

강우침투에 대한 불포화 토사사면의 확률론적 안정해석

Probabilistic Stability Analysis of Unsaturated Soil Slope under Rainfall Infiltration

조 성 은¹ Cho, Sung-Eun

Abstract

The slope failure due to the rainfall infiltration occurs frequently in Korea, since the depth of the weathered residual soil layer is shallow in mountainous region. Depth of the failure surface is shallow and tends to pass near the interface between impermeable bedrock and soil layer. Soil parameters that have a significant impact on the instability of unsaturated slopes due to rainfall infiltration inevitably include large uncertainties. Therefore, this study proposes a probabilistic analysis procedure by Monte Carlo Simulation which considers the hydraulic characteristics and strength characteristics of soil as random variables in order to predict slope failure due to rainfall infiltration. The Green-Ampt infiltration model was modified to reflect the boundary conditions on the slope surface according to the rainfall intensity and the boundary condition of the shallow impermeable bedrock was introduced to predict the stability of unsaturated soil slope with shallow bedrock under constant rainfall intensity. The results of infiltration analysis were used as inputs of infinite slope analysis to calculate the safety factor. The proposed analysis method can be used to calculate the time-dependent failure probability of soil slope due to rainfall infiltration.

요 지

우리나라의 산지사면은 풍화잔류토 층의 깊이가 얇아 강우의 침투로 인한 사면파괴가 많이 발생한다. 이때 파괴면의 깊이는 얇고 토사층과 기반암의 경계면 근처를 통과하는 특징을 가지고 있다. 강우의 침투로 인한 불포화 토사사면의 불안정성에 중요한 영향을 미치는 지반 정수들은 큰 불확실성을 포함한다. 따라서 본 연구에서는 강우로 인한 사면파괴를 예측하기 위하여 지반의 수리학적 특성과 강도특성을 랜덤변수로 고려하는 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 확률론적 해석 절차를 제안하였다. 일정한 강우강도에 대한 기반암이 얇게 존재하는 불포화 토사사면의 안정성 예측을 위하여 강우강도에 따른 사면 표면에서의 경계조건을 반영하여 Green-Ampt 모델을 수정하고 얇은 기반암의 경계조건을 도입하였다. 침투해석의 결과를 무한사면 해석에 적용하여 안전율을 계산하였다. 제안된 확률론적 해석법은 강우의 침투에 따른 사면의 시간 의존적 파괴확률을 계산할 수 있다.

Keywords : Green-Ampt model, Rainfall infiltration, Unsaturated soil, Monte Carlo Simulation

¹ 정회원, 한경대학교 토목안전환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Safety, and Environmental Engrg. & Construction Engrg. Research Institute, Hankyong National Univ., Tel: +82-31-670-5149, Fax: +82-31-678-4674, drsecho@hanmail.net, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

강우의 침투에 의하여 세계적으로 많은 사면파괴가 발생하고 있다. 산지가 많은 우리나라도 집중강우에 의한 산사태로 많은 인명과 재산 피해를 입고 있다. 강우에 의한 사면파괴는 침투에 의한 함수비 증가에 따라 지반의 전단력이 증가하고 전단강도가 감소하면서 발생하며 주로 파괴면의 깊이가 얇고 지표면과 평행한 얇은 파괴의 특징을 나타낸다. 우리나라의 산지 사면은 대부분이 얇은 깊이의 풍화토로 형성되어 있어 파괴면이 토사층과 기반암의 경계를 따라 형성되는 경향이 있다.

강우의 침투를 고려한 사면의 안정해석은 예보된 강우에 대한 침투해석을 수행하는 수리학적 침투 모델링과 침투 모델링 결과를 이용하여 사면의 안전율을 계산하는 사면안정 해석 부분으로 나뉜다. 강우에 의한 사면파괴는 침투에 의해 풍화영역이 임계 깊이에 도달하여 발생하는 경우와, 지하수 상승에 의한 유효응력 감소로 발생하는 경우로 크게 구분할 수 있다(Jeong et al., 2009). 여러 조사결과에 의하면 호우로 인한 지하수위의 변동은 1m 이내인 경우가 대부분이며, 폭우 시 활동을 일으키는데 중요한 역할을 하는 간극수압은 영구지하수위의 상승으로 기인되는 것이 아니고 강우 시 불포화 영역에서 일시적으로 형성되는 임시 지하수위(perched water table) 때문인 것으로 알려져 있다(Kim, 1994). 불투수성의 기반암 위에 풍화토층이 존재하면 강우의 침투에 의해 기반암 위로 지하수위가 상승하고 이로 인한 간극수압의 증가가 사면파괴의 주요 원인이 된다.

강우의 침투를 고려한 사면안정 해석은 일반적으로 각각의 지층이 균질하다는 가정 아래 흙의 물성값을 하나의 상수로 표현하는 결정론적 방법으로 수행한다. 그러나 지반의 특성을 나타내는 지반정수들은 필연적으로 불확실성을 나타내므로 강우의 침투를 고려한 사면안정 해석의 결과는 변동성을 포함하게 된다. 이러한 지반의 불확실성으로 인한 변동성을 고려하여 강우의 침투에 대한 사면안정을 해석하는 연구가 최근 수행되고 있다(Yoo et al., 2001; Srivastava et al., 2010; Santoso et al., 2011; Zhu et al., 2013; Jeon et al., 2013; Cho, 2014).

