

# 변형-연화 거동 이론을 이용한 토사비탈면의 표층붕괴 예측 방법 고찰

석재욱<sup>1</sup>, 정향선<sup>2\*</sup>, 송효성<sup>2</sup>, 최선규<sup>2</sup>, 정민수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립재난안전연구원 재난원인조사실

<sup>2</sup>국립재난안전연구원 방재기준평가센터

## A Study on the Predicting Method of Shallow Failure on Soil Slopes using the Strain-Softening Behavior Theory

Jae-Wook Suk<sup>1</sup>, Hyang-Seon Jeong<sup>2\*</sup>, Hyo-Sung Song<sup>2</sup>, Sun-Kyu Choi<sup>2</sup>, Min-Su Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Disaster Scientific Investigation Division, National Disaster Management Research Institute

<sup>2</sup>Disaster Prevention Assessment Center, National Disaster Management Research Institute

**요약** 표층붕괴는 집중호우에 의해 우리나라에서 가장 빈번하게 발생하는 산사태 유형으로 알려져 있다. 본 연구에서는 토사비탈면의 역학적 붕괴 특성을 고려하여 표층붕괴 시기를 예측할 수 있는 방법에 대해 검토하였다. 이를 위해 실내 토조실험을 수행하였으며, 토사비탈면의 표층붕괴 과정에서 나타나는 지표변위의 거동이 3차 크립 거동과 같이 변위가 급격히 상승하는 불안정한 구간이 있음을 확인하였다. 토사비탈면의 표층붕괴를 예측하기 위해 일반적으로 암반비탈면의 거동 해석에 활용되는 변형-연화 거동 이론의 적용성을 검토하였다. 단위시간에 따른 지표변위 증가량이 급격히 상승하는 시점을 기준으로 변위가 급증하는 불안정한 변위 구간 내에서 붕괴를 예측할 수 있는 것으로 확인되었다. 선행 거동 등으로 인해 누적변위량이 크게 발생한 경우에는 붕괴와 직접적인 연관이 있는 변위구간을 선정해서 선행 누적변위에 영향을 받지 않고 표층붕괴를 예측 가능하다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 검토한 변형-연화 거동 해석 방법은 누적변위가 발생한 경우에도 붕괴와 연관된 지표변위 거동을 통해 붕괴예측이 가능하다는 점에서 현장에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다.

**Abstract** Shallow failure is the most frequent landslide type in Korea due to torrential rains. This study investigated a method to predict the shallow failure time on soil slopes considering their mechanical failure characteristics. In particular, this study confirmed through flume experiments that the surface displacement of soil slopes during the shallow failure is rapidly unstable in the same way as the tertiary creep. In addition, the applicability of the strain-softening behavior theory, which is generally used for the behavior analysis of rock slopes, was reviewed to predict shallow failure on soil slopes. Subsequently, it was confirmed that the shallow failure could be predicted in an unstable surface displacement section of the soil slope where the displacement increases sharply based on the point where the displacement per second increases rapidly. In addition, it was confirmed that the shallow failure could be predicted without being affected by a large cumulative surface displacement of the soil slope (due to the soil slope's preceding behavior) by selecting the displacement section related directly to the shallow failure. Hence, the strain-softening behavior analysis method is expected to be highly useful in the field in that it can predict shallow failure on soil slopes through their surface displacement behavior related to the shallow failure even when cumulative surface displacement occurs in them.

**Keywords** : Strain-Softening, Shallow failure, Surface Displacement, Creep Behavior, Weibull's Distribution

본 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("실증실험을 통한 토사재해 취약성 평가(I)", NDMI-주요-2022-07-02)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Hyang-Seon Jeong(NDMI)

email: jhs99@korea.kr

Received March 28, 2022

Revised April 29, 2022

Accepted June 3, 2022

Published June 30, 2022

## 1. 서론

장마철 집중호우로 인한 산지 경계부에서의 비탈면 붕괴는 많은 인명과 재산 피해를 발생시키는 대표적인 자연재해이다. 우리나라는 매년 6~9월의 집중호우에 의해 산사태가 발생하며 주로 토층두께 2 m 이하의 표층붕괴(Shallow failure)가 주를 이룬다[1-3].

붕괴 우려가 있는 비탈면은 보호·보강 공법의 적용을 통해 안정성을 확보하는 경우가 일반적이나 계측센서를 통해 붕괴를 예측하는 일이 필요한 경우가 많다. 지표변위는 비탈면 지반의 거동을 직관적으로 확인할 수 있는 장점이 있어 가장 활용도가 높은 계측항목으로 지표변위의 증가 양상을 통해 붕괴 유무 및 붕괴 시기를 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

지표변위의 변화 양상으로 붕괴를 예측하는 다양한 모델이 제안되었는데 이중 변위 증가 속도를 이용한 모델은 간단한 방법으로 붕괴예측이 가능한 장점으로 인해 많은 연구자들에 의해 후속 연구가 활발히 진행되었다 [4-8]. 그러나 이 모델은 지반의 역학적 메커니즘은 고려하지 않고 변위 증가량에만 의존하여 실제 현장에는 적용하기 어려운 한계를 가진다[9].

