

토사비탈면 표층붕괴 위험 예측을 위한 체적함수비 증가 특성 연구

석재욱¹ · 강효섭¹ · 최선규² · 정향선² · 송효성^{3*}

¹국립재난안전연구원 방재연구실 기반재난실험팀 시설연구사,

²국립재난안전연구원 방재연구실 기반재난실험팀 선임연구원,

³국립재난안전연구원 방재연구실 기반재난실험팀 연구원

Characterization of Increases in Volumetric Water Content in Soil Slopes to Predict the Risk of Shallow Failure

Jae-Wook Suk¹ · Hyo-Sub Kang¹ · Sun-Gyu Choi² · Hyang-Seon Jeong² · Hyo-Sung Song^{3*}

¹Research Officer, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

²Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

³Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

Abstract

The characteristics of volumetric water content changes in soil slopes were studied here in an effort to identify the signs of heavy rain causing shallow slope failure. Volumetric water contents in cases with and without shallow failure were measured in flume and test-bed experiments. Measurement data from 282 experiments of both types revealed that the volumetric water content gradient in shallow failure events ranged from 0.072 to 0.309. In non-failure cases, the range was 0.01~0.32. Therefore, this one specific value cannot predict shallow slope failure. However, as the volumetric water content gradient increased, there was a clear tendency to shallow failure. By using this trend, criteria for four warning levels are suggested.

Keywords: soil slope, shallow failure, volumetric water content, warning criteria, flume test

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hyo-Sung Song
E-mail: song32@korea.kr

Received: 16 October, 2020

Revised: 24 November, 2020

Accepted: 24 November, 2020

© 2020 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.

초 록

이 연구에서는 집중호우로 인해 발생하는 토사비탈면의 표층붕괴 징후를 파악하기 위해 체적함수비의 변화특성을 분석하였다. 붕괴가 발생한 조건과 발생하지 않은 조건에서의 체적함수비 변화특성을 파악하기 위해 실내토조실험과 테스트베드에서 확보한 체적함수비 계측자료를 비교하였다. 본 연구에서 확보한 282개의 체적함수비 계측자료를 분석한 결과, 붕괴가 발생한 경우의 체적함수비 증가기울기는 0.072~0.309 범위에 분포하고 붕괴가 발생하지 않은 테스트베드의 경우에는 0.01~0.32의 값을 가져 특정값을 기준으로 붕괴 유무가 구분되지는 않았다. 그러나 체적함수비 증가기울기 값이 높아질수록 붕괴가 발생하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며 이를 이용하여 4단계의 경보기준을 제시하였다.

주요어: 토사비탈면, 표층붕괴, 체적함수비, 계측관리기준, 실내토조실험

서론

매년 수많은 인명피해를 발생시키는 토사재해는 주로 산지에서 발생하는 토석류와 산지경계부의 자연비탈면에서 발생하는 소규모 표층붕괴로 구분된다. 재해예방을 위해 산지와 주거지 주변 위험지역을 각각 산사태 취약지구와 급경사지 붕괴위험지구로 지정하고 사방시설, 보강공법 등을 통해 피해저감 노력을 기울이고 있으나 최근 빈번한 집중호우로 인해 예상하지 못한 위치에서 피해가 발생하는 사례가 많아지고 있다. 특히 표층붕괴의 경우에는 주거지와 인접한 위치에서 발생하는 경우가 많아 비교적 소규모의 토사붕괴나 유실에 의해서도 인명피해와 직결되는 경우가 많다. 산지가 많은 우리나라의 지형특성 상 이러한 환경을 가진 주거지나 주택은 매우 많은 상황으로 구조적인 예방관리에 한계를 가질 수밖에 없다. 인명피해를 저감한다는 관점에서 보면 붕괴가 예상되는 위치의 주민을 신속히 대피시키는 것이 현실적인 방법이며 이를 위해서 계측시스템을 활용해 붕괴 발생 전 징후를 감지하는 것이 효과적인 수단이 될 수 있다.

붕괴규모가 큰 심부파괴는 주로 낮은 강우량이 장기간 내리는 장마기간에 발생하는 반면(Bonnard and Noverraz, 2001), 표층붕괴는 주로 집중강우에 의해 발생하는 경향이 있다(Cannon and Ellen, 1985). 강우침투로 인해 발생하는 표층붕괴를 예측하기 위해서는 지중 내 토양수분을 측정하는 것이 효과적이라고 알려져 있다(Crozier, 1999; Glade et al., 2000; Tsai and Chen, 2010; Hawke and McConchie 2011; Valenzuela et al., 2018). Lu et al.(2010)은 지표에 도달한 강우는 지표 유출, 식생영향 등에 의해 직접적으로 지중에 투입되는 양은 제한적일 수 있어서 지중 내 토양수분을 직접 측정하는 것이 가장 효과적이라고 하였다. Bordoni et al.(2016)은 현장에서 실측한 계측정보를 바탕으로 안전율을 계산한 결과 지반이 포화되었을 때 간극수압보다 체적함수비(volumetric water content, VWC)가 붕괴 예측에 더욱 효과적임을 알아냈다.

체적함수비는 표층붕괴 전·후의 붕괴특성을 규명하는 연구를 통해 습윤전선이 하강함에 따른 즉각적인 반응 및 붕괴가 발생하기 전까지 오랫동안 유지되는 특징이 밝혀졌으며, 이러한 특징을 들어 국내 여러 연구자들에 의해 표층붕괴를 예측할 가능성이 있음이 밝혀졌다(Kim et al., 2008; Seo et al., 2017; Suk et al., 2018).

이 연구에서는 강우침투에 의한 체적함수비의 변화특성을 이용하여 토사비탈면의 붕괴징후를 파악할 수 있는 위험기준을 도출하고자 하였다. 이를 위해 실내토조실험을 통해 다양한 조건에서의 토사비탈면 붕괴를 모사하고 체적함수비 계측자료를 수집·분석하였으며, 테스트베드 운영을 통해 확보한 체적함수비 계측자료 특성과 비교·검토하였다.