불포화 토사사면의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 포화투수계수(k_s)의 변동성을 랜덤필드 이론으로 고려하여 수치해석을 반복적으로 수행함으로써 파괴확률을 계산하는 MCS(Monte Carlo Simulation) 기

반의 연구들이 수행되었다(Srivastava et al., 2010; Santoso et al., 2011; Zhu et al., 2013; Cho, 2014). 그러나 FEM이나 FDM 등의 수치해석기법을 이용하는 이들 방법에는 해석시간이 많이 소요되므로 사면안정에 영향을 미치는 다양한 지반정수들의 변동성을 모두 고려하는데 어려움이 있다.

Zhang et al.(2014)은 Green-Ampt 침투모델을 이용하여 강우에 의한 사면파괴의 확률을 계산하는 방법을 제안하고 강우 시 시간에 따른 파괴확률을 예측하기 위해 MCS를 수행하였다. 그러나 이 방법은 Green-Ampt 모델의 한계로 인하여 강우강도가 지반의 포화투수계수보다 작은 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 일정한 강우강도에 대한 침투거동을 해석할 때 포화투수계수의 변동성에 따라 지표면에서 적용하는 경계조건이 달라지는 점을 고려하기 위해 Dou et al.(2014)은 강우강도가 지반의 포화투수계수보다 작은 조건에도 사용할 수 있도록 Green-Ampt 침투모델을 확장하여 확률론적 해석을 수행하였다.

Zhang et al.(2014)과 Dou et al.(2014)은 Green-Ampt 침투모델을 기반으로 지반의 변동성을 효율적으로 고려할 수 있는 확률론적 해석기법을 제안했지만 주로 포화투수계수의 영향을 고려하였으며, 무한히 깊은 토층에서의 침투만을 고려하여 기반암의 깊이가 얇은 토사사면의 경우에는 적용할 수 없다.

본 연구에서는 일정한 강우강도에 대하여 기반암 위에 존재하는 토사사면의 파괴를 예측하기 위한 MCS 기반의 확률론적 사면파괴 해석기법을 개발하였다. 지표면에서의 강우강도가 침투능보다 작은 풍화토층을 고려하기 위하여 강우강도가 지반의 포화투수계수보다 작은 조건을 반영하여 Green-Ampt 침투 모델을 개선하고 하부 불투수성 기반암의 경계조건을 도입하였다. 사면의 침투해석 결과를 무한사면 해석과 조합하여 확률론적 해석을 수행함으로써 강우의 침투에 의한 불포화 토사사면의 시간에 따른 파괴확률을 계산하였다.

2. 확률론적 해석

2.1 MCS 기반의 확률론적 해석

확률론적 해석의 문제는 기본 랜덤변수들의 벡터 $\mathbf{X}=[X_1, X_2, \dots, X_n]$ 로 정식화되며, 설계변수의 공간에서 안전과 파괴의 경계를 정의하는 한계상태함수 $g(\mathbf{X})$ 는

이들 랜덤변수들에 의해 정의된다(Cho, 2014). 이때 파괴확률은 다음과 같이 파괴영역에 대하여 수행되는 다차원의 적분식으로 표현된다.

$$P_f = P[g(\mathbf{X}) \leq 0] = \int_{g(\mathbf{X}) \leq 0} f_{\mathbf{X}} d\mathbf{X} \quad (1)$$

여기서, $f_{\mathbf{X}}$ 는 랜덤벡터 \mathbf{X} 의 결합확률밀도함수(joint probability density function)이다.

식 (1)의 정확한 해를 얻을 수 있는 유일한 보편적인 방법인 MCS는 식 (1)을 계산하기 위하여 확률변수들의 확률분포특성이 반영된 난수를 발생하여 표본 집단을 생성한 후, 한계상태식을 계산하고 이 과정을 충분한 수만큼 반복하여 파괴확률을 추정한다(Cho, 2014).

2.2 시간 의존적 파괴확률

강우의 침투를 고려한 사면의 안정은 시간 의존적인 문제이다. 파괴확률 $P_f(t)$ 는 시간 t 의 함수로 표현되는 다음과 같은 한계상태함수로부터 계산할 수 있다.

$$g(\mathbf{X}, t) = F_s(\mathbf{X}, t) - 1.0 \quad (2)$$

여기서, F_s 는 시간에 따른 사면의 안전율이다.