석재욱 등(2018)은 실내실험을 통해 토사비탈면의 표층붕괴 형태에 따라 변위 증가양상이 크립(creep)형태의 거동을 나타낸다고 하였다[10]. 크립 거동은 3단계의 거동변화를 보이는데 1단계는 변형 경화 구간, 2단계는 변위 지속구간, 3단계 변위 가속구간으로 구분된다(Fig. 1). 해당 연구는 실내실험을 통해 비탈면 경사각, 흙의 밀도, 강우강도 등의 다양한 변수를 조절하여 국내에서 발생하는 표층붕괴 형태를 재현하고 표층붕괴 시의 변위 거동 특성을 규명하였으나 변위거동 특성을 고려한 표층붕괴 예측방법 제안까지는 발전시키지 못하였다.

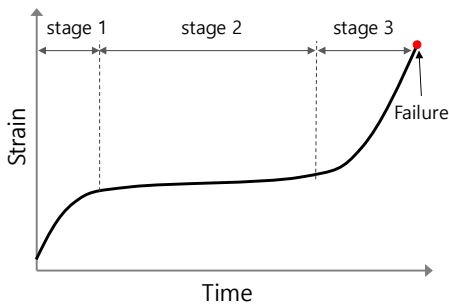


Fig. 1. Typical creep behavior

실제 산사태 현장과 붕괴를 재현한 실내 실험에서 비탈면의 붕괴가 발생하기 전 지표변위의 증가 현상은 다양한 형태로 나타나는데 크게 다항형 모델(Polynomial model)과 성장형 모델(Growth model)로 구분된다 [11,12]. 다항형 모델은 암반사면과 같이 점착력이 낮은 경우에 주로 나타나며 성장형 모델은 토사비탈면과 같이 높은 점착력을 가진 경우에 주로 나타나는 것으로 알려져 있다[10].

토사비탈면은 후퇴성 붕괴, 전진형 붕괴, 국지적 붕괴 등 붕괴형태에 따라 변위거동 또한 달라지는 경향이 있으나 확연히 구분되지는 않으며 다항형 모델과 성장형 모델이 모두 이에 포함된다고 할 수 있다.

Fig. 2는 다항형 모델과 성장형 모델의 시간-변위를 나타낸 것이다. 강우침투로 인한 자중 증가, 전단강도 감소 등의 내·외적인 요인으로 인해 붕괴와 연관된 움직임이 발생하게 되고 지표면에서는 표층붕괴가 발생하기 전에 변위량이 급속하게 증가하는 구간이 존재하게 된다. 최종 붕괴시까지 발생하는 변위증가 형태는 비탈면 지반 속성에 따라 차이를 보이지만 두 모델 모두 변위가 급격히 증가하기 시작하는 불안정한 변위 증가구간을 포함한다고 할 수 있다.

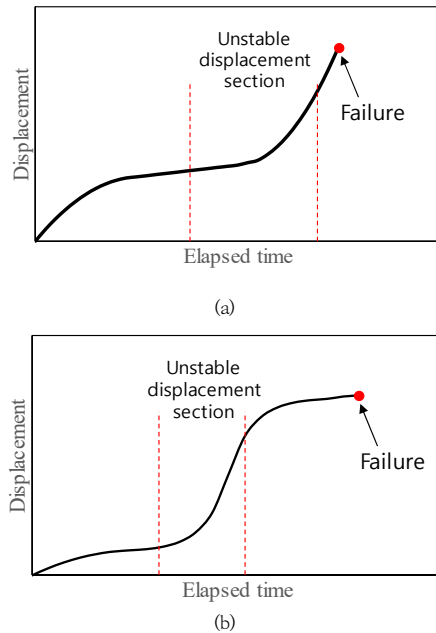


Fig. 2. Models of surface displacement  
(a) Polynomial model, (b) Growth model

기존의 연구를 기반으로 인명 및 재산 피해 저감을 위한 다양한 형태의 계측관리기준이 제시되어 왔는데 시간-변위 그래프를 기반으로 기준점까지 변위의 총 합산인 누적변위(mm) 방식, 시간에 따른 변위량인 변위속도(mm/day) 방식 그리고 시간과 변위의 순간 기울기인 경사각(°) 등 3가지 형태가 대표적이다[13-15].

이 중에 시간-변위 그래프 자체를 기반으로 설정한 변위속도(mm/day)를 계측관리기준으로 설정하는 방법은 현재 국내·외 연구자 또는 유관기관에서 가장 많이 사용되는 계측관리기준 설정방법이다[15-18].