이론적 배경

Chae and Kim(2012)은 토사비탈면에 침투된 물에 의해 체적함수비가 즉각적으로 반응하고, 붕괴에 이르기 전까지 최댓값이 오랫동안 유지되는 특성을 이용한 붕괴 예측방법을 제안하였다. 실내실험을 통해 붕괴과정 동안의 체적함수비가 증가하는 시간과 증가량을 이용하여 체적함수비 증가기울기를 산정하였으며, 붕괴가 발생하지 않은 테스트베드에서 측정된 체적함수비로 산정한 체적함수비 증가기울기 특성과 비교하였다.

물에 반응한 체적함수비가 증가하여 최대 체적함수비에 도달했을 때 소요되는 물의 양을 표현하기 위해 식 (1)과 같이 유효누적강우량(effective cumulative rainfall, ECR) 개념을 사용하였다.

$$ECR = \text{intensity rainfall [mm/min]} \times t \text{ [min]} \quad (1)$$

여기서, t는 체적함수비가 증가하기 시작하는 시점부터 최대체적함수비 도달까지의 시간을 나타낸다.

체적함수비 증가기울기를 산정하기 위해 최대 체적함수비 도달 시간(t_{max})에 대한 체적함수비 증가 시작시간(t)의 비(t/t_{max})로 정규화하여 Fig. 1과 같이 도시하고 선형회귀분석에 의한 기울기를 체적함수비의 증가기울기로 사용하였다. 최종적으로 실내토조실험과 테스트베드에서 측정된 체적함수비의 증가기울기를 산정하여 Fig. 2와 같이 붕괴 발생 여부에 따라 $0.1 \text{ VWC}/(t/t_{max})$ 를 계측기준으로 제시하였다.

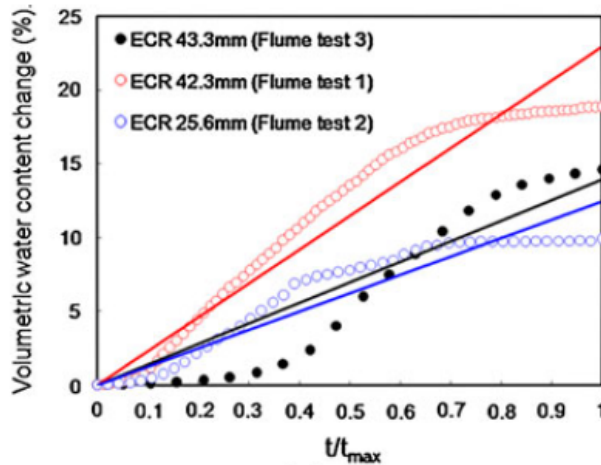


Fig. 1. Example relationship between VWC and t/t_{max} proposed by Chae and Kim (2012).

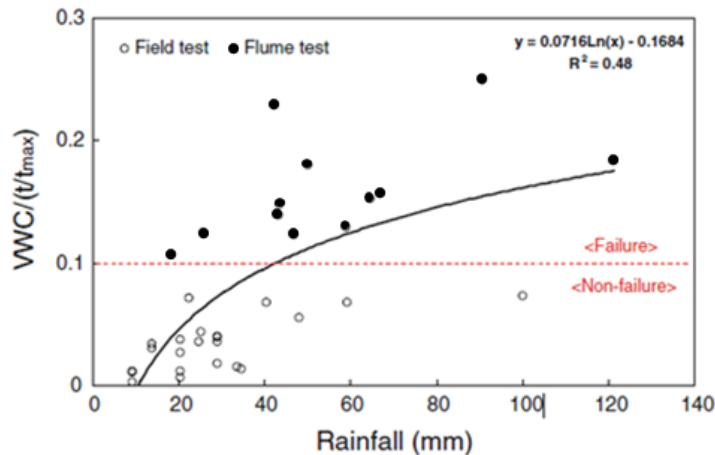


Fig. 2. Relationship between VWC gradient and rainfall proposed by Chae and Kim (2012).

이 방법은 체적함수비가 붕괴 전에 최댓값을 가지는 전조현상을 이용한다는 점에서 붕괴징후를 예측할 수 있는 장점이 있으며 강우 시 지표가 포화되는 과정을 실시간으로 확인할 수 있기 때문에 집중강우로 인해 발생하는 소규모 토사 비탈면에서의 표층붕괴 모니터링에 적합한 것으로 보인다. 그러나 위의 연구에서는 한정된 데이터만을 활용해서 계측기준을 제안하여 현장적용에는 한계를 가지고 있다. Suk et al.(2019)은 다양한 비탈면 경사, 밀도조건 및 강우강도에 대한 실내토조실험을 통해 붕괴 발생 유무에 따른 체적함수비 증가기울기를 이용한 계측 기준설정 방법의 적용성을 검토하였다. 그 결과 붕괴가 발생한 경우에는 체적함수비 증가기울기가 높은 반면 붕괴가 발생하지 않은 경우에는 비교적 낮은 체적함수비 증가기울기를 나타내었으나 $0.1 \text{ VWC}/(t/t_{max})$ 이상인 경우도 존재하였다. 붕괴가 발생하지 않는 경우의 체적함수비 변

화를 대조군으로 하여 체적함수비 측정 위치에 따라 체적함수비 증가기울기를 분석한 결과 붕괴 징후를 판단할 수 있는 관리기준을 $0.13 \sim 0.2 \text{ VWC}/(t/t_{\max})$ 범위에서 설정이 가능함을 제안하였다. 체적함수비의 증가기울기에 대한 선행연구는 체적함수비 증가기울기 값으로 붕괴징후를 판단할 수 있으나 실제 현장에 적용하기 위해서는 보다 다양한 조건에서의 체적함수비 증가기울기 자료와 붕괴 유무에 따른 체적함수비 증가기울기 특성을 파악할 필요가 있다.

연구방법

선행 연구자의 연구결과를 바탕으로 토사비탈면의 표층붕괴 징후를 판단할 수 있는 체적함수비 증가기울기 특성을 분석하기 위해 체적함수비 변화에 영향을 미칠 수 있는 비탈면 경사, 강우조건, 토질특성, 계측센서 측정위치 등의 실험조건을 제어하여 실내토조실험을 수행하였다. 강우에 의해 토사비탈면이 지표부터 습윤전선이 기저면으로 전이되어 표층이 붕괴되는 토사붕괴를 재현하기 위해 강우재현장치가 설치된 시뮬레이터를 사용하였다(Suk et al., 2018, 2019).

