

## 표층붕괴 예측을 위한 체적함수비 적용성 연구

석재욱, 송효성\*, 강효섭, 김호종  
국립재난안전연구원 방재연구실

### A study on applicability of volumetric water content to predict shallow failure

Jae-Wook Suk, Hyo-Sung Song\*, Hyo-Sub Kang, Ho-Jong Kim  
Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

**요약** 국내에서 발생하는 산사태는 대부분 강우에 의해 유발된 표층붕괴 형태이며 많은 연구자들에 의해 체적함수비를 통한 붕괴 예측 가능성이 밝혀졌다. 본 연구에서는 체적함수비 증가 기울기 특성을 통해 붕괴를 판단하는 방법에 대해 고찰하였다. 이를 위해 화강암 풍화토를 이용하여 실내 토조실험을 수행하였다. 강우강도 30, 50 mm/hr 조건하에 표층의 포화 상태를 확인하기 위해 비탈면 상부, 중부, 하부 10, 20 cm 심도에 체적함수비계를 설치하였다. 실험결과 체적함수비를 사용한 붕괴 판단은 비탈면 경사에 따라 제한적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났다. 또한 강우 침투속도에 의한 유효누적강우량이 붕괴시간을 결정하는 요인으로 판단된다. 체적함수비 증가 기울기를 활용한 붕괴 판단 시 체적함수비의 설치 위치 및 심도에 의해 결과가 달라지는데 실험데이터에 의하면 비탈면 하부 20 cm에서의 계측 값이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 확인된 체적함수비 분석 방법 및 설치위치 선정 방법은 향후 체적함수비를 활용한 계측기준을 제시하기 위한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** Most landslides in the country are shallow failures triggered by intense rainfall. Many researchers have revealed the possibility of predicting shallow failure through the volumetric water content (VWC). This study examined how to determine shallow failure using the gradient characteristics of the volumetric water content. For this, flume experiments were conducted using weathered granite soil. To confirm the saturation state of the surface layer under a rainfall intensity of 30 and 50mm/hr, VWC sensors were installed at depths of 10 and 20 cm on the upper, middle and lower slope. The test results showed that a shallow failure determination using VWC could be applied limitedly according to the slope degree. In addition, the effective cumulative rainfall due to the rainfall infiltration velocity is considered the main factor for the failure time. The failure prediction using the gradient of the VWC depends on the installation location and depth of the sensor. According to the experimental data, the measured value at 20 cm below the slope was most effective. Therefore, an analysis method of VWC and the method of selecting the installation location confirmed through this study can provide important data for presenting the measurement criteria using VWC in the future.

**Keywords** : Volumetric Water Content, Shallow Failure, Rainfall Intensity, Criteria, Flume Test

본 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("지반재난 관리기준 개선", NDMI-주요-2019-06-02)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Hyo-Sung Song(NDMI)

email: song32@korea.kr

Received October 1, 2019

Accepted December 6, 2019

Revised November 20, 2019

Published December 31, 2019

### 1. 서론

최근 이상기후의 영향으로 국지성 호우가 빈번하게 발생함에 따라 강우에 의한 자연 비탈면 및 도심지 인근 토사 비탈면의 붕괴 피해가 발생할 가능성이 높은 실정이다.

우리나라 산지의 토층 심도는 평균 4 m 이하로 얇게 형성되어 있으며, 매년 6-9월 극한강우에 의해 산사태가 발생하는데 주로 비탈면과 평행하게 발달한 2 m 이하의 얇은 천층파괴(shallow failure)가 주로 발생한다[1,2]. 산사태지역의 지질별 특성을 보면 화강암 지역은 풍화상태가 고른 분포를 보이고 대부분 0.5~1 m 내외의 파괴 심도를 가지는 후퇴성(retrogressive) 붕괴가 흔히 발생하고 다른 암석에 비해 산사태에 취약하다[3].

강우에 의한 표층붕괴 특성을 규명하기 위한 많은 연구 중 붕괴 메커니즘과 관련된 연구는 주로 실내 모형실험을 통해 수행되어져 왔다. 이는 적용 인자를 고정한 동일 조건의 실험을 반복 수행할 수 있고 비탈면 내부의 변형상황을 직접 관찰할 수 있는 장점을 가지기 때문이다 [4]. 실제 강우에 의한 불포화토 거동특성을 규명하기 위한 실내실험의 경우 대부분 강우강도 100 mm/hr 이상의 극한강우 조건에서 실험이 수행되어져 왔다[5-7]. [8]은 실내실험을 통해 강우강도 100 mm/hr와 200 mm/hr 조건에서 습윤전선이 발달한 심도의 차이가 거의 없음을 보고하면서 실제 국내 산사태 경보기준인 30mm/hr 수준에서 함수비 변화 특성 규명에 대한 연구가 필요함을 강조했다. 표층붕괴 전·후의 포화 특성을 규명하는 연구를 통해 체적함수비는 강우침투에 의해 즉각적으로 반응하고 붕괴에 이르기 전까지 최대값이 오랫동안 유지되는 특징이 밝혀졌으며 이러한 체적함수비 특징을 들어 많은 연구자들에 의해 표층붕괴를 예측할 가능성이 있음이 밝혀졌다[5, 8, 9]. [10]은 체적함수비 변화 양상을 3단계로 분류한 파괴 예측 방법을 통해 체적함수비가 급격히 증가하는 3단계 구간에서 파괴 가능성이 매우 증가한다고 제시하였다. 그러나 이 연구는 체적함수비의 변화 양상을 통해 붕괴를 예측하는 개념적인 방법만 제시한 것으로 실제 적용에는 한계를 가지고 있다.