위의 방법은 붕괴가 발생하는 과정 동안의 변위 증가량을 이용하여 계측관리기준을 설정한 것으로 붕괴와 연관된 역학적인 거동은 고려하지 않았다는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 토사 비탈면의 역학적인 붕괴 특성을 고려하여 표층붕괴 시기를 예측할 수 있는 방법에 대해 검토하였다. 이를 위해 실내 토조실험을 통해 인공강우에 의한 표층붕괴를 유발시키고 변형-연화 거동 이론을 적용하여 붕괴 시의 변위 거동을 분석하였다.

## 2. 지표변위 증가 특성

표층붕괴는 주로 집중강우 시 강우침투에 의해 발생하는 경향이 있으며[19], 여러 연구자들에 의해 강우침투에 의한 표층붕괴 특성을 규명하는 연구가 수행되어져 왔다[20,21].

강우에 의한 비탈면의 거동특성을 확인하기 위해 토사 비탈면을 조성하고 인공강우에 의한 비탈면 표층붕괴 재현 실험을 수행하였다(Fig. 3). 비탈면은 국내에서 가장 넓게 분포하는 화강암 풍화토를 사용하였으며 토질 특성은 Table 1과 같다.

실내실험으로 표층붕괴를 재현한 선행 연구결과에 의하면 강우에 의한 표층붕괴는 산사태 경보기준인 30mm/hr ~ 50mm/hr의 수준에서 가장 잘 발행하는 반면, 50mm/hr 이상의 강우강도에서는 지표 유실 및 세굴 등으로 인해 표층붕괴 재현이 제한적으로 발생하는 것으로 알려져 있다[10,22]. 따라서 본 연구에서는 표층붕괴를 유발하기 위해 강우강도 50mm/hr를 적용하였다. 지중 내 강우 침투 수준을 확인하기 위해 체적함수비 센서를 설치하였고 붕괴 과정 동안의 움직임을 관찰하기 위해 지표면에 변위계를 설치하고 붕괴과정을 영상촬영하였다. Fig. 4는 실험 전·후의 모습을 나타낸 것이다.

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 <sup>3</sup> )	1.67
Effective particle size(D <sub>10</sub> )(mm)	0.16
USCS(-)	SP
Coef. of permeability(cm/sec)	2.5×10 <sup>-3</sup>
Liquid Limit(%)	22.56
Plastic Limit(%)	18.92
Coef. of uniformity(C <sub>u</sub> )(-)	9.38
Coef. of curvature(C <sub>g</sub> )(-)	0.84

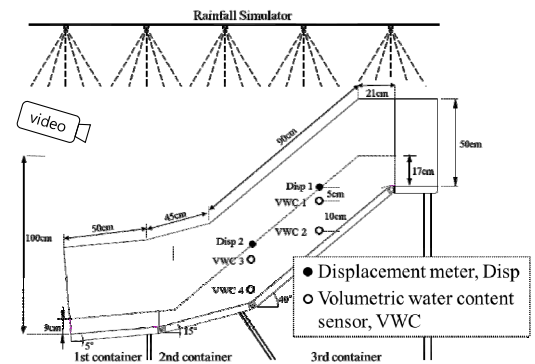


Fig. 3. Schematic diagram illustrating experimental set up with soil profiles

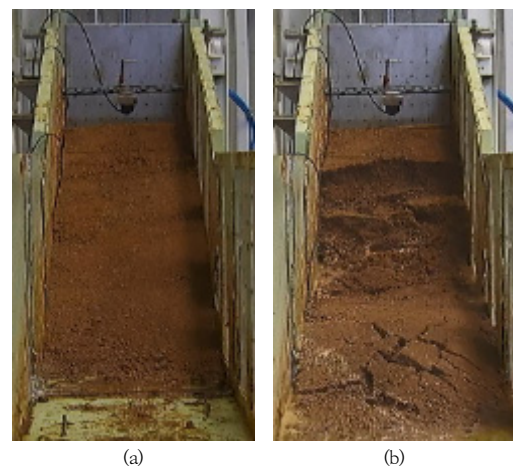


Fig. 4. The shallow failure test according to rainfall simulation  
(a) before failure (b) after failure

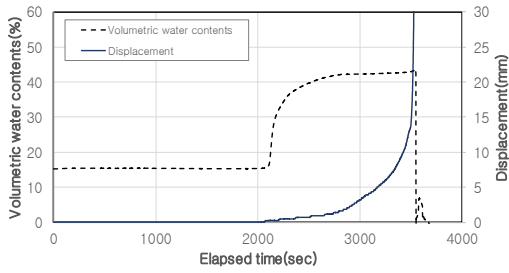


Fig. 5. Displacement behavior with increasing water content

Fig. 5는 강우침투로 인해 비탈면 내 함수비와 지표면 위의 변화를 나타낸 것이다. 함수비가 급격히 증가하는 시점부터 지표면위도 증가하기 시작하였으며 최대 함수비에 수렴한 후에도 지표면위는 지속적으로 증가하여 3 단계 크립 거동과 같이 급격한 변위 증가 후 최종 붕괴가 발생하였다. 이는 비탈면 내 흙이 침투수로 인해 완전히 포화되어 임계치의 함수비가 형성된 후 추가적인 외력이 존재하지 않은 상황에서 시간 경과에 따라 지표면위가 증가하는 크립 거동 형태를 나타낸 것이다[18].

