The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169
Vol. 28, No. 3, September, 2018, pp. 489-499
https://doi.org/10.9720/kseg.2018.3.489

RESEARCH ARTICLE

토조실험 장치를 이용한 토사비탈면 표층거동 특성 연구

석재욱[1] · 박성용[2*] · 나건하[2] · 강효섭[1]

[1]국립재난안전연구원 방재연구실 지반재난실험팀, 시설연구사
[2]국립재난안전연구원 방재연구실 지반재난실험팀, 연구원

A Study for Characterization on Shallow Behavior of Soil Slope by Flume Experiments

Jae-wook Suk[1] · Sung-Yong Park[2*] · Geon-ha Na[2] · Hyo-Sub Kang[1]

[1]Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute, Senior Researcher
[2]Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute, Researcher

Abstract

A flume experiments was used to study the characteristics of the surface displacements and volumetric water contents (VWC) during torrential rain. The surface displacement and VWC of the granite weathered soil were measured for rainfall intensity (100, 200 mm/hr) and initial ground condition (VWC 7, 14, 26%). The test processes were also recorded by video cameras. According to the test results, The shallow failure is classified into three types: retrogressive failure, progressive failure and defined failure. In the case of retrogressive failure and progressive failure, relatively large damage could occur due to the feature that soil is deposited to the bottom of the slope. the shallow failure occurred when the VWC reached a certain value regardless of the initial soil condition. It was found that the shallow failure can be predicted through the increase patton of the VWC under the condition of the ground dry condition (VWC 7%) and the natural condition (VWC 14%). For high rainfall intensity, progressive failure predominated, and rainfall intensity above a certain level did not affect wetting front transition.

Keywords: steep slope, flume test, shallow failure, surface displacement, water volumetric content

초 록

본 연구에서는 급경사지 모형토조 실험을 통해 집중강우에 의한 표층거동 특성 및 체적함수비 변화 특성을 분석하였다. 화강암 풍화토를 대상으로 강우강도(100, 200 mm/hr) 및 초기 지반상태(VWC 7, 14, 26%) 조건에 대한 지표변위 및 체적함수비를 측정하고 영상분석을 위해 실험 전 과정을 비디오 카메라로 촬영하였다. 실험결과 표층붕괴는 후퇴성 붕괴, 전진형 붕괴, 국지적 붕괴의 세가지 형태가 주를 이루며, 후퇴성 붕괴와 전진형 붕괴의 경우 토사가 비탈면 하부까지 퇴적되는 특징으로 인해 상대적으로 큰 피해가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 체적함수비는 초기 조건에 관계없이 일정한 값에서 붕괴가 발생하였으며 건기 시의 지반 조건과 자연상태 조건에서는 체적함수비 증가양상을 통해 표층붕괴를 예측 가능한 것으로 나타났다. 강우강도가 큰 경우에 전진형 붕괴가 우세하였으며, 일정 수준이상의 강우강도는 습윤전선 전이에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

주요어: 급경사지, 토조실험, 표층붕괴, 표면변위, 체적함수비

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Sung-Yong Park
E-mail: psy1217@korea.kr

Received: 6 September, 2018
Revised: 11 September, 2018
Accepted: 17 September, 2018

Ⓒ 2018 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/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

산지가 많은 우리나라의 지형 특성으로 인해 도심지를 비롯한 주거지 주변에는 많은 인공·자연 비탈면이 분포하고 있으며 국내 비탈면 재해현황 조사결과에 따르면 도심지의 경우 집중호우에 의한 재해발생 빈도가 점차 증가하는 것으로 나타났다(Kim et al., 2013). 우리나라의 경우 매년 6-9월 극한강우에 의해 산사태가 발생하며 주로 비탈면과 평행하게 발달한 2 m 이하의 얕은 표층파괴(shallow failure)의 특징을 갖는다(Kim et al., 2004; Cho and Lee, 2000; Song, 2013). “급경사지 재해예방에 관한 법률”에 의해 관리되는 전체 급경사지 14,000여개소 중 주택 인근에 분포하는 급경사지 1,987개소는 토사비탈면 56% (1108개소)과 암반비탈면 8% (167개소)로 구성되어 있으며 급경사지 붕괴위험지구 약 1674개소 중 토사 비탈면 비율이 43%를 차지하고 있어 집중강우에 의한 토사비탈면의 표층붕괴 위험에 노출되어 있다(Ministry of Public Safety and Security, 2016). 토사비탈면의 유지관리 및 강우에 의한 피해예방을 위해서는 지표면 토사 거동 및 불포화토 특성을 정확히 파악할 필요가 있다.

지금까지 여러 연구자들에 의해 비탈면의 표층붕괴 거동에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 대부분의 연구는 강우에 의한 불포화토의 포화심도, 모관흡수력, 체적함수비 변화 등 재료속성 변화에 따른 거동 특성을 규명하는데 중점을 두고 있다(Acharya et al., 2009; Olivares and Damiano, 2007; Sasahara, 2017; Wang and Sassa, 2001, 2003). 또한 지반의 다양한 조건을 재현하고 반복 실험할 수 있는 모형토조 실험을 통해 강우침투에 의해 나타나는 산사태 발생특성 및 지반재료의 변화특성에 관한 연구가 진행되어 왔다. 이를 통해 최근에는 표층의 체적함수비 변화가 산사태 발생을 지시하는 전조현상으로서의 역할을 할 수 있는 것으로 나타났다(Seo et al., 2017; Chae and Kim, 2012). 이러한 연구는 주로 자연사면에서 발생하는 산사태를 대상으로 한 결과이나 위에서 언급한 급경사지 내 토사비탈면의 표층붕괴 분석에도 충분히 활용성이 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 강우에 의한 토사비탈면의 표층붕괴 발생시 전조현상으로서의 체적함수비 활용성을 검토하기 위해 체적함수비 변화에 따른 지표거동 특성을 분석하여 토사비탈면의 표층붕괴를 예측할 수 있는 계측기준 설정의 기초자료로 활용하고자 하였다. 이를 위해 실내 모형토조 장치를 이용하여 집중강우 시 발생하는 지표면 변위, 표층 체적함수비, 붕괴 형태를 분석하였다.