실내토조실험에서 인공비탈면은 화강암 풍화토를 사용하여 조성하였으며(Table 1), 비탈면 상, 중, 하부심도를 달리하여 체적함수비계를 설치하고 붕괴 전·후의 체적함수비 변화 특성을 고찰하였다(Fig. 3). 다양한 위치에서의 계측값을 확보하기 위해 조성한 토사비탈면의 상부, 중부, 하부 위치에 5~30 cm 심도까지 센서 심도를 달리하여 센서를 설치하여 실험을 수행하였다(Table 2).

Table 1. Physical properties of the soil and the model slope for flume tests

Property	Value
Specific gravity	2.60
Moisture content (%)	18.95
Dry density (t/m^3)	1.67
Effective grain size (D10)	0.16
USCS	SP
Soil conductivity (cm/sec)	2.5×10^{-3}
Liquid limit (%)	22.56
Plastic limit (%)	18.92
Uniformity coefficient (Cu)	9.38
Curvature coefficient (Cg)	0.84
Cohesion (kPa)	11.84
Friction angle ($^\circ$)	32.5

Table 2. Measurement depth according to slope angle

Slope angle ($^\circ$)	Measurement depth (cm)		
	Crest part	Slope part	Toe part
35	10, 20, 30	10, 20, 30	10, 20, 25
40	10, 20, 30	10, 20, 30	10, 20, 25
50	5, 15, 25	5, 15, 25	5, 10, 15

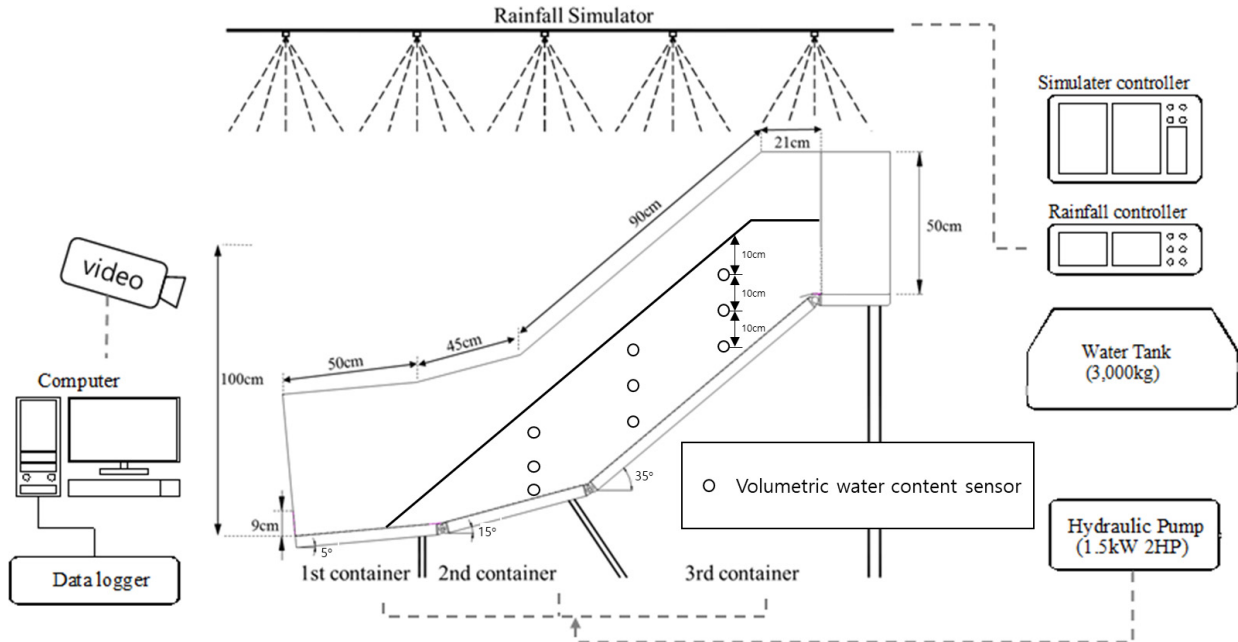


Fig. 3. Schematic diagram of the landslide flume test equipment for a 35° slope angle.

실내토조실험 결과에 대한 대조군으로 테스트베드에서 측정된 체적함수비 값을 사용하였다. 실험에 활용된 자료는 국립재난안전연구원에서 2010년부터 2013년까지의 기간 동안 운영한 테스트베드 중 실내실험과 동일한 화강암풍화토 지역인 부산, 충남 연기, 강원 인제 지역의 자료를 활용하였다(NDMI, 2013). 테스트베드는 비탈면에서 경사각 20°, 30°, 40°, 50° 위치에 각각 심도 20 cm와 40 cm에 체적함수비계를 설치하였으며 이 연구에서는 2012년 1월 6일부터 2012년 9월 15일까지의 측정자료를 분석에 활용하였다(Fig. 4).