한편 암석의 경우 압축 조건하의 변형률은 일정 하중에 도달하면 외력이 없는 상태에서도 변형이 발생하는 변형-연화(strain-softening)가 발생하게 되는데 이는 크립 거동과 개념적으로 매우 유사하다고 할 수 있다 [23-25].

Fig. 6은 변형-연화 곡선과 크립거동의 관계를 설명한 것이다. 압축하중 조건에서 암석의 변형은 다음의 5단계로 구분된다(Fig. 6(b)). (i) 균열 닫힘(OA), (ii) 탄성거동(AB), (iii) 균열발생(BC), (iv) 균열 파괴 및 불안정한 균열 성장, (v) 파괴(D), 파괴 후 거동(DE, EF)[26,27]. 점 C를 경계로 변형은 불안정한 상태로 성장하게 되고 암석의 강도에 해당하는 점 D 이후에는 응력의 영향없이 변형이 발생하게 되는데 크립 거동에서  $C_1 \sim F_1$  지점이 이와 같은 현상이라고 할 수 있다(Fig. 6(a)). 즉,  $C_1$ 은 불안정한 상태가 시작되는 지점, 점  $D_1$ 은 외력 등에 의해 비탈면이 물리적으로 붕괴가 발생한 지점이며, 이후  $D_1 \sim F_1$ 의 변위는  $D_1$  지점에 종속된 변위 거동이라 할 수 있다.

### 3. 변형-연화 거동 특성

변형-연화가 발생하는 물질의 전단응력  $\tau$ 와 변형율  $\epsilon$ 의 구성방정식은 Eq. (1)과 같이 표현된다[23].

$$\tau = G_s \times \epsilon \times \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

Where,  $G_s$ : shear modulus,  $\epsilon$ : strain,  $\epsilon_0$ : measured mean strain,  $m$ : Weibull's module(shape parameter)

Eq. (1)을 점 D에 대해 1계 미분하면 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta \tau}{\delta \epsilon} \Big|_{\epsilon = \epsilon_D} &= G_s \times \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \right] \\ &\times \left[ 1 - m \times \left( \frac{\epsilon_D}{\epsilon_0} \right)^{m-1} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Where,  $\epsilon_D$ : strain at point D

Eq. (2)를  $\epsilon_D/\epsilon_0$ 에 대해 정리하면 Eq. (3)과 같다.

$$\frac{\epsilon_D}{\epsilon_0} = \left( \frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (3)$$

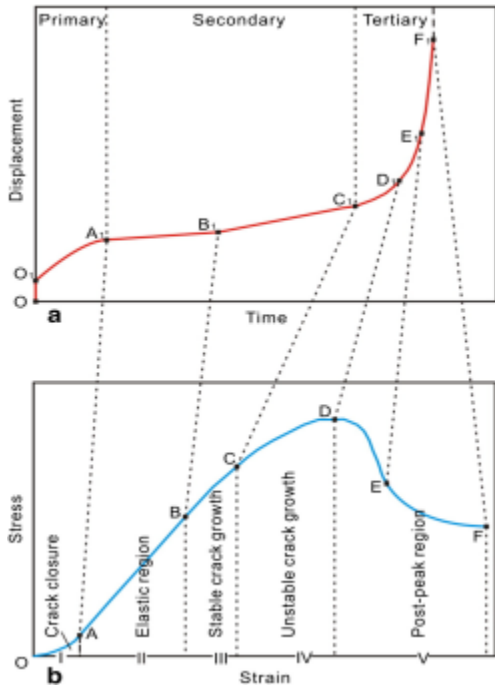


Fig. 6. Relationship between ideal creep rupture curve and ideal stress-strain curve of strain-softening materials(after [24])

동일한 과정으로 Eq. (1)을 2계 미분하면 점 E에 대해 Eq. (4)와 같이 정리된다.

$$\frac{\delta^2 \tau}{\delta \epsilon^2} \Big|_{\epsilon=\epsilon_E} = G_s \times m \times \frac{1}{\epsilon} \times \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

$$\times \left( \frac{\epsilon_E}{\epsilon_0} \right)^m \times \left[ m \times \left( \frac{\epsilon_D}{\epsilon_0} \right)^m - m - 1 \right] = 0$$

Where,  $\epsilon_E$ : strain at point E

Eq. (4)는 Eq. (5)와 같이 정리된다.

$$\frac{\epsilon_E}{\epsilon_0} = \left( \frac{m+1}{m} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