모형토조 실험장치 구성

본 연구에서는 토사비탈면의 표층붕괴를 모사할 수 있는 모형실험장치를 제작하였다. 모형실험장치는 크게 시뮬레이터, 강우재현장치, 그리고 계측장치로 구성되어 있다(Fig. 1).

시뮬레이터는 내부에 토사를 이용하여 모형 비탈면을 조성하는 부분으로 총길이 2.1 m, 높이 0.5 m, 폭 0.4 m로 제작하였으며, 자동 콘트롤러 및 유압식 실린더를 통해 0~40° 범위로 경사를 조절하여 지반형상을 자유롭게 모사할 수 있도록 하였다. 시뮬레이터의 측면은 강우사상에 따른 급경사지의 거동을 육안으로 확인할 수 있도록 투명창으로 제작하고, 시뮬레이터 정면에는 실험 전 과정을 촬영하기 위해 영상카메라를 설치하였다.

강우재현장치는 살수장치와 강우조절 장치로 구성된다. 살수장치는 총 5개의 노즐로 구성되어 실험조건에 따라 위치변경이 가능하다. 강우조건에 따라 노즐의 교체를 통하여 강우강도를 10~200 mm/hr 범위에서 조절할 수 있다. 강우조절장치는 살수장치에 공급되는 유량을 조절할 수 있도록 구성하였다. 살수장치에 설치된 노즐은 낙수에 의해 토사가 세굴되지 않도록 박무(mist) 형태로 인공강우가 살포되도록 하였다.

계측장치는 강우에 의한 지반재료의 변화를 관찰하기 위해 지표변위계와 체적함수비계를 사용하였다. 최적의 계측기 설치 위치를 결정하기 위해 강우강도 100 mm/hr 조건에서 발생하는 표층붕괴의 위치를 파악하는 예비시험을 실시하였다. 그 결과에 따라 유효한 변위가 발생하는 두 지점을 선정하고 지표변위계 설치심도를 결정하였다. 예비실험 중 토층에 매설된 계측기 케이블로 인해 붕괴거동이 억제되는 현상이 관찰되어 이를 방지하기 위해 Fig. 1과 같이 표층붕괴 거동이 원활하게 발생할 수 있도록 계측기기 수량을 단순화하였다.

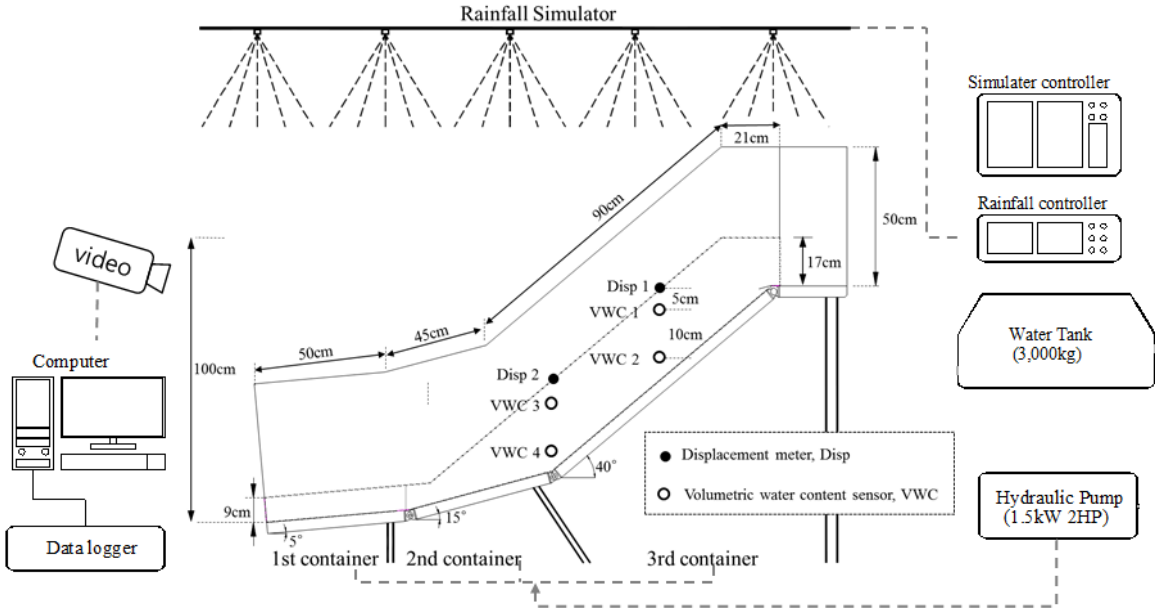


Fig. 1. Schematic diagram illustrating experimental set up with soil profiles.