[11]은 체적함수비가 증가하는 시점부터 최대체적함수비까지 이르는 시간을 이용한 체적함수비 증가속도의 기울기를 통해 붕괴를 예측하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 침투수에 의한 체적함수비 변화를 이용해 침투속도를 Eq. (1)과 같이 계산하였다.

$$V = \frac{L}{t_{max} - t_0} \tag{1}$$

Where, V denotes the infiltration velocity, L denotes the vertical distance between the surface and measurement position,  $t_{max}$  denotes the time of the maximum volumetric water content at the measurement position,  $t_0$  denotes arrival time of rainfall at the surface

즉, 체적함수비 센서가 설치된 심도와 침투수가 도달해서 포화되는 소요시간을 이용하여 침투속도를 산정할 수 있다. 이 때 최대 체적함수비까지 측정지점을 포화시킨 물의 양은 유효누적강우량(effective cumulative rainfall, ECR)이 되며 Eq. (2)와 같이 계산된다.

$$ECR = \text{intensity rainfall}[\text{mm}/\text{min}] \times t[\text{min}] \tag{2}$$

한편 체적함수비가 증가하기 시작하는 시간(t)과 최대 체적함수비 도달 시간( $t_{max}$ )의 비, 즉  $t/t_{max}$  에 대한 함수비 변화를 fig. 1과 같이 도시하면 회귀선의 기울기를 산정할 수 있다. 위와 같은 방법으로 실내 실험 및 현장 테스트베드 자료를 도시하여 붕괴 발생 여부에 따라  $0.1VWC/(t/t_{max})$ 를 예측기준으로 제시하였다.

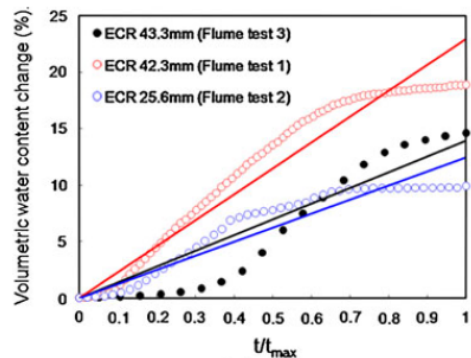


Fig. 1. Example of relationship between VWC and  $t/t_{max}$  by[11]

상기의 방법은 붕괴 이전 체적함수비가 최대값을 나타내어 표층이 포화된 상태를 확인할 수 있다는 점을 활용하여 붕괴를 예측할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 침투수에 의해 지표가 포화되는 과정에 대한 분석으로 붕괴를 예측한다는 점에서 실시간 예측방법으로 효용성이 높다고 할 수 있다. 그러나 위의 연구에서 제시한 예측기준

은 실내 실험과 1개소의 현장 계측결과로 계측기준을 제시한 것으로 보다 많은 조건에서의 고찰이 필요할 것으로 판단된다. 또한 체적함수비 설치 위치, 다양한 형태로 증가하는 체적함수비의 최대값 설정 방법 등에 대한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 체적함수비의 증가 기율기를 활용한 계측 기준 설정 방법에 대해 고찰하고자 하였다. [11]의 연구에서 고려하지 않은 측정 위치, 심도에 따른 체적함수비 증가기율기 특성 및 붕괴가 발생하지 않은 실험결과를 추가하여 붕괴 유무에 따른 최적의 계측위치에 대해서도 고찰하고자 하였다. 이를 위해 화강암 풍화토를 이용하여 강우에 의한 표층붕괴를 재현하는 실내실험을 수행하였다. 비탈면에 위치와 심도를 달리하여 체적함수비계를 설치하고 붕괴 전·후의 체적함수비 변화 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험조건

강우에 의한 토사비탈면의 표층붕괴를 재현하기 위해 실내 토조실험을 수행하였다. 비탈면 조성에 사용된 화강암 풍화토의 토질속성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties 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
Effective particle size(D10)	0.16
USCS(-)	SP
Coef. of permeability(cm/sec)	$2.5 \times 10^{-3}$
Liquid Limit(%)	22.56
Plastic Limit(%)	18.92
Uniformity coefficient(Cu)	9.38
Coef. of curvature(Cg)	0.84

이 실험에서는 국내 산사태 경보기준인 강우강도 30 mm/hr와 국지성 집중호우를 재현한 강우강도 50 mm/hr를 강우조건으로 설정하였다. 다양한 비탈면 조건을 고려하기 위해 비탈면 경사각 35°, 40°, 50°에 대한 실험을 실시하였다(Table 2). 설정된 비탈면 경사각을 조성하기 위해 토조에 6~7층으로 비탈면 형상을 그리고 각 층별로 설정된 밀도와 초기함수비를 계산하여 토

수량과 물의 무게를 조정하여 수작업으로 다짐을 하였다.

Table 2. Experiment conditions

No.	degree(°)	Rainfall Intensity (mm/hr)	density ( $g/cm^3$ )	Initial water contents(%)
1	35	30	1.50	9.0
2	35	50	1.53	9.3
3	40	30	1.41	10.2
4	40	50	1.45	9.8
5	50	30	1.43	9.5
6	50	50	1.34	9.0

강우로 인한 비탈면의 체적함수비 변화를 측정하기 위해 실험 조건별 비탈면 상, 중, 하 위치의 일정 심도에 체적함수비계를 설치하였다. 또한 강우에 의한 거동 변화양상을 파악하기 위해 비탈면 상부와 중간 지점에 지표변위계를 설치하고 실험과정을 촬영하였다(Fig. 2). 체적함수비가 최대값에 이를 때까지의 변화특성을 관찰하기 위해 붕괴가 발생한 후에도 측정이 가능한 경우에는 일정 시간동안 체적함수비를 측정하였다. 실험 중 비탈면 하부 심도 10 cm에 설치된 체적함수비계(WVC5)는 센서 결합으로 인해 체적함수비가 증가하지 않거나 진동하는 형태의 값을 나타내는 등 측정값을 신뢰할 수 없다 판단하여 분석에서는 제외하였다.