한편 점 C는 지반물질의 물리적 속성이 극적으로 변하기 시작하는 지점으로 알려져 있으며[25], 이 때의 점 C의 변형률을 Eq. (6)과 같이 표현된다[26].

$$\frac{\epsilon_C}{\epsilon_0} = \left( \frac{\ln 2}{2^m - 1} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

점 C와 점 D의 변형률 관계는 Eq. (3)과 Eq. (6)을 이용하면 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\epsilon_D}{\epsilon_C} = \left( \frac{2^m - 1}{m \times \ln 2} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

또한 점 C와 점 E의 변형률 관계는 Eq. (5)와 Eq. (6)에 의해 Eq. (8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\epsilon_E}{\epsilon_C} = \left[ \frac{(1+m) \times (2^m - 1)}{m \times \ln 2} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

점 C의 변형률이 결정되면 Eq. (7)과 Eq. (8)에 의해 점 D와 점 E의 변형률을 산정할 수 있게 된다.

Weibull 분포는 형상계수인  $m$ 에 지배를 받으며 다양한 모양으로 표현될 수 있는 특징을 가진다. 예를 들어  $m=1$ 이면 지수함수,  $m=2$ 이면 정규분포와 매우 유사한 형태가 된다.  $m$ 이 커질수록 취성 물질의 속성을 잘 나타내는 것으로 알려져  $m$ 은 'brittleness index'로 언급되기도 한다[28].

일반적으로 변형-연화 거동을 보이는 지반재료는  $m$  값이 1 이상이며 대규모의 지질 구조는  $m$ 이 1에서 3까지의 범위를 가진다고 알려져 있다[29]. 이 경우에 Eq. (7)과 Eq. (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_D \approx 1.48 \times \epsilon_C (\pm 0.03) \quad (9)$$

$$\epsilon_E \approx 2.59 \times \epsilon_C (\pm 0.25) \quad (10)$$

결과적으로 Eq. (9)와 Eq. (10)에 의해 점 C의 변위값이 결정되면 3차 크립 거동에 의해 붕괴가 발생하는 지점인 점 D와 점 E를 이론적으로 미리 예측할 수 있게 된다.

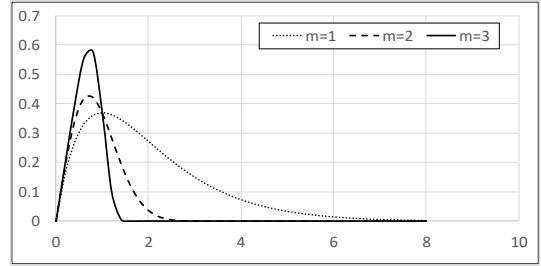


Fig. 7. Curves of Weibull's distribution for different  $m$ -values

## 4. 표층붕괴 예측 적용성 검토

### 4.1 점 C 결정 방법

변형-연화 거동 이론에서 점 C는 붕괴시점을 예측하는 기준이 되는 시점이지만 아직까지 점 C를 결정하는 방법은 정해져 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 점 C가 물질의 속성이 불안정해지기 시작하는 상태를 나타낸다는 점에 착안하여 단위 시간에 대한 변위량이 증가하는 지점을 이용하여 점 C를 선정하고자 하였다.

실내 실험에서 확보한 초당 변위발생량과 지표변위를 Fig. 8에 나타내었다. 인공강우로 인해 비탈면으로 침투된 물이 점차 지반의 안정성을 저하시키면서 비탈면 표면의 변위가 관찰되기 시작하는데 이 때의 변위는 0 ~ 1mm/sec 범위의 순간 변화를 나타낸다.

시간이 경과함에 따라 누적변위량이 증가하게 되고 6,270초에 2mm/sec 이상의 높은 순간 변위량이 발생하였다. 이후 최대 5mm/sec 까지 증가한 순간변위로 인해 누적변위량이 크게 증가하였는데 본 연구에서는 순간변위량이 명확히 증가하기 시작한 시점(6,270초 지점, 2mm/sec)을 점 C로 선정하였다(Fig. 8(a)). 점 C지점의 누적변위는 79mm가 발생하였다. 점 C의 변위를 기준으로 Eq. (9)와 Eq.(10)을 이용하여 산정된 점 D와 점 E의 누적변위는 각 116.92mm와 204.61mm로 나타났다(Fig. 9(b)). 실험과정을 촬영한 영상자료를 검토한 결과

점 C 지점부터 비탈면 표면에서는 인장균열이 관찰되었으며 점 E 에 이르러 매우 큰 규모의 인장균열이 발달하고 균열면을 경계로 이완된 토체의 움직임이 육안으로도 관찰되었다. 이후 비탈면의 형체가 완전히 부서지는 최종붕괴까지는 많은 시간이 소요되었는데 인장균열이 관찰된 시점부터 공학적으로 비탈면의 붕괴가 발생하기 시작했다고 할 수 있다. 즉, 점 E 이후의 변위 거동은 지반의 공학적 속성에 따라 다양한 형태로 발달할 수 있으므로 비탈면의 붕괴 위험을 예측하는 것을 점 C ~ 점 E 구간에서 결정하는 것이 합리적인 방법이라 할 수 있다.