실험조건 및 실험방법

국내 자연비탈면의 대부분은 화강암 풍화토, 편마암 풍화토 등으로 지속적인 강우에 의해 얕은 파괴가 발생하고(Cho and Lee, 2000) 특히, 화강암 지역은 노두가 거의 없고 풍화심도가 고르게 분포하여 소규모의 슬라이드가 우세하여 우리나라 산사태는 다른 암석에 비하여 화강암 풍화대와 더 많이 연관되어 있다(Kim et al., 2013). 1990년 이후 총 3,435개 산사태 발생현황을 보면 화강암이 다른 암석에 비해 산사태에 보다 취약한 것으로 나타났다(Kim and Chae, 2009). 본 연구에서는 위 연구결과에 근거하여 화강풍화토를 사용하여 모형실험의 지반을 조성하였다. 비탈면 조성에 사용된 화강풍화토의 속성은 Table 1과 같다.

비탈면 단면은 2017년 청주 산사태 지역 현장조사를 통해 확보한 지형정보를 사용하여 경사각 40°로 결정하였다. 비교적 높은 경사의 비탈면을 조성하기 위해 토조 내 비탈면 형상을 6개 층으로 구분하고 각 층에 대해 현장 들밀도실험 및 실내 시험을 통해 측정된 밀도(1.6 g/cm^3) 및 중량함수비(12%)가 유지되도록 하였다. 이 때 함수비는 6개 다짐층에 대한 각각의 토사 무게와 물의 무게를 산정하여 재현하였으며 토사는 하루동안 건조로에서 완전건조시킨 후 사용하였다. 구축된 비탈면에서 측정된 체적함수비는 14~16% 수준으로 나타났으며 이를 현장 조건의 체적함수비로 사용하였다.

이 연구에서는 비탈면 표층의 초기 체적함수비를 건기시 조건, 현장조건, 그리고 선행강우가 있는 조건에서 집중강우에 의한 거동을 고찰하기 위해 초기 체적함수비를 각각 약 7%, 16% 그리고 30%으로 구분하였다. 또한 극한강우 조건에

대한 결과 비교를 위해 강우강도 100 mm/hr와 200 mm/hr 조건을 사용하였다(Seo et al., 2017).

토조실험의 특성상 표층붕괴 특성이 일정하게 발생하지 않는다는 점을 고려해 같은 조건에서 3회 반복 실험을 실시하였다(Table 2).

Table 1. Physical porperties of the weathered granite soil in this study

Property	Value
Specific gravity (-)	2.60
Natural water content (%)	18.95
Dry density (t/m^3)	1.67
USCS (-)	SP
Coef. of permeability (cm/sec)	4.42×10^{-3}
Effective particle size (D_{10})	0.16
Liquid Limit (%)	22.56
Plastic Limit (%)	18.92
Uniformity coefficient (C_u)	9.38
Coef. of curvature (C_g)	0.84

Table 2. Conditions of flume test for shallow failure

Ground Condition	Initial VWC	Rainfall intensity (mm/hr)	No. of test	Type of Failure		
				1st	2nd	3rd
In situ	14~16%	100	3	Retrogressive	Confined	Retrogressive
		200	3	Progressive	Progressive	Progressive
Antecedent rainfall	30%	100	3	Progressive	Progressive	Progressive
Dry season	7~8%	100	3	Retrogressive	Retrogressive	Retrogressive

실험 결과 및 토의

표층 붕괴 특성

집중강우에 의한 표층붕괴 형태 특성을 살펴보았다. 촬영된 영상을 분석하여 붕괴형태를 파악하였으며, 총 12회 실험을 통해 나타난 붕괴형태를 Cruden and Varnes (1996)이 제시한 산사태 유형에 따라 3가지로 구분하였다. 가장 많은 빈도의 유형은 이미 기존의 많은 연구자들에 의해 언급된 후퇴성 붕괴(retrogressive collapse)로 강우로 인해 비탈면 하부(Toe)부터 붕괴되기 시작해서 점차 상부로 확대되어 가는 현상이다(Kim and Chae, 2009, Wang and Sassa, 2003, Trelien, 1997). 선행강우가 없거나, 건기시 지반 조건인 경우에 우세하게 관찰되었다.

선행강우가 있는 경우에는 비탈면 표층 전체 혹은 비교적 넓은 면적의 지반이 미끄러져 내리는 전진형 붕괴(progressive collapse)가 주로 나타났다. 이 때 붕괴가 발생하기 전에는 정상부(crest part)에서 이동방향과 수직인 방향으로 뚜렷한 인장균열이 발생하는 특징을 가지고 있다.

강우강도 100 mm/hr 조건에서는 비탈면의 상부와 하부에서 국부적인 표층붕괴(confined collapse)가 발생하기도 했는데 높은 강우강도에 의해 지표수 유출(runoff)이 활발하여 선단부(toe part)에서 발달한 세굴로 인해 표층붕괴가 발달할 수 있는 면적이 감소하는 반면 상부에서는 충분히 표층붕괴가 발생할 수 있는 심도까지 지반이 포화되는 시점에 붕괴가 발생

하는 형태이다. 후퇴성 붕괴와 전진 붕괴에 의한 토사가 비탈면 하부까지 충분히 이동한 반면 마지막 붕괴형태의 경우 붕괴된 토사가 비탈면 내에서 퇴적되는 특징을 나타냈다.

붕괴형태별 표면변위 거동 특성을 보면 후퇴성 붕괴는 선단부에서 붕괴 변위가 발생한 후 순차적으로 정상부에서 변위가 관찰되었으며, 이 때 변위는 급작스럽게 증가하는 특성을 보였다(Fig. 2a). 전진 붕괴의 경우 비탈면 전 구간에서 변위가 증가하기 시작해서 최종 붕괴가 발생할 때 큰 변위가 발생하는 크립(creep) 거동을 나타내었다(Fig. 2b). 국지적인 거동의 경우는 세굴에 의한 표층의 유실로 인해 변위계의 변화가 나타났으며 최종 붕괴에 이르기까지 점진적인 거동을 보였다(Fig. 2c).