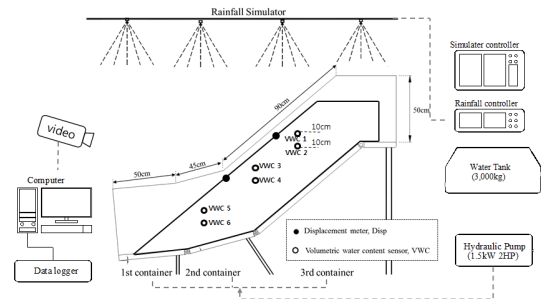


Fig. 2. Schematic diagram illustrating experimental set up with soil profiles.

## 3. 실험결과

### 3.1. 체적함수비 변화 특성

강우가 내린 후부터 붕괴시점까지의 체적함수비 변화 양상을 살펴보았다(Fig. 3,4,5). 모든 실험조건에서 침투수가 도달한 후부터 급속한 체적함수비의 증가를 나타내

며 이후 점진적인 증가양상을 나타낸다.

최대체적함수비에 이르기까지 증가하는 경향은 두가지 형태로 나타났다. 첫째는 붕괴 전 일정값까지 증가한 후 수렴해서 최대체적함수비가 측정가능한 경우이다. 두 번째는 체적함수비 값은 포화수준까지 이르렀으나 붕괴 시까지 지속적으로 체적함수비가 증가해서 최대체적함수비를 측정할 수 없는 경우이다. 이처럼 체적함수비가 최대값에 수렴하지 않고 붕괴시까지 점진적으로 증가하는 경우에는  $t_{max}$ 를 결정하기 어려워 [11]이 제안한 방법론을 직접적으로 활용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 측정 심도, 측정 위치 및 비탈면 경사각에 따른 체적함수비 증가 형태를 살펴보면 측정심도 10 cm 보다 20 cm에서 비교적 수렴하는 경향이 높고 비탈면 상부보다는 하부(특히 VWC 6)에서 최대체적함수비에 수렴하는 경향이 강하게 나타났다. 이러한 경향은 인공강우 실험을 시작함과 동시에 사면 표층부를 따라 표류수가 비탈면 하단부로 급격히 집중하는 현상에 기인한다[10]. 체적함수비의 증가 특성이 위치, 심도에 따라 달라질 수 있다는 점을 고려하면 체적함수비를 활용한 붕괴예측에서 함수비 측정 위치 선정이 매우 중요함을 의미한다. 비탈면 경사각 35°, 40°에서 위와 같은 현상이 두드러지는 반면 비탈면 경사각 50°에서는 최대체적함수비에 도달하기 전에 붕괴되는 특성을 보였다.

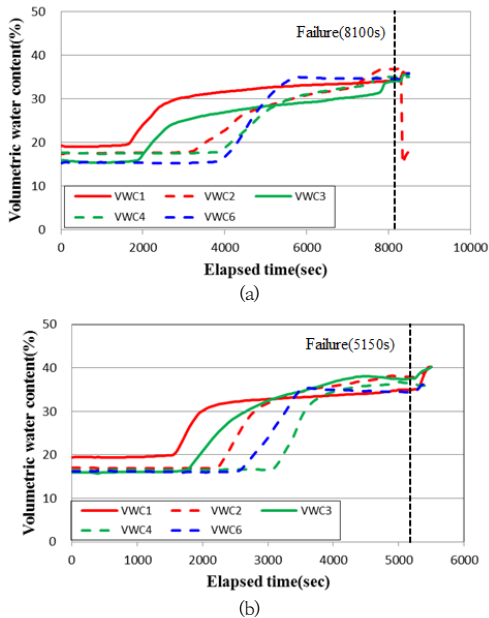


Fig. 3. Distribution of volumetric water content in slope degree 35° (a)Rainfall intensity 30 mm/hr, (b)Rainfall intensity 50 mm/hr

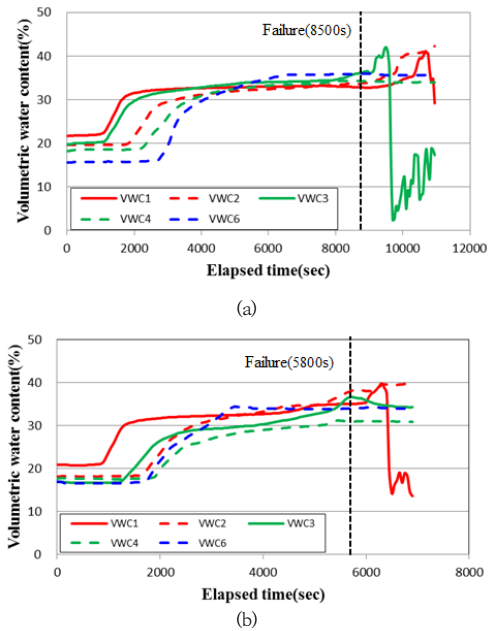


Fig. 4. Distribution of volumetric water content in slope degree 40° (a)Rainfall intensity 30 mm/hr, (b)Rainfall intensity 50 mm/hr