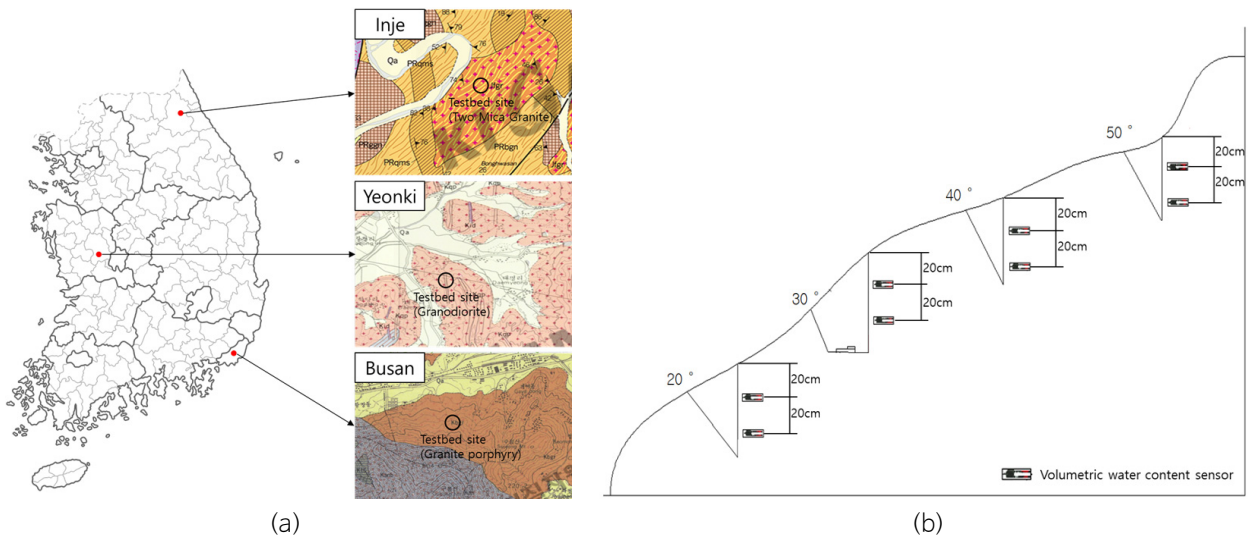


Fig. 4. (a) Location of the test bed site and (b) cross section of installed sensor.

실내토조실험 결과

실내토조실험에서 확보한 계측자료에 대해 Chae and Kim(2012)이 제안한 방법에 따라 체적함수비 증가기울기를 산정하였다. 강우침투에 의해 체적함수비가 증가해서 수렴하는 값을 최대 체적함수비로 간주하고 최댓값에 이르는 시간 t_{max} 를 계산하였다(Fig. 5). 체적함수비 변화에 영향을 미친 유효누적강우량(ECR)은 식 (1)을 활용하여 산정하였다.

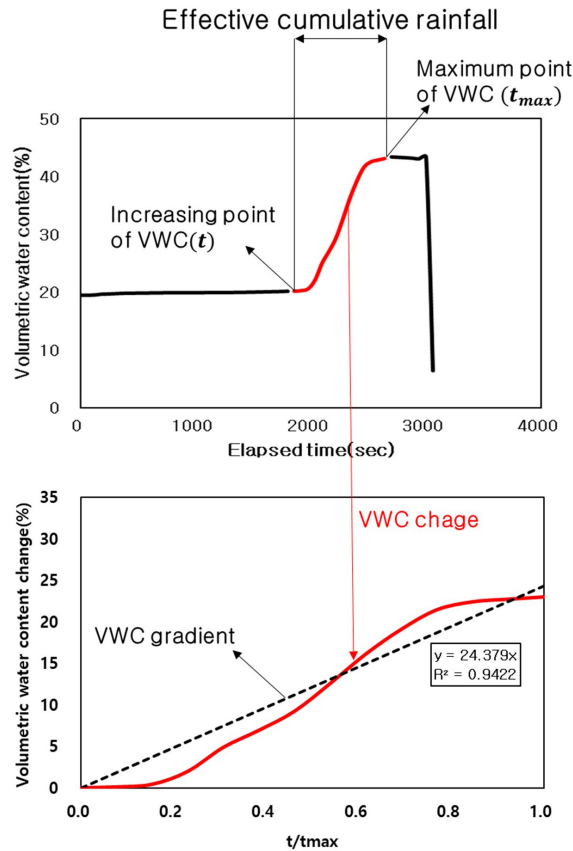


Fig. 5. Example calculation of volumetric water content gradient.

설치심도별 체적함수비 증가기울기를 살펴보았다(Fig. 6). 거의 모든 측정심도에서 체적함수비 증가기울기는 0.1 이상의 값을 나타내었으나 0.1 이하의 값을 가지는 경우도 일부 존재하였다. ECR에 대한 체적함수비 증가기울기의 상관성은 없는 것으로 나타났는데 동일한 ECR에서도 체적함수비 증가기울기는 다양한 범위에서 존재할 수 있으며 이는 반복된 실험에서 조성한 비탈면의 침투속도가 일정하지 못하고 측정심도 차이가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

계측센서를 활용하기 위해서는 센서설치 위치 또한 매우 중요한 요소이다. 설치위치에 따른 체적함수비 증가기울기 특성을 살펴보았으나 비탈면 경사각, 비탈면 내 설치위치(정상부, 사면부, 선단부)에 따른 특성은 관찰되지 않았다(Figs. 7, 8). 일반적으로 높은 경사를 가진 토사비탈면이 붕괴에 취약하고 비탈면 소단부에서 붕괴가 빈번히 발생하는 특징을 가지고 있으나 이러한 경향이 실험결과에서는 나타나지 않았는데 이는 토조실험의 규모가 작아 실제 토사비탈면과는 다른 형태의 붕괴가 발생하기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 설치위치에 따른 특성을 파악하기 위해서는 실제 현장 규모를 고려한 대규모의 토조실험이 필요할 것으로 판단된다.