실험조건에 따라 위에서 언급한 붕괴형태가 우세하게 나타나긴 했으나 실험조건에 따라 확연히 구분되지는 않았다. 표층수에 의한 지표면 세굴 현상이 붕괴형태에 많은 영향을 줄 수 있는데 매우 높은 강우강도 조건에서는 표층의 지형(topography)에 따라 세굴의 형태나 규모가 매우 민감하기 때문에 실험별 조성된 토조의 지형 조건을 동일하게 하지 못한 결과로 판단된다.

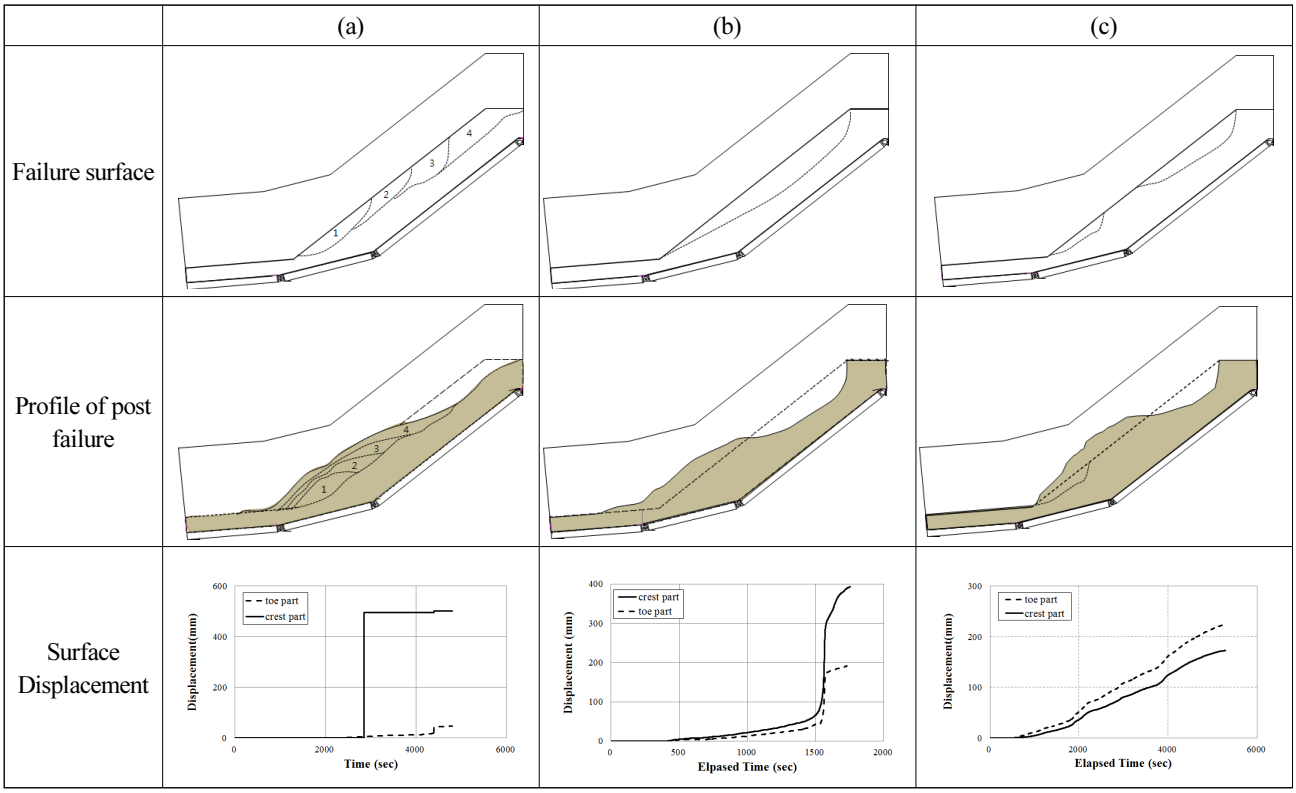


Fig. 2. Summary of failure mode of shallow failure. (a)Retrogressive failure (b)Progressive failure (c)Confined failure.

지표변위 거동 특성

지반재료의 함수 변화 특성에 따른 표층 거동을 분석하기 위해 지표변위와 함께 체적함수비(Volumetric water content, VWC)의 변화를 살펴보았다. 강우에 의한 표층 함수비 변화와 표층변위의 예를 Fig. 3에 도시하였다. 강우강도 100 mm/hr 조건에서 VWC-1 (초기 14%)은 176초부터 증가해서 539초부터 체적함수비 22% 수준을 유지한 후 1000초부터 다시 증가해서 최대 39.8%까지 증가하였다. VWC-1에 위치한 지표변위계 Disp-1은 1000초부터 점진적으로 증가하기 시작했

다. 실험영상 분석 결과 해당 시점에 인장균열이 발달하기 시작한 것으로 보아 이로 인해 발생한 변위로 판단된다. 비탈면 심부에 설치된 VWC-2 (초기 13%)는 800초부터 1587초까지 지속적으로 증가해서 최대 33.7%까지 증가하였다. 이는 비탈면 심부까지 포화가 충분히 진행된 것을 의미하며 이로 인해 비탈면 전 구간에서는 전진형 붕괴가 발생하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 초기에 강우에 의해 체적함수비가 증가하는 동안 변위는 발생하지 않으나 강우에 의해 표층이 포화되어 체적함수비가 일정수준(22%)까지 상승 후 유지되는 상태에서 인장균열이 발생하고, 이후 시간이 지남에 따라 체적함수비가 재차 급격히 증가하는 시점에 표층붕괴가 발생하는 양상으로 보아 이는 표층붕괴를 야기하는 변위가 발생하기 전, 체적함수비의 변화가 전조현상으로서의 역할을 할 수 있음을 의미한다(Chae and Kim, 2012).