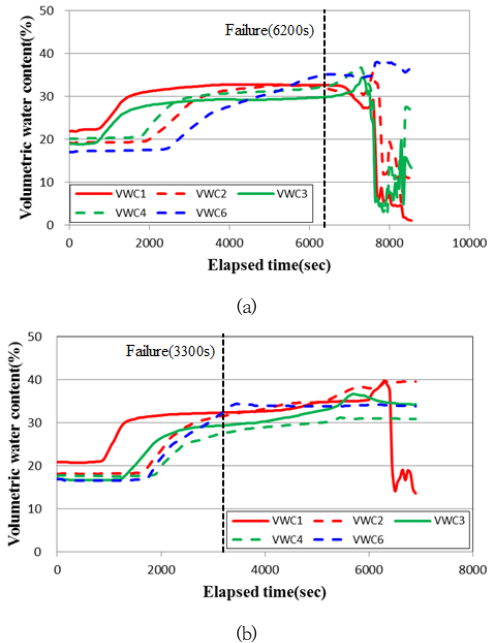


Fig. 5. Distribution of volumetric water content in slope degree 50° (a)Rainfall intensity 30 mm/hr, (b)Rainfall intensity 50 mm/hr

### 3.2 붕괴시 체적함수비

붕괴가 발생하는 시점에서의 체적함수비를 검토하였다. 체적함수비계가 설치된 위치에서의 강우강도 조건에 따른 체적함수비 차이를 확인한 결과 비탈면 경사각 35°, 강우강도 30 mm/hr 조건에서의 붕괴시의 평균 체적함수비는 34.8 %로 나타났으며 강우강도 50 mm/hr 조건에서의 평균 체적함수비는 36.2 %로 나타났다 (Fig.6(a)). 경사각 40° 조건에서 각 강우강도별 평균 체적함수비는 각각 34.4 %, 34.9 %로 나타나 큰 차이를 보이지 않았다(Fig.6(b)). 이는 강우강도가 상대적으로 높은 조건에서도 붕괴를 유발하는 체적함수비는 크게 달라지지 않는다는 것을 의미하므로 붕괴에 이르는 체적함수비는 강우강도에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 그러나 경사각 50° 조건에서의 최종 체적함수비는 각각 32.2%, 28.6%로 나타나 비교적 낮은 체적함수비에서 붕괴가 발생하였다(Fig.6(c)). 이 경우는 급격한 경사를 가진 불안정한 비탈면에서는 낮은 함수비에서도 붕괴를 유발할 수 있음을 의미하며 체적함수비 변화특성으로 붕괴를 예측하는 것이 부적절할 수 있음을 지시한다.

한편 경사각, 35, 40°에서는 모든 측정위치에서 30 % 이상의 체적함수비를 나타낸 것으로 보아 강우에 의한 습윤전선은 표층으로부터 20 cm 이하의 심도에서 형성된 것으로 추정된다.

### 3.3 붕괴시간

본 연구에서는 강우에 의해 비탈면 지표면에 거동이 발생하는 시점, 즉 영상자료를 통해 인장균열이 관찰되거나 지표변위가 급격히 증가하는 시점을 붕괴시간으로 정의하였다. 실험조건별 붕괴시간을 살펴 본 결과 비탈면 경사각 35°와 40°의 경우 큰 차이를 보이지 않은 반면 경사각 50°에서는 비교적 빠른 시점에 붕괴가 발생하였다. 강우강도에 따른 특성을 보면 모든 경사각 조건에서 강우강도가 높을 때 붕괴시간이 빨라지는 경향을 보였다 (Fig. 7). 붕괴시의 체적함수비 변화에 대한 검토에서 체적함수비가 강우강도에 영향을 받지 않고 일정 수준을 유지한다는 점을 고려하면 강우강도에 따른 붕괴시간의 차이는 강우가 지중으로 침투하는 속도에 따라 결정될 수 있다는 것을 시사한다.

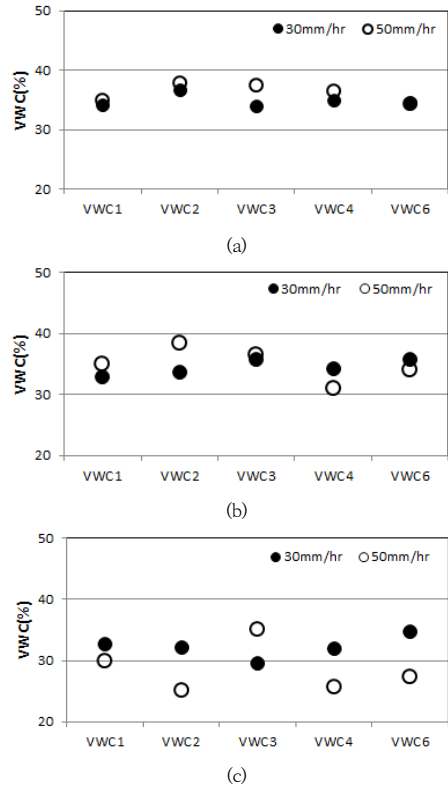


Fig. 6. Volumetric water content(VWC) of measurement position for slope failure (a)slope degree 35°, (b)slope degree 40°, (c)slope degree 50°

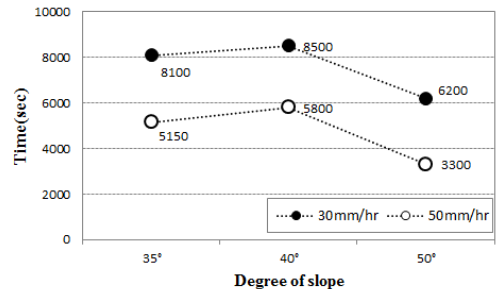


Fig. 7. Relationship between failure time and degree of slope

### 3.4 침투속도와 유효누적강우량

이 연구에서는 Eq. (1)을 이용하여 체적함수비계 설치 위치별 침투속도를 산정하였다. 침투속도를 산정하기 위해서는 최대체적함수비에 도달한 시간( $t_{max}$ )을 결정해야 하는데 Fig. 8과 같이 체적함수비가 붕괴시까지 점진적으로 증가하는 경우(VWC3)에는 이를 결정하기가 어렵

다. 붕괴시 최대체적함수비는 시험조건 및 측정위치에 따라 차이를 보이나 모두 30% 이상에서 붕괴가 발생하였다(Fig. 6(a), (b)). 따라서 붕괴 전 최대체적함수비에 수렴하지 않는 경우에는 체적함수비 30% 수준에 도달할 때까지의 시간을  $t_{max}$ 로 가정하여 산정하였다.