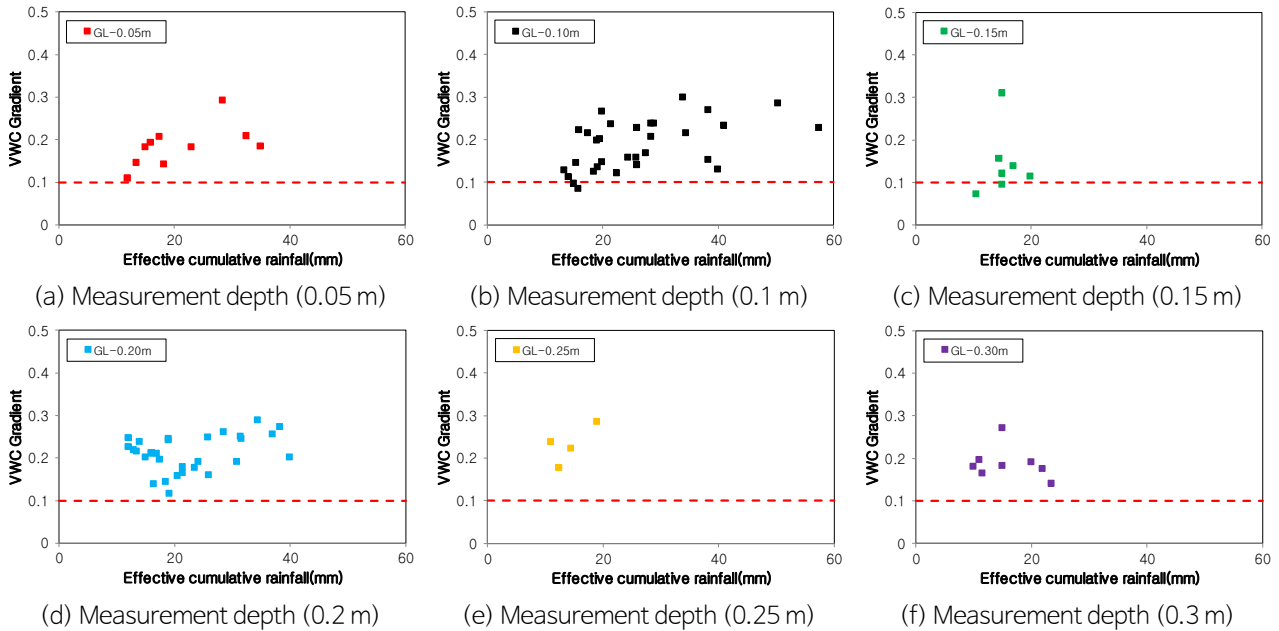


Fig. 6. Volumetric water content gradient with respect to measurement depth.

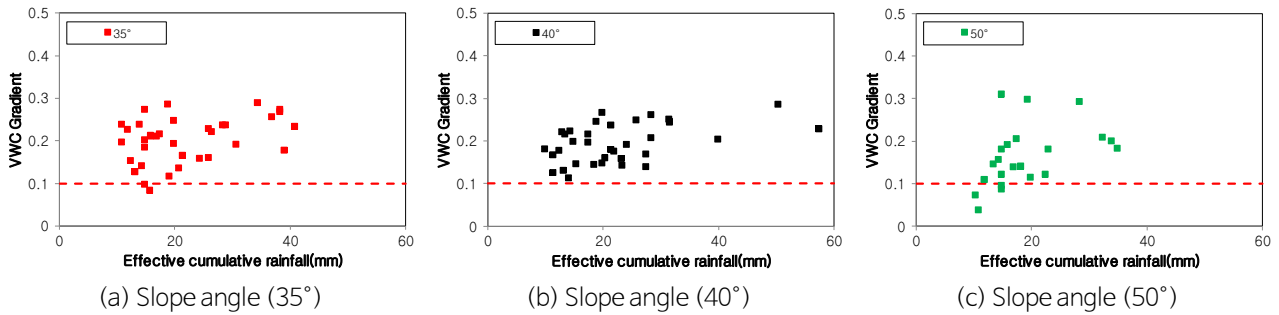


Fig. 7. Volumetric water content gradient with respect to slope angle.

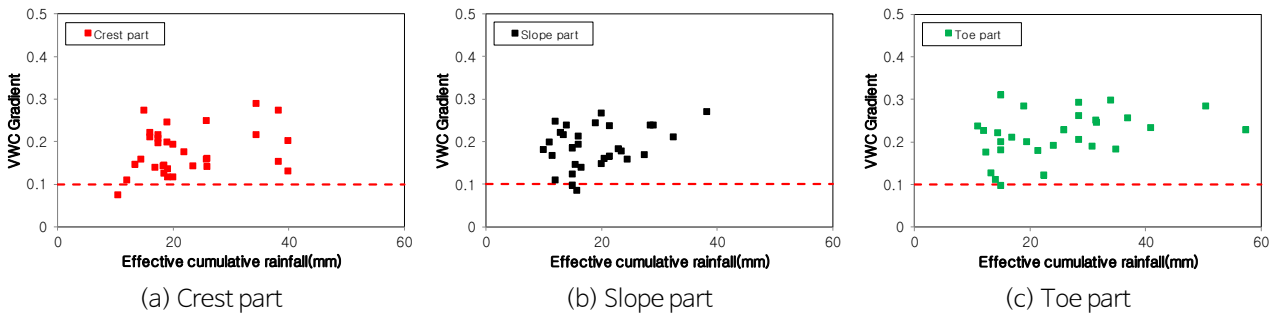


Fig. 8. Volumetric water content gradient with respect to measurement location.

테스트베드 운영 및 계측결과

실내토조실험에 사용된 흙과 유사한 화강암 풍화토 지역(부산 동래, 충남 연기, 강원도 인제)의 테스트베드 현장에서 확보한 계측자료를 이용하여 체적함수비의 증가 기울기를 산정하였다(Fig. 9). 이들 현장에서는 강우에 의해 지중 내 체적함

수비가 변화하였으나 토사붕괴는 발생하지 않아 이 연구에서는 붕괴가 발생하지 않는 조건에서의 체적함수비 변화 특성을 나타내는 자료로 활용하였다.