$P_f(t)$ 는 시간 t 에서 사면이 파괴상태에 있을 확률을 나타내므로 사면파괴가 발생하는 시점이 t 보다 작은 확률을 의미한다고 할 수 있다. 즉 $P_f(t)$ 는 시간 t 에서 사면의 누적파괴확률(cumulative failure probability)을 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_f(t) = P(t_f \leq t) \quad (3)$$

여기서, t_f 는 사면의 파괴가 발생하는 시간이다. 따라서 t_f 의 확률밀도함수(probability density function, PDF)는 다음과 같이 계산된다(Zhang et al., 2014; Dou et al., 2014).

$$f(t_f = t) = \frac{dP(t_f \leq t)}{dt} = \frac{dP_f(t)}{dt} \quad (4)$$

여기서 시간에 따라 사면이 파괴될 가능성을 의미하는 t_f 의 확률밀도함수(PDF)는 시간에 따른 사면의 파괴확률곡선($P_f(t)$ - t 관계 곡선)의 기울기로 구해진다.

3. 한계상태함수의 계산

3.1 강우 침투 평가모델

강우의 침투로 인한 사면파괴의 유발 조건 중 가장 중요한 요인은 침투로 인한 지반에서의 간극수압의 변화와 같은 수리학적 거동이다. 따라서 지반을 통한 강우의 침투거동을 파악하는 것은 사면의 안정성 평가에 있어 매우 중요하다. 실제로 다양한 침투 모델들이 사면의 침투거동 해석에 사용되었다(e.g., Pradel and Raad, 1993; Cho and Lee, 2002; Kim et al., 2013; Zhang et al., 2014).

Green and Ampt(1911)는 지반의 침투능을 해석적으로 구하기 위해 지표면이 완전 포화상태인 폰딩(ponding) 조건에 대하여 1차원 연직 흐름의 간략해를 제안하였다. 침윤전선이 명확하게 존재하는 피스톤 모양의 함수량분포를 가정하는 이 모델은 1차원 연직 흐름, 침윤전선에서의 일정한 모관흡수력, 그리고 침윤전선 위에서의 함수량 결손 $\Delta\theta$ (습윤상태가 되기 전과 후의 체적함수비 차이)와 투수계수 k_s 가 일정하다는 가정을 바탕으로 하고 있다(Cho, 2015).

침투식을 유도하기 위한 일반화된 Darcy의 법칙에서 불포화 상태의 투수계수는 모관흡수력 또는 포화도에 따라 변한다. 이러한 관계를 의미하는 투수계수함수를 나타내기 위하여 많은 함수들이 제안되었다. 본 연구에서는 다음과 같이 유효포화도 S_e 로 표현되는 van Genuchten-Mualem 모델(Mualem, 1976; van Genuchten, 1980)을 사용하였다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (5)$$

$$k = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

여기서, $m = 1 - 1/n$, $n > 1$, ψ 는 모관흡수력, θ 는 체적함수비, θ_r 는 잔류 체적함수비, θ_s 는 포화체적함수비, m , n , α 는 변수이며, k 는 투수계수, k_s 는 포화투수계수이다.

포화투수계수의 불확실성이 고려되는 확률론적 해석에서 일정한 강우강도가 사면의 표면에 작용하면 포화투수계수의 크기에 따라 지표면에서의 경계조건을 다르게 적용하여야 한다. 본 연구에서는 토사층의 깊이가

얇은 지반조건을 고려할 수 있도록 기반암 경계조건을 적용한 Green-Ampt 침투모델(Cho, 2015)을 포화투수계수의 변동성에 따라 경계조건을 적용할 수 있도록 수정하였다.

3.1.1 강우강도가 지반의 포화투수계수보다 큰 경우 ($p > k_s$)의 경사면에서의 침투

처음 제안된 이후로 Green-Ampt 모델은 실제 침투거동의 반영을 위하여 지속적으로 개선되었다(e.g., Mein and Larson, 1973; Chen and Young, 2006). Chen and Young(2006)은 수평 지반에 적용되는 침투모델인 Green-Ampt의 식을 경사진 지표면에 적용하였다. p 의 일정한 강우강도가 연직방향으로 작용하면 기울기 β 인 사면 표면에 수직하게 작용하는 강우강도는 $p \cos \beta$ 이다. 폰딩이 발생하기 전($t \leq t_p$)에는 모든 강우가 침투하므로 사면에 수직방향으로의 누적 침투량 $F(t)$ 다음과 같다.

$$F(t) = i \cdot t = p \cos \beta \cdot t \quad (7)$$

여기서, p 는 연직방향의 강우강도, i 는 지표에 수직 방향의 강우강도이다.

폰딩은 지반의 침투능이 강우강도와 같아질 때 발생하며 폰딩 발생 시의 누적 침투량 F_p 는 다음과 같이 계산된다.

$$F_p = \frac{\Delta \theta \psi_f k_s}{(p - k_s) \cos \beta}, \quad p > k_s \quad (8)$$

여기서, ψ_f 는 지반의 초기 모관흡수력 ψ_i 와 흙의 상대 투수계수함수(relative permeability function) k_r 로부터 식 (9)에 의해 결정되는 침윤전선에서의 모관흡수력이다(Mein and Farrel, 1974).

$$\psi_f = \int_0^{\psi_i} k_r(\psi) d\psi \quad (9)$$

따라서 폰딩이 발생하는 시간 t_p 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_p = \frac{F_p}{p \cos \alpha} = \frac{\Delta \theta \psi_f k_s}{p(p - k_s) \cos^2 \beta} \quad (10)$$

Darcy의 법칙으로부터, 폰딩이 발생한 후의 경사면의 표면에 대한 침투율은 다음과 같다.

$$j = \frac{dF}{dt} = k_s \left[\frac{z_f^* \cos \beta + \psi_f}{z_f^*} \right] \quad (11)$$

여기서, z_f^* 는 사면 표면에 수직한 방향으로의 침윤전선의 깊이, $z_f^* \cos \beta$ 는 침윤전선에서의 위치수두이다.