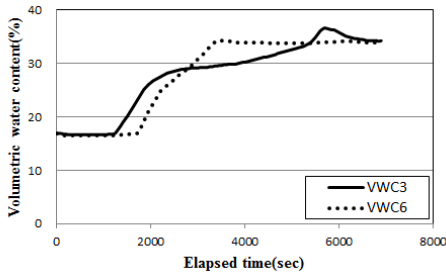


Fig. 8. Example of VWC increase patterns

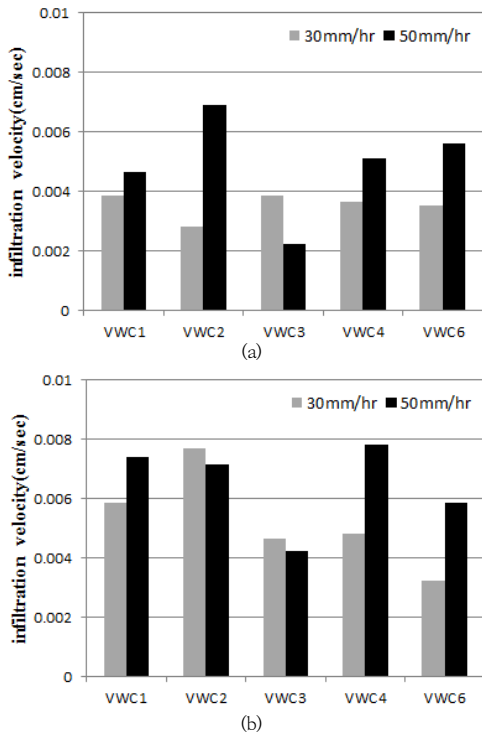


Fig. 9. Relationship between infiltration velocity and measurement position (a)slope degree 35°, (b)slope degree 40°

강우에 의해 표층이 충분히 포화된 경우에서의 침투속도 특성을 알아보기 위해 비탈면 경사각 35°와 40° 조건에서의 침투속도를 살펴보았다. 경사각 35°인 경우 강우강도 30 및 50 mm/hr의 평균 침투속도(cm/sec)는 각각  $3.5 \times 10^{-3}$ ,  $4.9 \times 10^{-3}$ 으로 나타났다. 경사각 40°인 경

우는 각각  $5.2 \times 10^{-3}$ ,  $6.5 \times 10^{-3}$ 으로 나타났다. 두 경우 모두 강우강도 50 mm/hr 조건에서 높은 침투속도를 나타낸다(Fig. 9).

Eq. (2)를 이용해서 강우강도 30, 50 mm/hr에 대한 유효누적강우량을 산정한 결과 비탈면 경사각 35°인 경우의 각각 11.92 mm, 16.39 mm이며 경사각 40°에서 각각 13.33 mm, 13.88 mm로 나타나 높은 강우강도에서 유효누적강우량이 증가하였다. 위의 결과를 종합해보면 높은 강우강도에서 침투속도가 증가하고 이로 인한 유효누적강우량 많아지는 것이 붕괴시간을 결정하는 요소가 될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 체적함수비 증가 기울기

앞 장에서 붕괴 시의 체적함수비, 붕괴시간, 침투속도, 유효누적강우량 분석을 통해 침투속도가 붕괴를 유발하

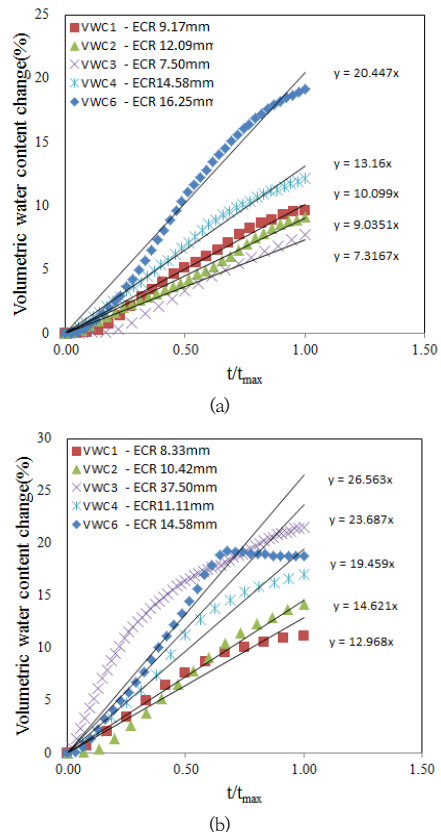


Fig. 10. Gradient of the VWC versus  $t/t_{max}$  on 35° slope. (a)rainfall intensity 30mm, (b)rainfall intensity 50mm.