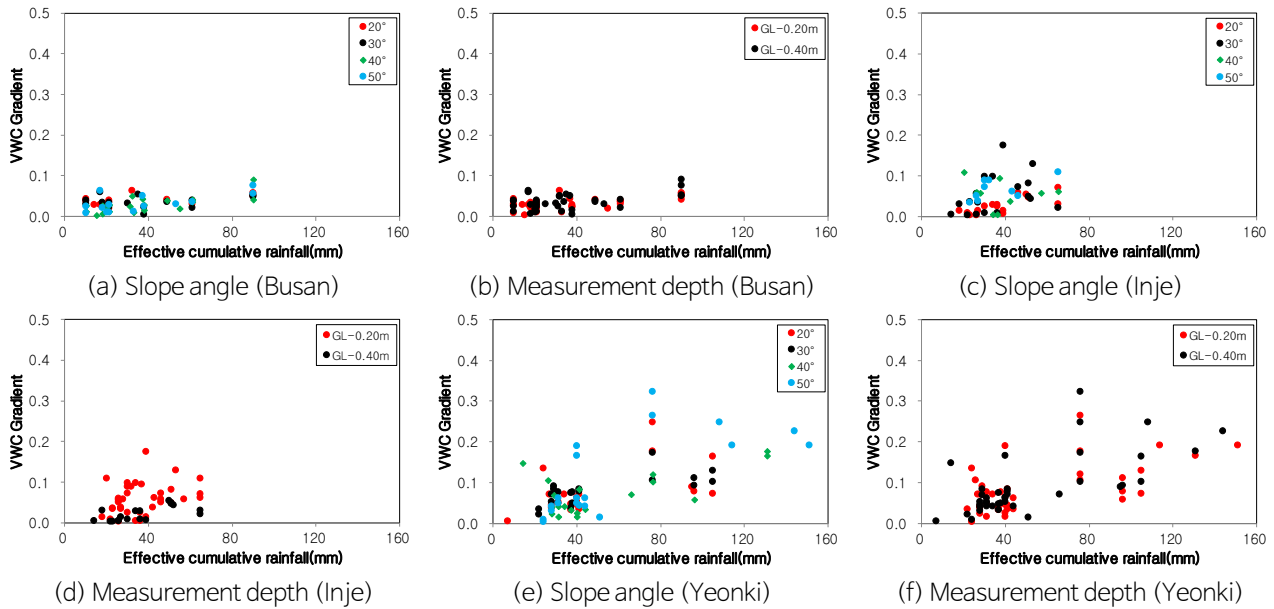


Fig. 9. Volumetric water content gradient of the test bed.

계측기간동안 세 지역에서의 강우사상을 보면 충남 연기 지역이 905 mm의 총강우량을 기록해 가장 높았으며 인제 541 mm, 동래 256 mm의 총강우량을 기록하였다(Table 3). 이 세 지역에 대해 실내토조실험과 같이 비탈면 경사(20°, 30°, 40°, 50°)와 설치심도(0.2 m, 0.4 m)에 대해 체적함수비 증가기율기 특성을 검토하였다(Fig. 9). 세 지역 모두 비탈면 경사 각이나 측정심도에 따라 구별되는 체적함수비 증가기율기 특성은 나타나지 않았다. 부산 동래의 경우 체적함수비 증가기율기는 0.1 이하에 분포하는 것으로 나타났으며 강원도 인제의 경우 0.1 이하의 값이 우세한 경향을 나타내나 일부 0.1 이상인 경우도 존재하였다. 두 지역에 비해 충남 연기는 비교적 높은 ECR범위를 가지고 있으며 0.1 이상의 체적함수비 증가기율기 값이 다수인 것으로 나타났다.

Table 3. Rainfall on the test bed

	Busan	Yeonki	Inje
Total rainfall	256	905	541
Maximum rainfall (hour)	56	70	29
Maximum rainfall (day)	90	155	70

위의 결과와 같이 붕괴가 발생하지 않는 현장에서도 체적함수비 증가기율기는 다양한 범위를 가질 수 있는 것으로 나타났다. 상대적으로 0.1 이상의 체적함수비 증가기율기를 가지는 경우가 많은 충남 연기의 경우에는 가장 강우량이 높았던 지역으로 강우조건에 의해 체적함수비 증가기율기가 높아질 수 있음을 보여준다. 실내토조실험 결과와 마찬가지로 측정심도나 비탈면 경사각에 따른 체적함수비 증가기율기의 특성이 나타나지 않는데 이는 테스트베드 현장 모두 화강암 지역

이라는 공통점이 있으나 센서가 설치된 위치의 토질특성은 다양하게 존재할 수 있어 체적함수비의 증가 양상 또한 다양하게 나타나는 것으로 여겨진다. 현실적으로 토질특성을 모두 고려해서 체적함수비 변화 특성을 파악하기는 어렵기 때문에 일부 계측자료만으로 체적함수비 증가기울기의 특정값을 선정해서 붕괴 유무를 구별하는 기준으로 사용하는 것은 합리적이지 않을 수 있다.

분석 및 고찰

이 연구에서는 표층붕괴 발생 유무에 따른 체적함수비 증가기울기 특성을 비교하고자 하였다. 실제 현장에서 붕괴 과정 동안의 계측자료를 충분히 확보하는 것이 매우 어렵기 때문에 반복실험이 가능한 토조실험이 대안이 될 수 있다. 따라서 표층붕괴가 발생한 계측자료는 실내토조실험 결과를 사용하였고, 미붕괴 사례는 테스트베드 계측결과를 사용하였다. 그러나 실내토조실험의 경우 경계조건 및 토질특성, 강우재현 특성 등이 현장과 다르기 때문에 테스트베드 결과와 직접적으로 비교하는 것은 무리가 있을 수 있다. 따라서 토조실험을 통해 확보한 계측자료의 한계를 고려해서 두 대조군에 대한 경향만을 비교하고자 실내토조실험을 통해 비탈면 붕괴가 발생한 조건의 체적함수비 증가기울기 값과 테스트베드의 체적함수비 증가기울기 값을 분석하였다(Fig. 10).

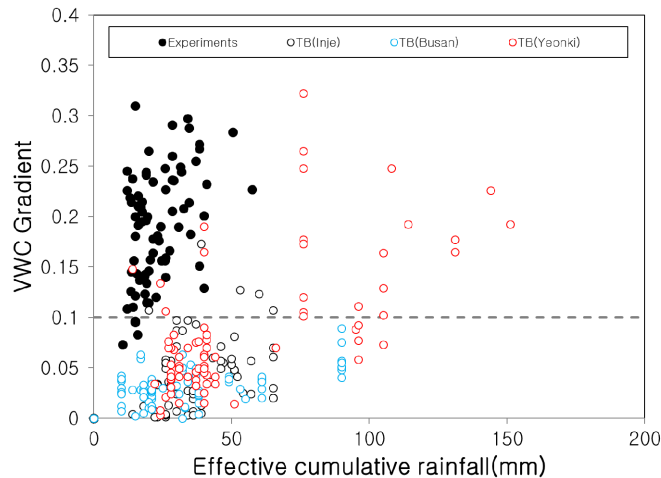


Fig. 10. Relationship between volumetric water content gradient and effective cumulative rainfall based on data from test-bed and flume experiments.