지표면에 수직한 방향으로의 누적 침투량 F 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = (\theta_s - \theta_i) = \Delta \theta z_f^* \quad (12)$$

여기서, θ_i 는 초기상태의 체적함수비이다.

시간 의존적인 사면의 안전율을 계산하기 위해서는 강우 시간에 따라 누적 침투량을 계산하고 연직방향의 침투깊이를 구해야 한다. 연직방향의 침투깊이 z_f 는 누적 침투량으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z_f(t) = z_f^* / \cos \beta = F(t) / (\Delta \theta \cos \beta) \quad (13)$$

식 (13)을 식 (11)에 대입하면 침투율은 다음과 같다.

$$j = \frac{dF}{dt} = k_s \left[\cos \beta + \frac{\Delta \theta \psi_f}{F(t)} \right] \quad (14)$$

식 (14)를 시간에 대하여 적분하면 시간에 따른 누적 침투량을 구할 수 있는 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$k_s t = \frac{F(t)}{\cos \beta} - \frac{\Delta \theta \psi_f}{\cos^2 \beta} \ln \left[\frac{F(t) \cos \beta + \Delta \theta \psi_f}{\Delta \theta \psi_f} \right] \quad (15)$$

Green-Ampt 침투모델은 균질한 지반에서 반무한 연직 1차원의 침투를 가정하므로 지표 근처에 존재하는 불투수성의 기반암을 고려하지 못한다. 기반암 상부의 토사층을 통한 1차원 침투에서 침윤전선은 기반암에 도달할 때까지 아래로 진행하며 기반암에 도달한 후 침투는 멈춘다. 불투수성의 기반암이 존재하는 사면의 시간에 따른 침투거동 해석법은 Cho(2015)에 의해 제시되었다.

3.1.2 강우강도가 지반의 포화투수계수보다 작은 경우($p \leq k_s$)의 경사면에서의 침투

지하수위가 깊은 곳에 위치하면 지하수위 상부의 흙은 정상상태의 간극수압 분포를 보여 지하수위로부터 거리에 비례하는 음의 간극수압을 갖는다. 그러나 지하수위로부터 거리가 먼 지표 근처의 흙은 지표에 작용하는 강우에 의한 영향을 받아 큰 음의 간극수압을 갖기 어려우므로 Fig. 1과 같이 지표로부터 일정 깊이까지 모관흡수력이 일정한 분포를 갖는 것으로 가정할 수 있다. 일정한 모관흡수력 분포를 고려하는 침투모델은 Cho (2017b)에 의해 제안된 지하수위로부터 거리에 비례하는 모관흡수력 분포를 고려한 침투모델의 특별한 경우로 고려할 수 있다.

지표에서 흙으로 유입되는 정도를 나타내는 강우강도와 흙속으로 침투되는 정도를 나타내는 투수계수의 비교를 통하여 지반의 침투 거동을 유추할 수 있다(Cho, 2009).

기반암 위에 존재하는 토사층의 포화투수계수보다 작

은 강우강도가 작용하면 강우는 모두 침투하게 되고, 강우가 기반암에 도착한 후에도 흙의 불포화 상태가 유지된다. 이후 흙과 기반암의 경계로부터 강우가 여분의 간극을 완전히 채우며 상향으로 진행하게 된다(Fig. 1). 즉, 침윤선이 기반암에서 상부 토사층으로 반사되는 것 같은 현상이 발생하게 되어 완전 포화영역이 상부로 확장되고 결국에는 상부 토층이 완전포화 상태에 도달하게 된다(Cho, 2009). 침투 모델링을 위해서 침투과정을 다음과 같이 개념적으로 몇 단계로 구분하였다.

1) 강우의 시작부터 강우가 기반암과 지층의 경계에 도달하는 시간 t_b 까지($0 < t < t_b$)

강우강도 p 가 지반의 침투능보다 작아 모든 강우가 지반으로 침투하므로 침투율과 사면에 수직방향인 누적 침투량은 다음과 같다.

$$j = i = p \cos \beta, \quad F(t) = i \cdot t = p \cos \beta \cdot t \quad (16)$$