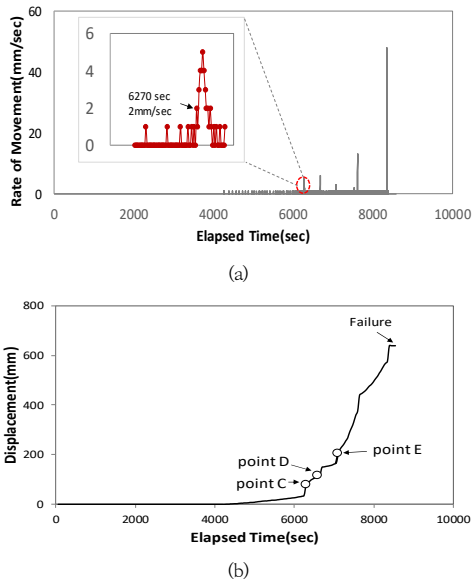


Fig. 8. The surface displacement behavior due to shallow failure (a) rates of displacement per second (b) displacement

#### 4.2 누적변위량을 고려한 붕괴지점 예측

변형-연화 거동을 이용한 붕괴시점 예측 방법은 점 C 지점의 변위량에 많은 영향을 받는다. 토조를 이용한 토사비탈면 붕괴모의 실험에서는 강우에 의해 지표면에 세굴이 발달하게 되고 이로 인해 붕괴와 무관한 지표변위가 발생할 수 있다[10]. Fig. 9는 본 연구에서 수행한 붕괴모의 실험 중 세굴로 인해 누적변위 1,536mm가 측정되었지만 붕괴가 발생하지 않은 모형 비탈면의 바닥면에 Fig. 10과 같이 침투수를 주입하여 붕괴를 유도한 실험 사례를 나타낸다.

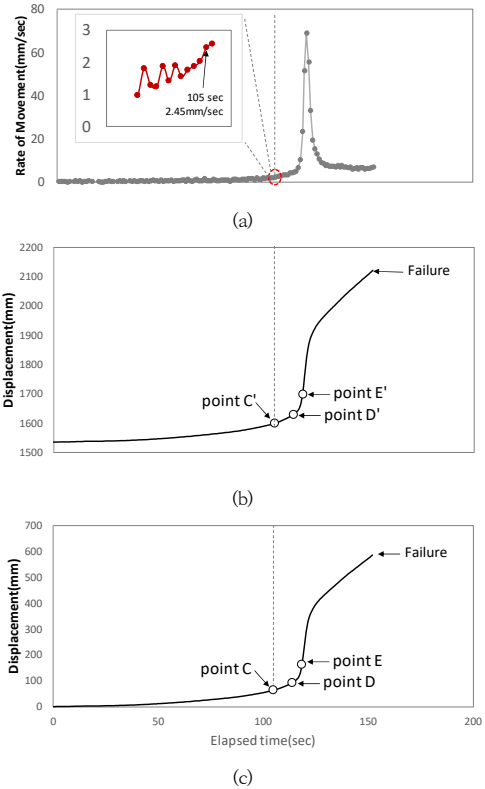


Fig. 9. Prediction of failure time with cumulative displacement (a) rates of displacement (b) cumulative displacement (c) net displacement of the slope failure

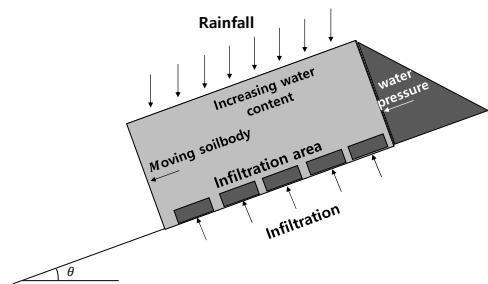


Fig. 10. Schematic diagram illustrating shallow failure

침투수를 유입한 시점부터의 변위는 Fig. 9(b)와 같다. 초당 변위량이 급격히 증가하기 시작하는 105초 (2.45mm/sec) 지점을 점 C로 선정한 경우 점 D와 점 E는 각각 2,366.4mm와 4,399.8mm로 산정되어 최종 붕괴 시의 변위값 2,120mm를 상회하는 큰 오차가 발생

하게 된다. 최종 붕괴와 연관이 없는 누적변위에 의한 오류를 제거하기 위해 Fig. 9(c)와 같이 침투수가 유입된 시점의 누적변위 1,536mm를 0mm로 가정하여 변위거동을 도시하였다. 초당 변위증가량이 급격히 증가하기 시작하는 105초 지점(Fig. 9(a))을 점 C로 선정하고 점 D와 점 E를 산정한 결과 각각 92.9mm, 162.7mm의 누적변위 발생 시점에서 붕괴를 예측할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 9.(c)). 이와 같이 산정된 붕괴 예측 지점에 누적변위 1,536mm를 더해 Fig. 9(b)에 다시 도시하면 붕괴를 예측할 수 있는 점 C' ~ 점 E' 구간을 도시할 수 있다.