붕괴가 발생한 경우는 ECR 50 mm 이하에 집중되어 분포하며 체적함수비 증가기울기는 0.072~0.309 범위의 값을 가지는 반면 붕괴가 발생하지 않은 테스트베드 현장에서는 상대적으로 ECR의 범위가 넓고 체적함수비 증가기울기 또한 0.01~0.32의 넓은 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 이는 Chae and Kim(2012)의 연구에서 테스트베드 값이 0.1보다 낮은 값에 분포한 것과 다른 경향을 나타내는 것으로 토조실험에서는 50 mm/hr의 높은 강우강도하에 체적함수비가 반응하여 체적함수비 증가기울기가 커지는 반면 테스트베드는 상대적으로 강우량이 작으나 강우지속시간이 길어져 체적함수비 증가기울기가 완만하게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 경우에는 표층유실이나 세굴 등의 현상에 영향을 줄 수 있다. 붕괴가 발생하지 않은 테스트베드의 체적함수비 증가기울기 중 일부는 0.1 이상의 값을 나타내는데 이는 실제 현장에서 계측할 경우에 수시로 관찰될 수 있는 현상으로 체적함수비의 증가기울기가 표층붕괴 발생과 직접적인 인과관계를 가지지

는 못하는 것을 의미한다. 그러나 붕괴가 발생하지 않은 경우에는 붕괴를 야기할 정도로 지반을 포화시킬 만큼 충분한 강우가 내리지 않았거나 지중 내 원활한 배수 등으로 인해 체적함수비가 급격히 증가하지 않았다는 것으로 간주할 수 있으므로 체적함수비 증가기울기 또한 높은 값을 가지는 경우가 드물다고 할 수 있다. 따라서 붕괴가 발생하지 않을 경우에는 상대적으로 낮은 체적함수비 증가기울기를 가질 가능성이 높게 된다.

붕괴 유무에 따른 체적함수비 증가기울기 값 분포를 히스토그램으로 나타내었다(Fig. 11). 붕괴가 발생하지 않은 경우에는 체적함수비 증가기울기가 낮은 구간에서 누적빈도가 급격하게 높아지는 반면 붕괴가 발생한 경우에는 체적함수비 증가기울기가 높아짐에 따라 누적빈도가 지속적으로 증가하는 특징을 보였다.

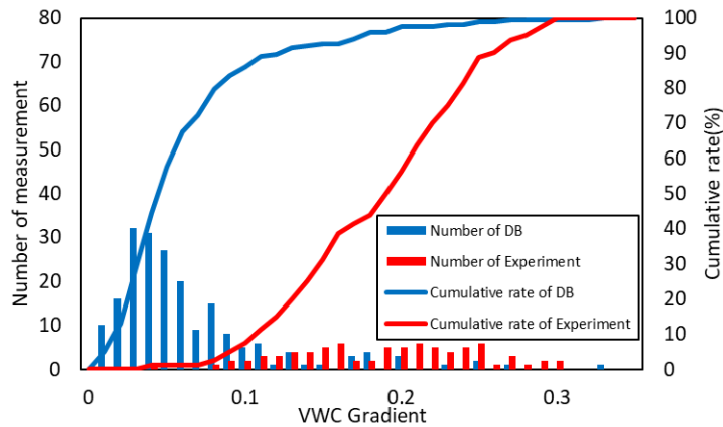


Fig. 11. Frequency of cases with and without shallow failure for different volumetric water content gradients.

붕괴 유무에 따른 체적함수비의 분포 특성을 활용하여 이 연구에서 확보한 총 282개의 자료에 대해 체적함수비 증가기울기 범위별 붕괴 빈도를 확인하였다(Fig. 12). 체적함수비 증가기울기가 높은 구간일수록 붕괴발생 비율이 증가하는 경향을 나타내는데 특히 0.2 이상에서는 80% 이상의 높은 붕괴 비율을 보였다. 본 연구에서의 붕괴 비율은 실험 및 테스트베드 자료를 바탕으로 구성한 것으로 절대적인 의미를 가지지는 않으며 향후 관련 자료가 추가될수록 붕괴 비율은 변할 수 있다. 그러나 본 연구에서 확인한 바와 같이 체적함수비 증가기울기가 증가함에 따라 붕괴가 발생한 비율이 높아지는 경향은 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 체적함수비 증가기울기 구간별 붕괴 비율을 참고하여 체적함수비의 계측관리기준을 Table 4와 같이 제시하였다. 3% 미만의 붕괴비율을 보이는 체적함수비 증가기울기 0.075 미만인 경우는 ‘관심’ 단계, 약 20%의 붕괴비율을 보이는 0.075~0.1 구간은 ‘주의’ 단계, 붕괴비율이 66% 이상 급격히 증가하는 0.1~0.2 구간은 ‘경계’ 단계 그리고 붕괴비율이 80% 이상인 0.2 초과구간은 ‘심각’ 단계로 구분하였다. 본 연구에서 제시한 관리단계는 실험에 의한 계측 자료의 분석 결과만을 고려한 것으로 기준의 정확성을 확인하기 위해서는 현장자료가 보완되어야 할 것이다.

또한 붕괴위험이 있는 비탈면에 체적함수비를 활용하여 붕괴징후를 파악하기 위해서는 위에서 제시한 관리기준과 함께 가장 효과적인 측정위치에 대한 결정도 필요하다. 이 연구에서는 측정위치에 따라 체적함수비 증가기울기의 차이는 나타나지 않아 설치 위치에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 가장 큰 원인은 실내토조실험과 테스트베드에서 설치된 체적함수비 센서의 심도가 가깝기 때문인 것으로 판단된다. 실제 표층붕괴가 발생한 현장에서 붕괴심도가 1~2 m 수준임을 고려하면 보다 깊은 심도에서의 측정자료를 분석할 필요가 있으며 표층붕괴 시의 계측자료를 확보하기 위해서는 대규모의 토조실험이 필요할 것으로 판단된다.