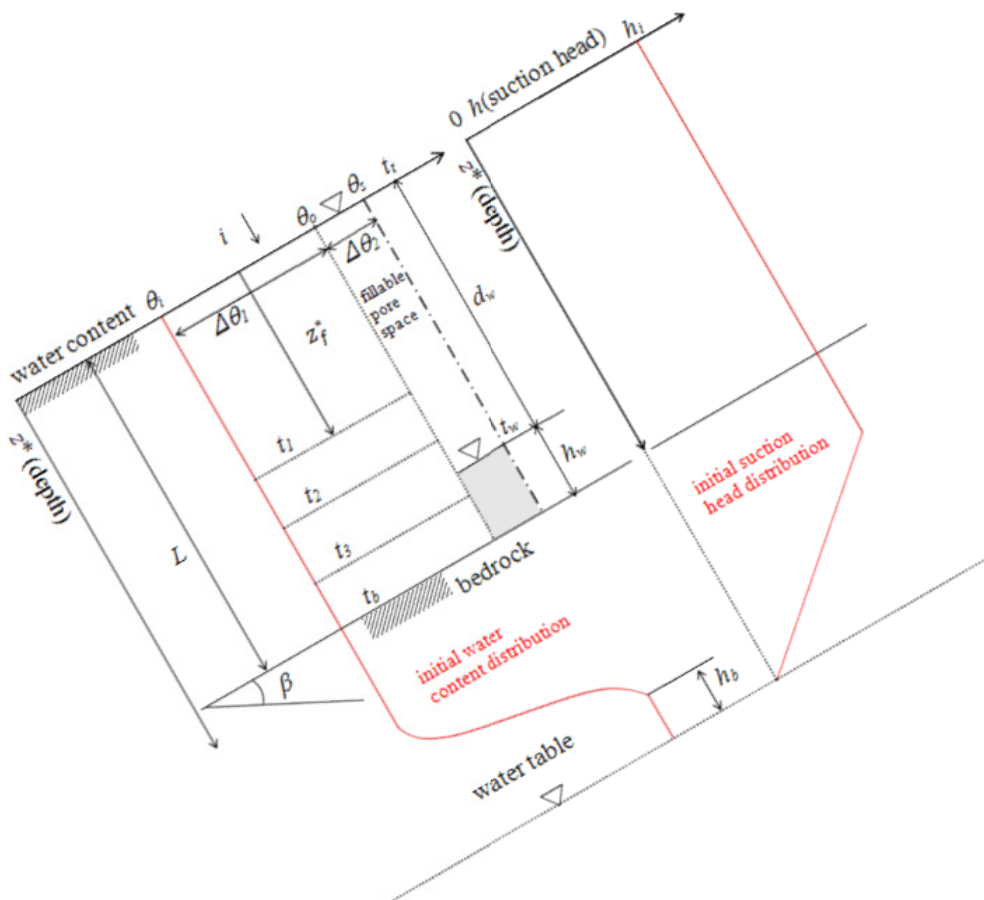


Fig. 1. Conceptual water content profile for slope with impermeable bedrock for non-ponded infiltration ($h_b = \psi_b / (\gamma_w \cos \beta)$), where ψ_b is the air-entry value; $L = D \cos \beta$, where D is the vertical distance to bedrock)

침투한 강우가 기반암에 도달하는 시간 t_b 까지 지표면에 수직인 방향으로의 누적 침투량 F 는 다음과 같다.

$$F = \Delta\theta_1 L = p \cos\beta \cdot t_b \quad (17)$$

따라서 t_b 는 다음과 같이 결정된다.

$$t_b = \frac{\Delta\theta_1 L}{p \cos\beta} = \frac{\Delta\theta_1 L}{i} \quad (18)$$

여기서, 사면의 초기 체적함수비 θ_i 와 강우 침투 후 함수비 θ_o 로부터 지반이 흡수할 수 있는 함수비 $\Delta\theta_1 = \theta_o - \theta_i$ 를 계산할 수 있다.

이때는 지표면이 완전한 포화상태에 도달하지 않아 흙의 체적함수비가 포화상태의 체적함수비 θ_s 와 다르므로 강우강도 $i = p \cos\beta$ 에 대응하는 체적함수비 θ_o 를 결정해야 한다. 지표면에 강우가 내리면 침윤전선이 형성되고 Darcy의 법칙에 따라 물이 흐른다. 초기 불포화상태에서는 투수계수가 강우강도보다 작으므로 물이 흐르기 위해서 침윤전선 부근의 동수경사가 커진다. 그러나 침윤전선이 진행함에 따라 침윤전선 상부의 동수경사는 1로 수렴하고 지반의 투수계수는 강우강도와 같아지게 된다(Cho, 2017a). 따라서 Fig. 2와 같이 지반의 투수계수함수로부터 강우강도와 같은 크기의 투수계수에

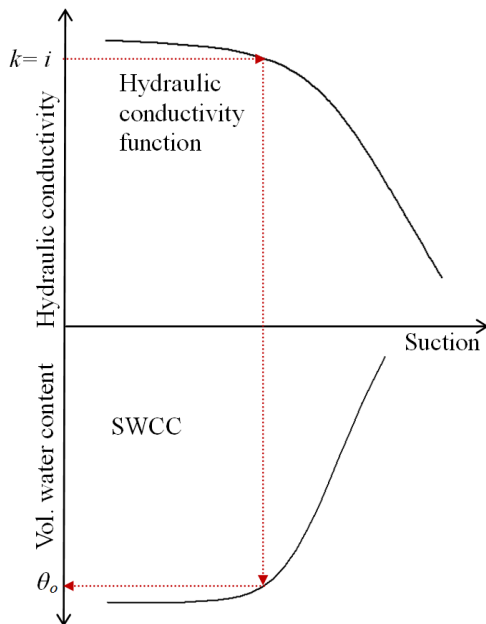


Fig. 2. Determination of volumetric water content, θ_o corresponding to applied rainfall intensity i (Cho, 2017a)

대응하는 모관흡수력을 구하고 이 모관흡수력에 대응하는 함수비 θ_o 를 함수특성곡선으로부터 얻을 수 있다.