### 5. 분석 결과 토의

비탈면 붕괴가 발생한 현장의 계측자료를 확보하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 이에 대한 대안으로 실내토조실험을 통해 비탈면 붕괴에 따른 지표변위 특성을 분석하는 많은 연구가 진행되어 왔는데[10,11], 최종 붕괴가 발생하기까지의 누적변위량은 실험토조의 규모에 따라 상당한 차이를 보였다. 이러한 현상을 실제 현장에 대입해보면 비탈면의 붕괴 규모에 따라 최종적으로 발생하는 누적변위량의 편차가 다양하게 발생한다고 할 수 있다. 따라서 변위량에 의존적인 기존의 변위 속도와 누적변위를 이용한 붕괴예측방법[13-18]은 실제 현장에서 보편적으로 사용하기에는 규모효과(scale effect)를 고려하지 못한다는 한계를 가진다.

한편 본 연구에서 검토한 변형-연화 거동 해석 방법은 누적변위에 영향을 받지 않고 붕괴와 연관된 지표변위 거동을 통해 붕괴예측이 가능하다는 점에서 현장에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다.

변형-연화 거동 해석방법은 붕괴와 직접적인 연관이 있는 변위거동에서 점 C의 선정을 통해 간편하게 붕괴예측이 가능한 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 붕괴모의실험 결과의 역해석을 통해 점 C를 결정하는 방법을 제시하고 붕괴와 연관된 변위구간에서 붕괴예측 결과의 적절성을 확인하였다. 이러한 결과를 일반화하기 위해서는 추가적인 붕괴모의실험과 실제 붕괴지역의 계측자료에 대한 분석을 통해 점 C의 선정방법과 변위구간 선정 방법을 고도화할 필요가 있을 것으로 판단된다.

또한 변형-연화 거동 해석방법은 기본적으로 지반의 변형률  $\epsilon$ 가 Weibull 분포를 따른다는 것에서 기인한 이론인데[30] 이는 주로 암반 비탈면을 대상으로 한 연구결

과이다. 본 연구에서는 암반과 토사 모두 붕괴시의 변위 거동이 3차 크립 형태로 유사하다는 점에 착안하여 토사 비탈면에 대한 변형-연화 거동이론의 적용성을 확인하였지만 보다 정밀한 붕괴예측을 위해서는 향후 토사의 변형 특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 6. 결론

본 연구에서는 3차 크립거동의 특성이 반영된 변형 연화 거동이론을 통해 토사비탈면의 지표변위를 이용한 붕괴예측 방법에 대해 분석하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 변형-연화 거동 해석 방법을 토사비탈면의 붕괴에 의한 지표변위를 대상으로 적용한 결과 붕괴에 임박한 시점을 예측하는 것이 가능하다는 것을 확인하였으며 점 C와 점 E 구간 사이에서 붕괴예측을 위한 계측관리기준을 설정하는 것이 합리적이라고 판단된다.
2. 토사비탈면의 경우 지표변위 내에서 지반의 불안정한 상태를 지시하는 점 C를 결정하기 위한 방법으로 단위 시간당 변위 증가 속도를 활용할 경우 유효한 붕괴예측이 가능한 것으로 판단된다.
3. 변형-연화 거동해석방법을 적용하기 위해서는 붕괴와 직접적인 연관이 있는 변위구간을 선정할 필요가 있으며 이 경우 선행 누적변위에 영향을 받지 않고 붕괴예측이 가능하다는 점에서 현장에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다.