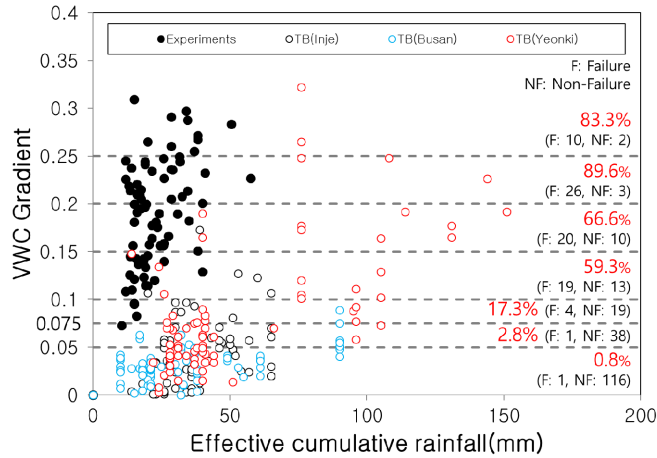


Fig. 12. Rate of landslide occurrence with respect to volumetric water content gradient.

Table 4. Criterion for volumetric water content gradient

Volumetric water content gradient	Level of alarm	Description
<0.075	Pre-alert	Very low failure rate for less than 3%
0.075~0.1	Alert	Failure rate for more than 20%
0.1~0.2	Pre-warning	Failure rate for more than 66%
0.2<	Warning	Very high failure rate for more than 80%

결론

집중호우에 의해 발생하는 표층붕괴 징후를 파악하기 위해 강우침투에 의한 체적함수비 증가기울기 변화특성을 분석하였다. 이를 위해 표층붕괴를 재현한 실내토조실험과 붕괴없이 체적함수비 변화만 발생한 테스트베드 현장의 체적함수비 계측결과를 비교·검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 실내토조실험에서 붕괴가 발생한 경우의 체적함수비 증가기울기는 0.072~0.309의 범위의 값을 가지고 테스트베드에서는 0.01~0.32의 범위를 가지는 것으로 나타나 표층붕괴 유무와 체적함수비의 증가기울기가 직접적인 인과관계를 갖지 않는 것으로 판단되며 체적함수비 증가기울기의 특정값을 기준으로 구분되지는 않는 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에서 확보한 282개의 체적함수비 자료를 토대로 체적함수비 증가기울기 구간별 붕괴유무 빈도를 살펴본 결과 체적함수비 증가기울기가 높은 구간일수록 붕괴발생 빈도가 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 이는 붕괴가 발생한 경우의 체적함수비 증가기울기가 붕괴가 발생하지 않은 경우보다 상대적으로 높은 값의 범위에서 분포하는 특성을 나타낸다.
- (3) 체적함수비 증가기울기 구간별 붕괴비율을 고려하여 체적함수비 증가기울기가 0.075 미만인 구간은 ‘관심’ 0.075~0.1 구간은 ‘주의’ 0.1~0.2 구간은 ‘경계’ 0.2 초과 구간은 ‘심각’으로 표층붕괴 발생 유무를 추정할 수 있는 4단계의 경보기준을 제시하였다.
- (4) 지속적인 실내 토조실험 및 현장 데이터 분석을 통해 체적함수비 증가기울기 구간별 붕괴비율 및 적용 기법 등을 보완해 나갈 필요가 있다.

사사

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원(“지반재난 관리기준 개선”, NDMI-주요-2020-07-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bonnard, C., Noverraz, F., 2001, Influence of climate change on large landslides: assessment of long-term movements and trends, *Proceedings of the International Conference on Landslides - Causes, Impacts and Countermeasures*, 121-138.
- Bordoni, M., Meisina, C., Valentino, R., Persichillo, M.G., Bittelli, M., Chersich, S., 2016, The impact of hydrological parameters on modelling slope safety factor towards shallow landslides: a case study from Oltrepò Pavese, *Proceedings of the E3S Web of Conferences*, 9, 1-6.
- Cannon, S.H., Ellen, S.D., 1985, Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California, *California Geology*, 38(12), 267-272.
- 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.
- Crozier, M.J., 1999, Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9), 825-833.
- Glade, T., Crozier, M., Smith, P., 2000, Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “antecedent daily rainfall model”, *Pure and Applied Geophysics*, 157(6-8), 1059-1079.
- Hawke, R., McConchie, J., 2011, In situ measurement of soil moisture and pore-water pressures in an ‘incipient’ landslide: Lake Tutira, New Zealand, *Journal of Environmental Management*, 92(2), 266-274.
- Kim, M.I., Chae, B.G., Cho, Y.C., Seo, Y.S., 2008, Study on rainfall infiltration characteristics for weather soils: analysis of soil volumetric water content and its application, *The Journal of Engineering Geology*, 18(1), 83-92 (in Korean with English abstract).
- Lu, N., Godt, J.W., Wu, D.T., 2010, A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil, *Water Resources Research*, 46(5), 1-14.
- NDMI (National Disaster Management Research Institute), 2013, Disasters risk evaluation of steep-slope considering the unsaturated soil characteristics, 308p (in Korean with English abstract).
- 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).
- Suk, J.W., Park, S.W., Na, G.H., Kang, H.S., 2018, A study for characterization on shallow behavior of soil slope by flume experiments, *The Journal of Engineering Geology*, 28(3), 489-499 (in Korean with English abstract).
- Suk, J.W., Song, H.S., Kang, H.S., Kim, H.J., 2019, A study on applicability of volumetric water content to predict shallow failure, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 20(12), 737-746 (in Korean with English abstract).
- Tsai, T.L., Chen, H.F., 2010, Effects of degree of saturation on shallow landslides triggered by rainfall, *Environmental Earth Sciences*, 59(6), 1285-1295.
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M.J., García, M.A.M., Jiméniz-Sánchez, M., 2018, Rainfall thresholds for the triggering of landslides considering previous soil moisture conditions (Asturias, NW Spain), *Landslides*, 15(2), 273-282.