$0 < t < t_b$ 인 임의의 시간 t 에서의 연직방향의 침투깊이 z_f 는 다음과 같다.

$$z_f = \frac{F(t)}{\Delta\theta_1 \cos\beta} = \frac{p \cdot t}{\Delta\theta_1} = \frac{i \cdot t}{\Delta\theta_1 \cos\beta} \quad (19)$$

2) 완전 포화영역의 상향 전파로 인한 지표면에서의 폰딩 발생시간 t_i 까지($t_b < t < t_i$)

간략화를 위하여 기반암을 완전 불투수로 가정하면 강우가 토층과 기반암의 경계면에 도달한 후, 하부지층으로 침투하지 못하고 축적되므로 경계면에서 흙은 완전 포화상태에 도달하고 지표면을 향해 포화영역이 확산하게 된다. t_b 로부터 포화영역이 지표면에 도달하는 t_i 까지 하부 지층으로 침투하지 못하고 축적되는 강우의 양은 $i(t_i - t_b)$ 이며 토사층이 추가적으로 흡수할 수 있는 물의 양은 $\Delta\theta_2 L$ 이다. 축적되는 강우가 토사층의 여분의 간극을 모두 채우면 지표면 폰딩이 발생하게 되므로 t_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = t_b + \frac{\Delta\theta_2 L}{p \cos\beta} = t_b + \frac{\Delta\theta_2 L}{i} \quad (20)$$

여기서, $\Delta\theta_2 = \theta_s - \theta_o$ 이다.

$t_b < t < t_i$ 인 임의의 시간 t 에서 기반암 위로의 연직방향의 지하수위 상승 h_z 는 다음과 같이 계산된다.

$$h_z = \frac{h_w}{\cos\beta} = \frac{p(t - t_b)}{\Delta\theta_2} = \frac{i(t - t_b)}{\Delta\theta_2 \cos\beta} \quad (21)$$

여기서 h_w 는 지표면에 수직인 지하수위 상승이다(Fig. 1).

지하수위가 지표면에 이르러 토층이 모두 완전 포화상태에 도달하면 더 이상 침투는 발생하지 않으며 강우는 모두 표면에서 유출된다.

3.2 사면안정 해석

강우에 의한 사면파괴는 무한사면 해석법으로 해석할 수 있다. Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하면 Fig. 3의 무한사면에 대한 안전율 F_s 는 다음과 같다(Cho and Lee, 2002).

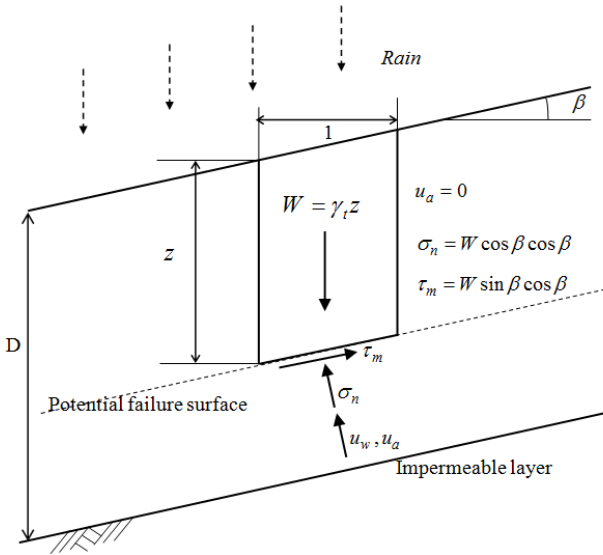


Fig. 3. Stability analysis of an infinite slope with impermeable bedrock (Cho, 2014)

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{W \sin \beta \cos \beta} \quad (22)$$

여기서, τ_f 는 전단강도, c' 는 유효 점착력, σ' 는 유효 수직응력이며 ϕ' 는 유효 마찰각, τ_m 은 파괴면에서의 전단응력, β 는 사면의 경사각, W 는 흙 절편의 무게이다.

유효응력의 개념을 불포화 토질역학의 범위까지 확장하기 위하여 다음과 같은 유효응력식이 제안되었다 (Lu and Likos, 2006; Lu and Godt, 2008).

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) - \sigma^s \quad (23)$$

여기서, u_a 는 간극 공기압, σ_n 은 흙의 자중에 의한 총 응력이다.