### 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] T. Fukuzono, "A method to predict the time of slope

- failure caused by rainfall using the inverse number of velocity of surface displacement" *Journal of Japan Landslide society*, Vol.22, No.2, pp.8-13, 1985.  
DOI: [https://doi.org/10.3313/jls1964.22.2\\_8](https://doi.org/10.3313/jls1964.22.2_8)
- [5] B. Voight, "A relation to describe rate-dependent material failure", *Science*, Vol.243, No.4888, pp.200-203, 1989.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.243.4888.200>
- [6] D. N. Petley, F. Mantovani, M. H. Bulmer, A. Zannoni, "The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns", *Geomorphology*, Vol.66, No.1-4, pp.133-147, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.011>
- [7] Y. S. Oak, S. H. Shin, S. H. Kim, H. B. Koo, "Development of slope failure prediction interval model based on inverse velocity", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.49, No.2, pp.267-273, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.14770/jgsk.2013.49.2.267>
- [8] T. C. Cho, J. U. Suk, S. A. Lee, J. G. Um, "Investigation of rock slope failures based on physical model study", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.18, No.4, pp.447-457, 2008.
- [9] Federico, A., Popescu, M., Elia, G., et al., Prediction of time to slope failure: a general framework. *Environ. Earth Sci.* Vol.66 No.1, pp.245-256, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1231-5>
- [10] J. W. Suk, S. Y. Park, G. H. Na, 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: <http://doi.org/10.9720/kseg.2018.3.489>
- [11] M. Saito, "Evidential study on forecasting occurrence of slope failure" Trans. of the Dept. of Geomech.—Armenian Academy of Sciences URSS, Yerevan, 1979.
- [12] S. G. Choi, J. W. Suk, H. S. Jung, "Suggestion of measurement management criteria for soil slope failure based on displacement", *Journal of the Korea society of hazard mitigation*, Vol.21, No.1, pp.251-260, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.1.251>
- [13] National Disaster Management Research Institute (NDMI), Development of steep slope disaster Mitigation technology based on empirical experiments, 2019.
- [14] Q. Xu, Y. Yuan, Y. Zeng, R. Hack, "Some new pre-warning criteria for creep slope failure", *Science China Technological Sciences*, Vol.54, No.1, pp.210-220, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4640-5>
- [15] D. J. Cheon, Y. J. Park, S. H. Lee, J. S. Kim, D. Y. Jung, "The Development of landslide predictive system using measurement information based on u-IT", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.10, pp.5115-5122, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.10.5115>
- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT), Development and operation of road cut slope management system in 2004, 2004.
- [17] Ministry of Interior and Safety(MOIS), Guideline of steep-slope management, 2016
- [18] S. Q. Qin, J. J. Jiao, Z. G. Li, "Nonlinear evolutionary mechanisms of instability of plane-shear slope: catastrophe, bifurcation", chaos and physical prediction. *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol.39, No.1, pp.59-76, 2006.
- [19] Cannon S. H., Ellen S. D. "Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California", *California Geology 1985*, Vol. 38, No. 12, pp.267-272.
- [20] I. H. Son, Y. T. Oh, S. G. Lee. "A Study on Experimental Prediction of Landslide in Korea Granite Weathered Soil using Scaled-down Model Test". *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.6, pp.439-447, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.439>
- [21] Tsai, T. L., Chen, H. F. Effects of Degree of Saturation on Shallow Landslides Triggered by Rainfall. *Environmental Earth Sciences*, Vol.59, No.6, pp.1285-1295, 2010.
- [22] J. W. Suk, H. S. Song, H. S. Kang, H. J. Kim, "A Study on applicability of volumetric content to predict shallow failure", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20 No.12, pp.737-746, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.737>
- [23] B. S. Yoo, *A study of failure analysis methods based on real-time monitoring data for landslide warning system*, Ph.D dissertation, Kumoh National Institute of Technology, 2006.
- [24] L. Xue, S. Qin, G. Li, I. A. Oyediran, X. Pan, "New quantitative displacement criteria for slope deformation process: From the onset of the accelerating creep to brittle rupture and final failure", *Engineering Geology*, Vol.182, No.7, pp.79-87, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.007>
- [25] S. Q. Qin, X. W. Xu, P. Hu, Y. Y. Wang, X. Huang., X. H. Pan, "Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction" *Chinese journal of geophysics*, Vol.53, No.4, pp.611-626, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/cjg2.1531>
- [26] M. S. Paterson, *Experimental Rock Deformation — The Brittle Field*, Springer Verlag, Berlin, 1978.
- [27] R. F. Smalley, D. L. Turcotte, S. A. Solla, "A renormalization group approach to the stick-slip behavior of faults", *Journal of geophysical research atmospheres*, Vol.90, No.B2, pp.1894-1900, 1985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/JB090iB02p01894>



- [28] L. Xue, *Renormalization study on rock failure and its application to strong earthquake prediction*, Ph. D dissertation, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [29] H. Chen, S. Qin, L. Xue, B. Yang, K. Zhang, "A physical model predicting instability of rock slopes with locked segments along a potential slip surface" *Engineering Geology*, Vol.242, pp.34-43, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.012>
- [30] Weibull, W. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, Vol.13, No 2, pp. 293-297, 1951.

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

정향선(Hyang-Seon Jeong)

[정회원]



- 2016년 2월 : 부산대학교 토목공학과(공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 선임연구원

<관심분야>

지반공학

송호성(Hyo-Sung Song)

[정회원]



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

<관심분야>

지반공학, 지질공학

최선규(Sun-Kyu Choi)

[정회원]



- 2008년 6월 : 경북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 경북대학교 건설환경에너지공학부 (공학박사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 선임연구원

<관심분야>

지반공학

정민수(Min-Su Jung)

[정회원]



- 2008년 3월 : Kobe대학 자연과학연구과 (공학박사)
- 2008년 4월 ~ 2011년 1월 : Kobe대학 시민공학과 학술추진연구원
- 2011년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국건설기술연구원 박사후 연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구관

<관심분야>

지반공학