매년 여름철에 집중되며 많은 인명과 재산 피해를 야기시킨다. 또한 이상기후로 인하여 강우의 형태가 집중적, 국지적으로 나타나는바 사면 안정에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 풍화토층을 대상으로 실내 강우침투실험을 수행함으로써 사면 안정성 해석에 있어서 중요한 요인인 강우강도에 따른 지반 내의 강우 침투속도 산정 및 침투특성을 파악하고 수치해석을 이용한 침투해석 결과와 비교 및 검증을 수행하였다.

- (1) 침투속도의 산정을 위한 방법으로는 강우의 침투시 깊이별 계측센서의 변화시간을 이용한 침투속도, 강우의 시작시간과 침투유출이 처음 발생한 시간을 이용한 침투속도, 컬럼을 통과하여 유출되는 시간당 유출량으로부터 산정한 침투속도와 수치해석 결과에 의한 침투속도를 비교하였다. 각 방법으로 산정된 침투속도는 비교적 잘 일치하며, 강우강도의 증가에 따라 침투속도가 거의 선형적으로 증가함을 보였다. 그러나 컬럼 하부의 시간당 유출량으로 산정된 침투속도는 강우의 침투에 따른 간극비 변화가 적절히 고려되지 않아 다소 낮은 침투속도를 보여주었다.
- (2) 강우 침투시 포화도의 변화양상으로 습윤전선의 상부는 완전 포화상태가 아닌 부분 포화상태로 진행됨을 보였다. 따라서 완전포화로 가정하는 침투 이론식에 비하여 실제 지반에서의 습윤전선은 빠르게

진행하여 사면의 불안정을 초래할 것으로 판단된다.

향후 지역별 또는 특성별 풍화토층을 대상으로 강우의 침투특성 분석에 대한 자료를 축적하여 강우시 사면 붕괴에 대한 예·경보 시스템 구축이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 일반연구자 지원사업(과제번호 2011-0338)의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 류지협, 김동현 (1999), “불포화 풍화토의 침투 특성”, *대한토목학회 논문집*, 제19권 제III-5호, pp.995-1002.
2. 류지협, 김만식 (2003), “강우시 자연사면의 사면재해 발생기구”, *환경관리학회지*, 제9권 제1호, pp.85-94.
3. 박규보, 채병곤, 박혁진 (2011), “불포화도 칼럼시험을 통한 연속 강우와 반복강우의 강우침투속도 분석”, *대한지질공학회지*, 제21권 제2호, pp.133-145.
4. 조성은, 이승래 (2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제16권 제5호, pp.107-116.

5. 한국과학기술원 (2007), *불포화 사면 및 다짐지반 최적화 표준설계를 위한 지반정수 산정기술 연구보고서*, 건설기술혁신사업 최종보고서, 건설교통부, pp.154-179.
6. 박덕근, 오정립, 손영진, 이민석 (2008), “2008년 집중호우로 발생된 급경사지 재해 사례분석 및 방재대책”, *대한토목학회 정기 학술대회*, pp.3011-3014.
7. 채병곤, 김만일 (2011), “인공강우 칼럼시험을 통한 풍화도 특성별 강우침투속도 분석”, *한국지반공학회 분학술발표회*, pp.608-616.
8. 최영은, 민승기, 남경엽, 권원태 (2002), “남부지방 일강수량과 호우의 경향분석”, *한국기상학회 학술발표회*, 제12권 제1호, pp.192-195.
9. 김재홍 (2002), *강우시 불포화 풍화토의 습윤에 의한 무한사면 안정해석*, 석사학위논문, 연세대학교.
10. Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911), “Study on soil physics”, *Journal of Agricultural Science*, Vol.4, No.1, pp.1-24.
11. Mein, R. G. and Larson, C. L. (1973), “Modelling infiltration during a steady rain”, *Water Resource Research*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
12. 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.
13. Stone, J. J., Paige, G. B., and Hawkins, R. H. (2008), “Rainfall intensity dependent infiltration rates on rangeland rainfall simulator plots”, *Transactions of the ASABE*, Vol.51, No.1, pp.45-53.
14. Geo-slope (2004), *Seepage Modeling with SEEP/W*, GEO-SLOPE International, Ltd., Canada.

(접수일자 2012. 1. 6, 심사완료일 2012. 2. 16)