σ^s 는 다음과 같이 나타낼 수 있는 흡수응력특성곡선으로 정의된다(Lu and Godt, 2008).

$$\sigma^s = -S_e(u_a - u_w) \quad (24)$$

$$\sigma^s = S_e u_w < 0 \text{ for unsaturated conditions } (u_w < 0)$$

$$\sigma^s = u_w \geq 0 \text{ for saturated conditions } (u_w \geq 0)$$

여기서, u_w 는 간극수압이다.

강우가 기반암에 도달한 후 지하수위가 상승하면 수면 아래는 정수압 상태이므로 토층과 기반암의 경계면에서의 간극수압은 $u_w = \gamma_w h_z \cos^2 \beta$ 이다. γ_w 는 물의 단

위중량이다.

수정 유효응력 개념을 도입하면 깊이 z 에서의 안전율은 다음과 같다.

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_t z \cos^2 \beta - \sigma^s) \tan \phi'}{W \sin \beta \cos \beta} \quad (25)$$

강우침투에 따라 증가하는 단위중량을 고려하기 위해서 단위 면적당 흙기둥의 무게 W 는 γ_t 를 가상 파괴면에서 지표면까지 연직방향으로 적분하여 구할 수 있다. 지반을 깊이에 따른 일정한 크기의 요소로 분할할 경우 W 는 파괴면 위의 무게의 합으로부터 구할 수 있다(Cho, 2014).

$$W = \int_0^z \gamma_t dz = \int_0^z (\gamma_d + \theta(z) \gamma_w) dz \quad (26)$$

여기서, γ_d 는 흙의 건조단위중량이다.

안전율 분포를 계산하기 위하여 침투 해석에서 구한 간극수압 분포를 사용하며, 임의의 시간에서 최소 안전율은 식 (25)에 의해 깊이별로 계산된 안전율 중 가장 작은 값으로 정의한다(Cho, 2017a).

4. 제안된 확률론적 사면안정 해석기법의 적용

불포화 상태에서 지반의 수리학적 특성을 나타내는 변수의 불확실성은 사면의 거동과 연관되는 간극수압과 유효응력에 직접적인 영향을 미치므로 함수특성곡선의 변수들과 포화투수계수를 랜덤변수로 고려하였다. 또한 사면안정 해석은 수리학적 특성 뿐 아니라 전단강도에도 영향을 받으므로 지반의 전단강도 정수도 랜덤변수로 고려하여 제안된 확률론적 사면안정 해석기법을 적용하였다.

4.1 지반물성과 해석조건

Table 1은 침투해석에 사용된 물성치를 나타내며 Table 2는 사면안정 해석에 사용된 물성치를 나타낸다. 포화투수계수는 우리나라의 화강풍화토에 대하여 개발된 포화투수계수 추정 경험식(Yoon et al., 2015)으로부터 추정되었으며 함수특성곡선은 압력판추출시험기(Volumetric Pressure Plate Extractor) 시험으로부터 얻어졌다. 흙의 수

Table 1. Soil parameters used for seepage analysis

	θ_s	θ_r	α (kPa ⁻¹)	n	k_s (m/s)
Mean	0.355	0	0.410 (0.040 cm ⁻¹)	1.120	2.85×10 ⁻⁵ (10.26 cm/h)
COV (%)	21.6	-	35.2	12.0	77.9
Distribution	Normal	-	Lognormal	Shifted lognormal	Lognormal

Table 2. Input parameters used for slope stability analysis

	γ_d (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	β (°)
Mean	17.01	12.1	28.0	35
COV (%)	-	20	10	-
Distribution	-	Lognormal	Lognormal	-

리학적 특성을 표현하기 위하여 van Genuchten-Mualem 모델의 식 (5)와 식 (6)을 사용하였다. 해석은 불투수성의 기반암 위에 연직깊이 2m 두께로 존재하는 토사 사면을 기본으로 강우강도를 표면에 적용하는 방식으로 수행하였다. 시간 의존적인 강우의 침투를 모델링하기 위해서는 수리학적 초기조건이 지정되어야 한다. 본 연구에서는 지반의 특성과 우기 중임을 고려하여 지반의 초기 모관흡수력은 깊이에 따라 일정한 20kPa의 값을 갖는 것으로 적용하였다.

확률론적 해석을 위해서는 불포화 지반정수에 대한 확률론적 특성연구가 선행되어야 하나 불포화 수리특성의 통계적 분석에 대한 연구(e.g., Carsel and Parrish, 1988; Sillers and Fredlund, 2001; Phoon et al., 2010; Jeon et al., 2012)는 많지 않은 형편이다. Table 1에 나타난 바와 같이 식 (5)의 함수특성을 나타내는 변수 중 잔류체적함수비 θ_r 은 사질토에서 0에 가까우며 변동성이 매우 작으므로 결정론적으로 고려하였고, 변수 n 은 하한값이 1.0이므로 이동 대수정규분포(shifted lognormal Distribution)를 적용하여 1.0 이하의 값이 샘플링되지 않도록 하였다. 랜덤변수들의 샘플링을 위해서는 변수들

간의 상관성을 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 연구결과로부터 사질토에 대한 자료를 바탕으로 해석에 사용된 지반정수의 확률론적 특성치를 결정하였다. Table 3은 고려된 랜덤변수들 사이의 상관계수(correlation coefficient)를 나타내며 수리학적 물성을 나타내는 변수와 전단강도를 나타내는 변수들은 서로 독립적이라고 고려하였다.