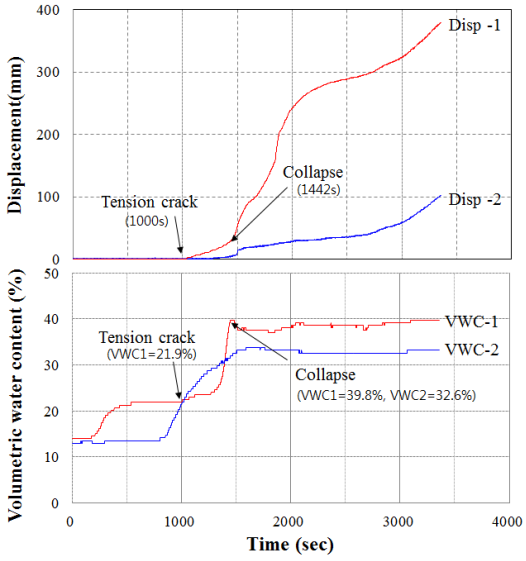


Fig. 3. Example of time variation of the surface displacement and volumetric water content in the slope (rainfall intensity 100 mm/hr).

체적함수비 초기조건에 따른 거동특성

비탈면 표층부의 체적함수비 초기 조건에 따른 거동을 분석하였다. 자연상태 조건(VWC 14~16%), 건기시 지반 조건(VWC 7~8%), 선행강우에 의해 비탈면 표층이 일부 포화되어 있는 조건(VWC 30~32%)을 설정한 후 집중강우에 의한 표층 변위를 관찰하였다(Fig. 4). 선행강우 조건을 재현하기 위해 초기체적함수비가 약 30% 인 수준까지 표층을 포화시킨 후 체적함수비를 안정화시키기 위해 24시간 후 실험을 수행하였다.

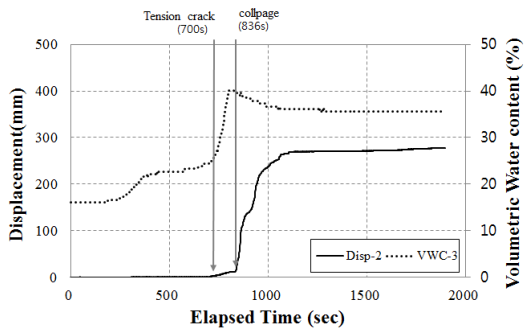
자연상태 조건의 경우 강우에 의한 표층의 체적함수비가 약 25% 수준까지 증가한 후 인장균열이 관찰되었다. 이후 체적함수비의 증가속도가 급격하게 높아지면서 정점(40% 수준)에 이르렀을 때 붕괴가 발생하는 양상을 보여 붕괴 전 체적함수비 변화에 따라 지표거동 발생을 추정할 수 있는 것으로 판단된다.

건기시 지반조건의 경우 강우에 의해 체적함수비가 19% 수준까지 급격히 증가한 후 인장균열이 발생하였으며 이후 붕괴가 발생하는 시점까지 지속적으로 증가하였다. 표층 변위는 계측되지 않다가 체적함수비가 37% 수준일 때 급작스런 변위와 함께 최종 붕괴가 발생하였다. 자연상태 조건과 비교해서 체적함수비의 뚜렷한 변화는 없지만 인장균열 및 최종붕괴가 발생하는 시점에서의 변화는 관찰되었다.

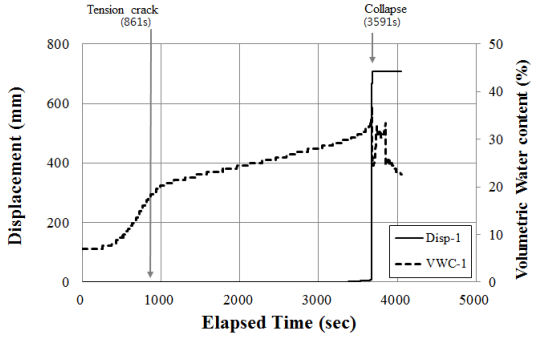
선행강우 조건에서의 체적함수비는 다른 두 경우와 달리 점진적으로 상승했으며, 인장균열이 발생하는 시점에서도 체

적함수비의 급격한 변화는 관찰되지 않았다. 표층변위는 크립거동 형태의 점진적인 변화가 관찰되었으며 체적함수비가 약 40% 수준일 때 급격한 변위와 함께 붕괴가 발생하였다.