는 요인이 될 수 있음을 확인하였다. 즉, 침투속도에 따라 붕괴를 유발하는 최대체적함수비까지 도달하는 체적함수비 변화량이 달라지는 것인데 본 연구에서는 [11]이 제안한 방법론을 기초로 붕괴시의 체적함수비 증가특성을 분석하였다. 최대체적함수비에 수렴하는 경우에는 최대값에 이르는 시간을  $t_{max}$ 로 하고, 수렴하지 않고 지속적으로 증가하는 경우에는 체적함수비 30%에 이르는 시간을  $t_{max}$ 로 간주하였다. 유효누적강우량(ECR)은 Eq. (2)를 통해 산정하였다.  $t/t_{max}$ 에 대한 체적함수비 변화량을 도시하고 회귀분석을 통해 기울기를 산정하였다(Fig. 10, 11). 모든 경우에서 VWC6의 기울기가 대체적으로 높은 반면 다른 체적함수비계의 경우 위치에 따른 규칙성은 관찰되지 않았다. 체적함수비의 기울기는 강우가 내린 후부터  $t_{max}$  까지 체적함수비의 증가량을 의미하는 것으로

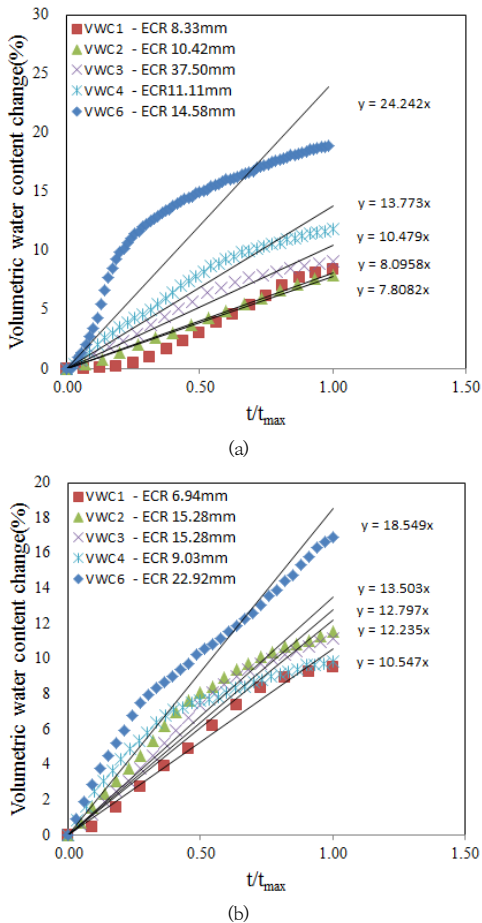


Fig. 11. Gradient of the VWC versus  $t/t_{max}$  on 40° slope. (a)rainfall intensity 30mm, (b)rainfall intensity 50mm.

비탈면 하부에 설치된 VWC6에서 침투수가 가장 많이 모여 상대적으로 빠르게 포화되기 때문으로 판단된다. 이에 반해 다른 측정 위치에서는 실험조건별 기울기가 다양한 형태로 나타난다. 이는 조성된 비탈면 흙의 불균질성으로 인해 위치별 침투속도가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

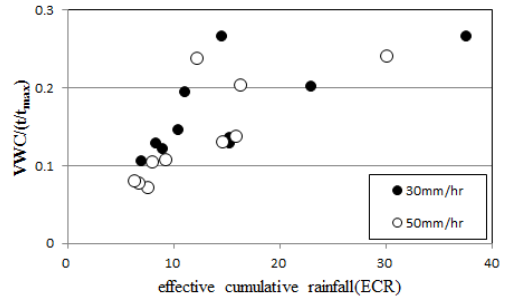


Fig. 12. VWC gradient for ECR by different rainfall intensity(30 and 50mm/hr)

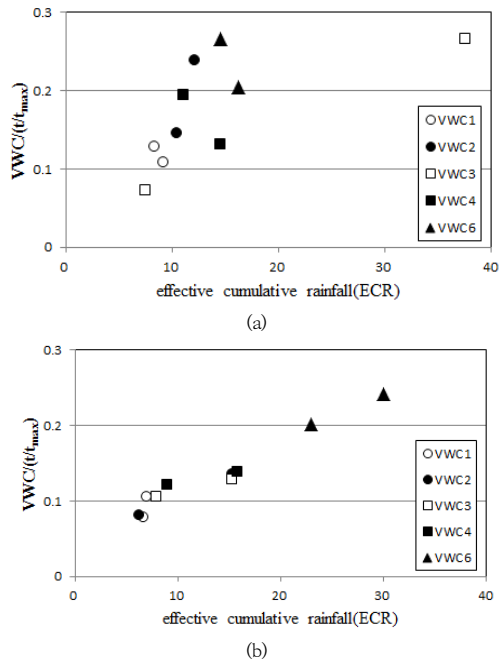


Fig. 13. VWC gradient according to measurement position (a) slope degree 35°, (b) slope degree 40°

유효누적강우량(ECR)에 따른 체적함수비 변화 기울기를 보면 ECR이 증가함에 따라 기울기가 상승하는 경

향을 보이나 유사한 ECR에서도 다양한 기울기가 나타나 신뢰할 수 있는 상관관계를 형성하지는 못한다. 또한 강우강도에 의한 기울기 특성은 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 12). 체적함수비 위치에 따른 기울기를 검토한 결과 심도 10 cm에 위치한 VWC1, VWC3이 상대적으로 낮은 기울기를 나타내었으며, 이와는 대조적으로 심도 20 cm에 위치한 VWC2, VWC4, VWC6은 높은 기울기를 보였다(Fig.13).

### 5. 계측기준 적용성 고찰

실험으로 획득한 자료를 통해 체적함수비 증가 기울기의 계측기준 적용성을 검토하고자 하였다. 이를 위해 위에서 분석한 실험조건(표층붕괴가 발생한 경우, 이하 case 1)과의 비교를 위해 표층붕괴가 발생하지 않은 경우(이하 case 2)에 대한 체적함수비 변화 특성을 확인하였다. 선행 실험을 통해 세립분 함량이 높은 흙을 이용한 실험에서 일정 수준이상 포화가 발생했음에도 불구하고 표층붕괴가 발생하지 않은 점을 확인하였다. 따라서 세립분 함량이 높은 화강암 풍화토를 대상으로 실내 토조 실험을 수행하였다. case 1과 case 2에서 사용한 흙의 체 분석 결과를 보면 case 1에 사용된 화강암 풍화토의 세립분 함량은 약 20.5 %이었으며, Case 2에 사용된 화강암 풍화토의 세립분 함량은 약 40 % 수준으로 큰 차이를 나타낸다(Fig. 14).