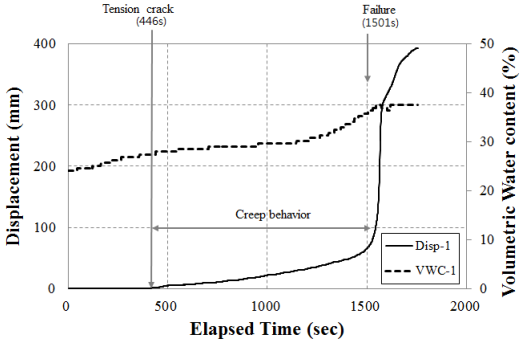
세 경우 모두 붕괴가 발생한 시점에서의 체적함수비가 각각 40, 37, 40% 수준으로 일정 수준의 체적함수비에 도달한 후 붕괴가 발생하였다. 이는 초기 체적함수비가 달라도 표층붕괴가 발생하기 위해서는 일정 수준의 체적함수비가 되어야 붕괴가 발생한다는 것을 의미하며, 이 때 붕괴에 이르기까지의 체적함수비 변화 양상은 초기함수비 조건에 따라 다를 수 있다는 것을 의미한다. 실험결과에 의하면 자연상태 및 건기시 지반 조건에서는 체적함수비의 변화 양상에 따라 표층변위가 발생하는 시점 및 붕괴시점을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 선행강우로 인해 지반이 포화된 경우에는 체적함수비의 변화를 통해 표층거동을 예측하기는 어려운 것으로 판단된다.



(a) In-situ condition, VWC=14%



(b) dry season condition, VWC=7%



(c) Antecedent rainfall condition, VWC=30%

Fig. 4. Time variations of the surface displacement and volumetric water content according to initial ground condition (rainfall intensity 100 mm/hr).

강우강도에 의한 체적함수비 변화

강우강도 크기에 따른 표층 거동을 분석하기 위해 자연상태 지반에 대하여 강우강도 100 mm/hr와 200 mm/hr 조건에서의 체적함수비와 붕괴양상을 비교·검토하였다.

강우조건별 표층의 체적함수비 변화 양상을 Fig. 5에 도시하였다. 강우강도가 높을수록 붕괴 시간은 빠를 것으로 예상한 것과는 달리 강우강도 크기에 따른 파괴시간은 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 강우강도 200 mm/hr에서 인장균열 발생시간이 다소 빨랐으나 최종적으로 붕괴가 발생한 시간은 100 mm/hr의 경우와 거의 비슷했다.

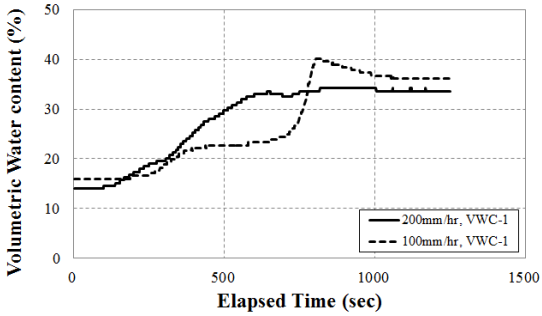


Fig. 5. Time variations of the volumetric water content dependent on rainfall intensity: 100 mm/hr and 200 mm/hr.

표층붕괴가 발생한 전·후 비탈면의 포화정도를 확인하기 위해 실험 중 사진촬영으로 토조 측면을 통해 습윤전선(wetting front) 변화를 관찰하고, 붕괴 후 정상부(crest part), 사면부(slope part), 선단부(toe part) 위치의 표층부과 기저부의 체적함수비를 직접 측정하였다(Fig. 6). 붕괴가 발생한 표층에서는 교란에 의해 약 40~48% 수준으로 높은 범위의 체적함수비가 측정되었으며, 교란되지 않은 상태에서 포화된 지반의 경우 35% 수준의 체적함수가 측정되었다. 육안상 습윤전선 경계 하부에는 포화가 되지 않은 토층으로 초기 설정한 체적함수비를 유지하였다.

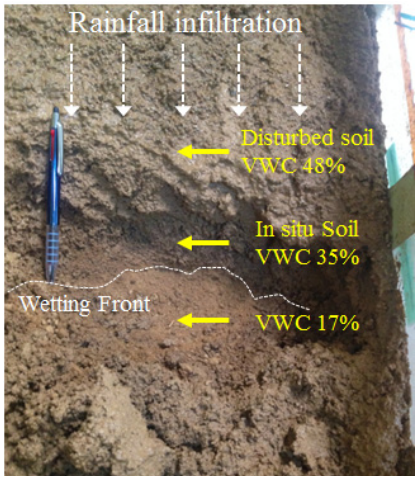
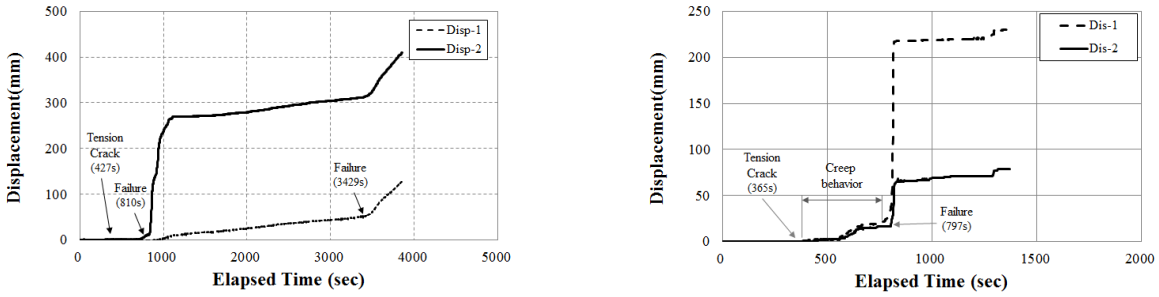


Fig. 6. Change of volumetric water content by depth.

강우에 의해 표층이 포화되고 습윤전선은 점차 기저면으로 확산되어 표층붕괴가 유발될 정도의 깊이에 이르렀을 때 전단강도와 점착력의 감소 등 흙의 역학적 특성변화로 인해 붕괴가 발생한다(Abramson et al., 1996; Sun et al., 1998; Huang et al., 2009).

강우강도 100 mm/hr의 경우 강우에 의해 선단부부터 세굴이 발생하고, 점차 정상부 방향으로 확산되어 가면서 붕괴되는 후퇴성 붕괴가 발생하거나 사면부에서 발달한 인장균열로 인해 국지적인 붕괴가 나타났다(Fig. 7a).

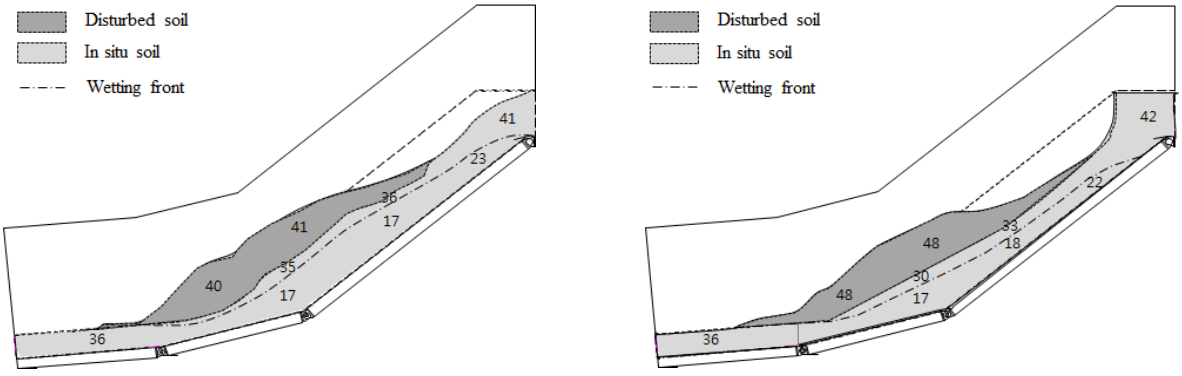
강우강도 200 mm/hr의 경우 역시 세굴에 의한 국지적 붕괴가 발생하였으나 3번의 실험 모두 활동면 전 구간이 슬라이딩되는 전진적인 붕괴가 우세하였다(Fig. 7b). Fig. 5에서 실험 초기 표층의 체적함수비의 증가속도가 빨라 기저면으로의 습윤전선 전이가 상대적으로 활발할 것으로 예상되었으나 활동면 아래에서 강우강도 100 mm/hr 조건과 같이 포화되지 않은 토층이 관찰되었다.



(a) Rainfall intensity 100 mm/hr (b) Rainfall intensity 200 mm/hr

Fig. 7. Time variations of the displacement in case of retrogressive failure(a) and Progressive failure(b).

표층 붕괴 직후 비탈면의 전구간에 대해 체적함수비를 측정한 결과 높은 강우강도(200 mm/hr)에서 습윤전선이 상대적으로 깊은 곳에 위치하는 것으로 확인되었는데 이로 인해 비탈면 전 구간에서 전진적인 파괴(Progressive failure)가 쉽게 발생하는 것으로 판단된다(Fig. 8). 그러나 습윤전선의 심도 차이가 크지 않고 강우강도 100 mm/hr와 200 mm/hr 두 경우 모두 심층에는 포화되지 않은 토층이 뚜렷이 관찰된 것으로 보아 일정 수준 이상의 강우강도는 습윤전선 전이에 큰 영향을 주지 않을 것으로 추정된다. 이 실험에서는 극한강우 조건에서의 특성을 고려하기 위해 실제 국내의 산사태 경보기준(30 mm/hr) 대비 매우 높은 수준의 강우강도를 재현하였다. 향후에는 실제 비탈면 붕괴를 야기하는 강우강도인 30~50 mm/hr 수준에서의 특성을 살펴볼 필요가 있는 것으로 판단된다.



(a) VWC at rainfall intensity of 100 mm/hr (b) VWC at rainfall intensity of 200 mm/hr

Fig. 8. Measured volumetric water content and wetting front in the test of rainfall intensity (a) 100 mm/hr and (b) 200 mm/hr.

이는 강우로 인해 비탈면 표층부에서 일시적인 포화가 이루어지고, 계속적으로 하강한 강우는 표층부 포화로 인해 기저부로 곧바로 투과되지 못하고 표층유출(surface runoff)이 발생한 결과라고 생각할 수 있다(Chae et al., 2006). 또한 높은 강우강도에서 지표면의 세립질 유실이 빨라지고 조립질로 구성된 표면이 단단해지는 현상(soil armouring)의 의한 것으로 강우강도가 클수록 표층유출을 가속화시켜 이 현상이 강해진다(Cochrane et al., 2007; Acharya et al., 2009). 강도에 의해 표면이 단단해 지는 현상을 정량적으로 확인하기 위해 입도분석을 수행하였다. 실험 전 흙의 입도와 실험 후 비탈면 표면에 분포한 흙의 입도분석을 실시한 결과 실험 전의 흙의 평균 입자(D_{50})은 1 mm인 반면 실험 후에는 표면 흙은 약 2 mm로 나타나 표층에서의 세립질 유실에 의해 표층이 단단해지는 현상이 발생한 것으로 나타났다(Fig. 9).