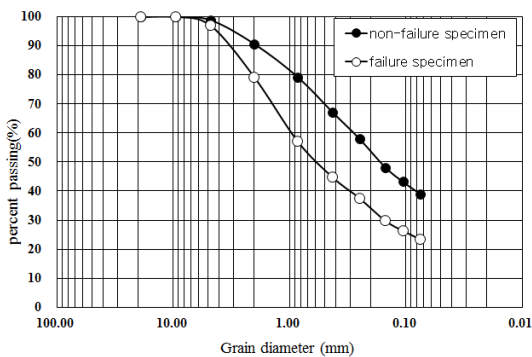


Fig. 14. Grain size distributions of investigated soil

case 2의 경우 인공 비탈면은 경사 40°, 초기 함수비는 약 10 %, 밀도 1.3~1.6 g/cm<sup>3</sup> 으로 조성되었다. case 1 실험 결과에서 강우강도 30 및 50mm/hr 조건에서 체적함수비 변화 기울기의 차이가 크지 않다는 점

을 고려하여 강우강도 50, 100mm/hr 조건하에 2~3회 반복 실험을 실시하고 다양한 ECR에 대한 체적함수비 변화 기울기 산정하였다.

Case 2에서 강우침투에 의한 체적함수비 변화 양상을 예시를 Fig. 15에 나타내었다. 실험 시작 후 침투수에 의해 체적함수비가 최대값까지 급격히 증가한 후 지속되는 경향을 보였다. case 1에서 실험시작 후 약 3500~8000 초 범위에서 붕괴가 발생한 반면 case 2에서는 약 24,000초까지 붕괴가 발생하지 않았다. 일부 위치에서는 최대 체적함수비가 40%까지 나타나 case 1 보다 비교적 높은 체적함수비를 보이기도 하였다. 이는 체적함수비 값으로 붕괴기준을 설정할 경우 붕괴 유무 판단에 오류가 발생할 수 있음을 의미한다.

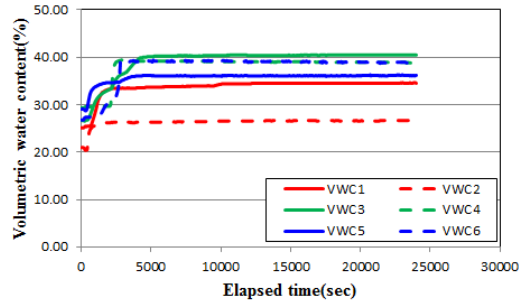


Fig. 15. Distribution of volumetric water content for case 2

case 1과 case 2의 체적함수비 기울기를 함께 도시하여 체적함수비 증가 기울기 특성을 검토하였다(Fig. 16). case 2의 경우 대부분 [11]에 의해 제시된 붕괴 기준(0.1 VWC/(t/t<sub>max</sub>)) 보다 낮은 값을 가지나 일부는 0.1보다 높은 값을 나타내기도 한다. 또한 붕괴 시의 체적함수비 기울기인 case 1의 경우 대부분은 0.1이상을 나타내나 일부는 0.1 이하의 값을 나타내고 있다. 체적함수비의 기울기를 계측관리 기준으로 활용하기 위해서는 붕괴 유, 무에 의한 경계가 명확할수록 효과적일 수 있다. Fig. 13에서 체적함수비 측정 위치에 따라 기울기 값이 달라지는 점을 고려해서 비교적 높은 기울기를 보이는 심도 20 cm에서 측정된 값(VWC 2, 4, 6)만 도시하여 Case 2와 비교하였다. 심도 10 cm 측정값을 제외한 결과, 두 case의 경계가 보다 구분되나 비탈면 상부와 중간에 위치한 VWC 2, 4의 일부 측정값이 Case 2보다 낮거나 유사한 범위의 값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 반면 비탈면 하부에 위치한 VWC 6의 경우 상대적으로 높은 기울기 값으로 인해 붕괴 여부를 명확히 구분할 수 있



는 것으로 나타났다(Fig. 17). 따라서 체적함수비 증가 기울기를 이용한 붕괴 판단을 위해서는 비탈면 하부에 센서를 설치하는 것이 효과적이라고 할 수 있다. 이 경우 붕괴 판단 기준이 되는 기울기는 0.13~2.0 범위에서 설정이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 실험결과가 모든 화강암 풍화토에 일률적으로 적용되기는 어렵기 때문에 특정 기준을 제시하지는 않았다. 따라서 본 연구에서 검토한 방법론을 통해 계측관리 기준을 선정하기 위해서는 다양한 조건에 대한 자료가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

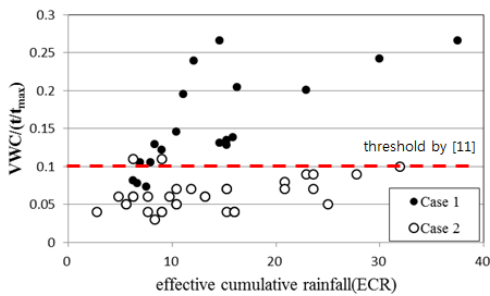


Fig. 16. Relationship between volumetric water content gradient and ECR based on the data from case 1 and case 2