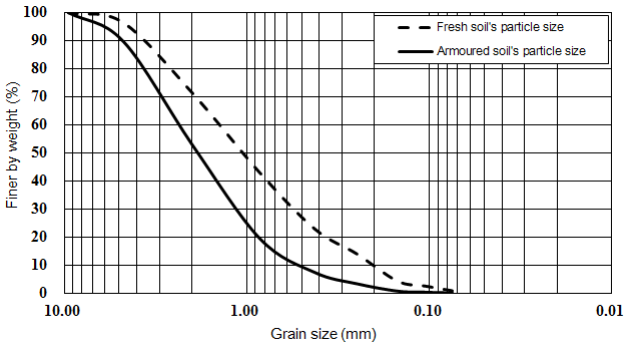


Fig. 9. Particle size distribution before an experimental run and after the experiment run showing the armouring phenomenon.

결 론

본 연구에서는 실내토조실험 장치를 개발하고 강우강도(100 mm/hr, 200 mm/hr) 및 초기 지반의 체적함수비 조건(자연상태, 건기시 지반 조건, 선행강우시)을 재현하여 각 조건에 따른 비탈면 표층의 체적함수비 변화와 지표거동 특성을 분석하였다. 실험결과에 의하면 표층붕괴는 크게 3가지 형태(후퇴성 붕괴, 전진형 붕괴, 국지적 붕괴)로 구분되었다. 지표변위 양상을 통해 형태별 거동특성이 구별되었으며 후퇴성 붕괴 및 전진형 붕괴는 토사가 비탈면 하부까지 퇴적되는 특징을 가진다. 따라서 붕괴 형태에 따라 비탈면 하부의 피해 규모가 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 체적함수비는 초기 조건에 관계없이 일정한 수준에서 붕괴가 발생하였으며 강우에 의한 표층의 체적함수비 변화로부터 표층붕괴를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 건기시의 지반이 건조한 경우 및 자연 상태일 경우 체적함수비 변화에 의한 표층붕괴 예측이 효과적인 것으로 나타났다. 강우강도 크기에 따라 붕괴양상이 뚜렷이 구별되었는데 강우강도가 클수록 전진형 붕괴가 우세하게 나타났다. 실험에서 강우강도에 따른 습윤전선 심도가 차이가 확인되었으나 실제 현장에서는 일정 수준 이상의 강우강도조건이 습윤전선 전이에 큰 영향을 못 미치는 것으로 판단된다.

References

Abramson, L., Lee, T., Sharma, S., Boyce, G., 1996, Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, 929.

Acharya, G., Cochrane, T.A., Davies, T., Bowman, E., 2009, The influence of shallow landsides on sediment supply: A flume-based investigation using sandy soil, Engineering Geology, 109, 161-169.

Chae, B.G., Kim, M.I., 2012, Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration, Environmental Earth Sciences, 66(7), 1973-1986.

Chae, B.G., Song, Y.S., Seo, Y.S., Cho, Y.C., Kim, W. Y., 2006, A Test for Characterization on Landslides Triggering and Flow Features of Debris using a Flume test Equipment, The Journal of Engineering Geology, 16(3), 275-282 (in Korean with English abstract).

Cho, S.E., Lee, S. R., 2000, Surficial Stability Evaluation of Homegeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics, Journal of the Korean Geotechnical Society, 16(5), 107-116 (in Korean with English abstract).

Cochrane, T.A., Jack, G., Weber, P., 2007. Soil armouring, sediment yield, and acid mine drainage from steep under high intensity rainfall in the west coast of New Zealand. 2007 ASABE Annual Meeting. ASABE Paper 072053, Minnesota (USA).

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslide types and precesses, Special Report, transportation research board, national academy of science, 247, 36-75.

Huang, C.C., Ju, Y.J., Hwu, L.K., Lee, J.L., 2009, Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall induced shallow slope failures, Journal of Hydrology, 370(14), 39-51.

Kim, J.H., Jeong, S.S., Park, S.W., Sharma, J., 2004, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils, Engineering Geology, 75, 251-262 (in Korean with English abstract).

Kim, S.W., Jung, S.J., Choi, E.K., Kim, S.H., Lee, K.H., Park, D.G., 2013, An Analysis of the Current Status of Disasters Occurring on the Steep Slopes in Korea, Journal of Environmental Science International, 22(11), 1529-1538.

Kim, W.Y., Chae B.G., 2009, Characteristics of Rainfall, Geology and Failure Geometry of the Landslide Areas on Natural Terrains, Korea, The Journal of Engineering Geology, 19(3), 331-344 (in Korean with English abstract).

Ministry of Public Safety and Security, 2016, Practical handbook for steep slope, 551-556.

Olivares, L., Damiano, E., 2007. Postfailure mecahnics of landslides: laboratory investigation of flowslides in Pyroclastic soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133(1), 51-62.

Sasahara, K., 2017, Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the monitoring of the shear strain and the pore pressure in the slope, Engineering Geology, 224, 75-86.

Seo, W.G., Choi, J.H., Chae, B.G., Song Y.S., 2017, Characteristics of Landslide Occurrence and Change in the Matric Suction and Volumetric Water Content due to Rainfall Infiltration, The Journal of Engineering Geology, 27(4), 475-487 (in Korean with English abstract).

Song, Y.S., 2013, Stability analysis of the unsaturated infinite slope considering suction stress under steady infiltration condition, Journal of the Korean Geotechnical Society, 29(9), 5-15 (in Korean with English abstract).

Sun, H.W., Wong, H.N., Ho, K.K.S., 1998, Analysis of infiltration in unsaturated ground, In: Proceedings of the annual seminar on slope engineering in Hong Kong, 101-109.

Terlien, M.T.J., 1997. Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of Manizales(Colombia). Geomorphology, 20, 165-175.

Wang, G., Sassa, K., 2001. Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. Geotechnique, 51(7), 587-599.

Wang, G., Sassa, K., 2003. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. Engineering Geology, 69, 109-125.