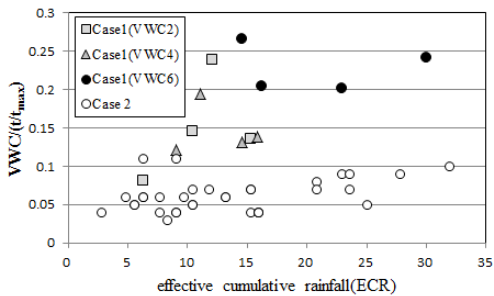


Fig. 17. Relationship between volumetric water content gradient and ECR according to measurement position

## 6. 결론

본 연구에서는 강우에 의해 발생하는 비탈면의 표층붕괴 특성을 고찰하기 위해 실내 토조실험을 수행하였다. 표층붕괴가 가장 빈번히 발생하는 화강암 풍화토를 이용하여 비탈면을 조성하고 30, 50 mm/hr의 인공강우를 재현하였다. 표층의 포화 상태를 확인하기 위해 비탈면 상부, 중부, 하부의 10, 20 cm 심도에 체적함수비계를

설치하였다. 또한 비탈면 지표면에 지표면위계를 설치하고 실험 전 과정을 영상촬영하였다. 실험결과 분석을 통해 확인된 주요 결론을 보면, 강우 침투에 의해 붕괴 전에 최대값을 나타내는 체적함수비 특성을 통해 붕괴예측이 가능할 것으로 판단된다. 단, 실험에서 비탈면 경사 50°에서는 최대체적함수비 도달 이전에 붕괴가 발생해서 체적함수비를 통한 예측이 불가능한 경우가 발생하는 것으로 보아 비탈면 경사에 따라 제한적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

강우강도별 붕괴 시 체적함수비 값의 차이가 없는 것으로 보아 높은 강우강도에서 붕괴시간이 빨라지는 것은 침투속도가 향상하기 때문이며 이로 인한 유효누적강우량이 붕괴시간을 결정하는 요소가 되는 것으로 판단된다. 이러한 현상을 고려하여 체적함수비 증가 기울기를 활용한 붕괴 판단방법의 적용성을 분석하였다. 붕괴가 발생하지 않는 경우의 체적함수비 변화를 대조군으로 하여 체적함수비 증가 기울기 특성을 살펴 본 결과 체적함수비 측정 위치에 따라 붕괴 기준을 달리할 수 있음을 확인하였다. 실험결과로 보면 표층심도 10 cm 보다 심도 20 cm에서의 측정 자료가 효과적이었으며, 비탈면 상부, 중부 보다 하부에서 측정한 자료가 분석에 활용될 때 가장 효과적으로 붕괴 유무를 구별할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 체적함수비계 설치 위치 및 해석방법에 대한 기초 연구로서 향후 체적함수비를 활용한 계측 기준 제시를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해서는 다양한 비탈면 지반조건에 대한 실제 규모의 비탈면 실험이 필요할 것으로 여겨진다.

## References

- [1] J. H. Kim, S. S. Jeong, S. W. Park, J. Sharma, "Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils", *Engineering Geology*, Vol.75, pp.251-262, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.017>
- [2] K. S. Kim, "Soil Characteristics according to the geological condition of soil slopes in landslides area", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.16, No.4, pp.359-371, 2006.
- [3] W. Y. Kim, B. G. Chae, "Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea", *The Journal of Engineering geology*, Vol.19, No.3, pp.331-344, 2009.
- [4] B. G. Chae, "Development of landslide prediction technology and damage mitigation countermeasures",

R&D report, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea, pp. 123

- [5] W. G. Seo, J. H. Choi, B. G. Chae, and Y. S. Song, "Characteristics of Landslide Occurrence and Change in the Matric Suction and Volumetric Water Content due to Rainfall Infiltration", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No.4, pp.475-487, 2017. DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2017.4.475>
- [6] G. Wang, K. Sassa "Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content", *Engineering Geology*, Vol.69, pp.109-125, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00268-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00268-5)
- [7] Y. Okura, H. Kitahara, H. Ochiai, T. Sammorii, A. Kawanami, "Landslide fluidization process by flume experiments", *Engineering Geology*, Vol.66, pp.65-78, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00032-7)
- [8] J. W. Suk, S. Y. Park, G. H. Na and H. S. Kang, "A Study for characterization on shallow behavior of soil slope by flume experiments", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No.3, pp.489-499, 2018. DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2018.3.489>
- [9] M. I. Kim, B. G. Chae, Y. C. Cho, Y. S. Seo, "Study on rainfall infiltration characteristics for weather soils: Analysis of soil volumetric water content and its application", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.18, No.1, pp.83-92, 2008.
- [10] M. I. Kim and M. Nishigaki, "Slope failure predicting method using the monitoring of volumetric water content in soil slope", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.16, No.2, pp.135-143, 2006.
- [11] B. G. Chae, and M. I. Kim, "Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration", *Environmental earth Sciences*, Vol.66, No.7, pp.1973-1986, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1423-z>

석재욱(Jae-Wook Suk) [정회원]



- 2008년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 탐사공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 (공학박사)
- 2013년 4월 ~ 2015년 10월 : 한국시설안전공단 선임연구원
- 2015년 11월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>

지반공학, 지질공학

송호성(Hyo-Sung Song) [정회원]



- 2017년 8월 : 군산대학교 해양과대학 해양건설공학과(공학석사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 연구원

<관심분야>

지질공학

강호섭(Hyo-Sub Kang) [정회원]



- 2010년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 해양공학과(공학석사)
- 2016년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 해양공학과(공학박사)
- 2018년 1월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>

지반공학

김호종(Ho-Jong Kim) [정회원]



- 2009년 2월 : 건국대학교 공과대학 토목공학과(공학석사)
- 2009년 2월 ~ 2014년 8월 : 서영엔지니어링 지반터널팀
- 2018년 8월 : 건국대학교 공과대학 토목공학과(공학박사)
- 2018년 10월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>

지반공학, 터널공학