4.2 결정론적 해석

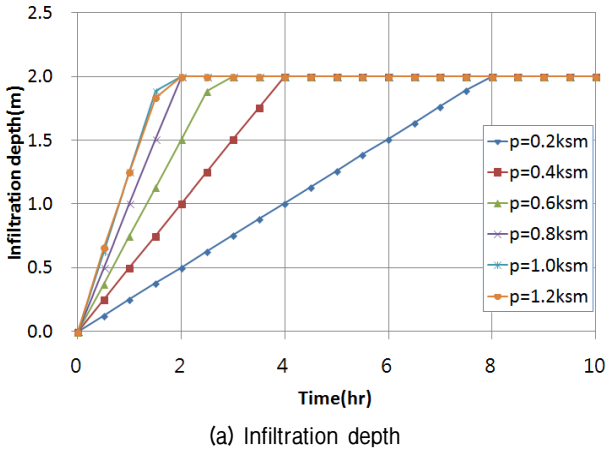
확률론적 해석을 수행하기 전에 강우의 침투에 의한 사면의 침투 및 사면안정 거동을 살펴보기 위해 결정론적 해석을 수행하였다. 해석은 Table 1에 제시된 변수들의 평균값을 이용하였다. 해석은 사면의 표면에 포화투수계수의 평균(k_{sm})의 0.2~1.2배로 강우강도를 변화시키며 수행하였다.

Fig. 4(a)는 제안된 해석모델로부터 구한 시간에 따른 침투 깊이를 30분 간격으로 나타낸 것이다. 강우강도가 0.2 k_{sm} 인 경우에는 약 8시간 후에 침윤선이 기반암에 도달하였다. 강우강도가 커짐에 따라 기반암에 도달하기까지 소요되는 시간이 점점 줄어들었으나 강우강도가 k_{sm} 에 근접하면 그 영향이 점차 줄어들었다. 강우강도가 k_{sm} 보다 큰 경우에는 더 이상 강우강도의 영향이 없는데 이는 지반의 흡수 능력을 초과한 강우는 지표면에서 모두 유출되기 때문이다.

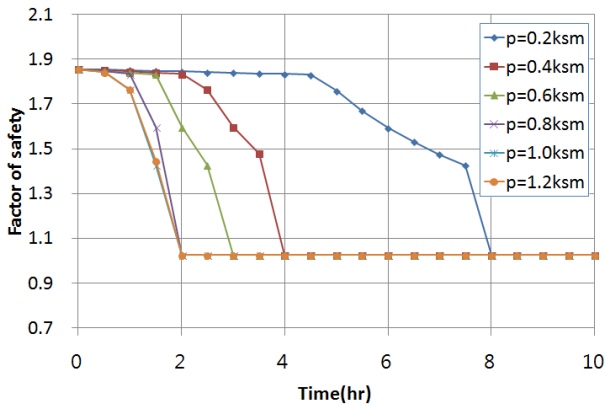
Fig. 4(b)는 시간에 따른 침투깊이를 반영하여 계산

Table 3. Correlation between random variables for probabilistic analysis

Parameter	Correlation coefficients					
	k_s	θ_s	α	n	c	ϕ
k_s	1	0.12	-0.1	0.2	0	0
θ_s	0.12	1	0.235	0.001	0	0
α	-0.1	0.235	1	-0.409	0	0
n	0.2	0.001	-0.409	1	0	0
c	0	0	0	0	1	0
ϕ	0	0	0	0	0	1



(a) Infiltration depth



(b) Factor of safety

Fig. 4. Results of deterministic analysis: infiltration process of slope with impermeable bedrock (D=2 m)

한 사면의 최소안전율의 변화를 나타낸 것이다. 침윤전선이 기반암에 도달한 후에 안전율은 최저값으로 수렴하여 더 이상 감소하지 않았다. 이로부터 강우가 기반암에 도달함과 거의 동시에 기반암 위의 토층이 완전포화 상태에 도달하였음을 추측할 수 있다. 곡선의 후반부에서 안전율이 급격하게 감소하는 것은 토층 전체가 포화됨에 따라 간극수압이 급격하게 상승하여 유효응력이 감소하고 전단응력이 감소하여 사면이 파괴됨을 나타낸다.

4.3 확률론적 해석

지반의 수리학적 특성을 나타내는 변수 및 전단강도 정수를 랜덤변수로 고려하여 강우의 침투에 대한 확률론적 안정해석을 수행하였다. 이를 위해 Table 1에 제시된 지반물성의 통계학적 자료를 사용하였다. 확률론적 거동을 구하기 위해 50,000 쌍의 랜덤벡터를 샘플링하고 각각의 랜덤벡터를 사용하여 MCS를 수행하였다. 사

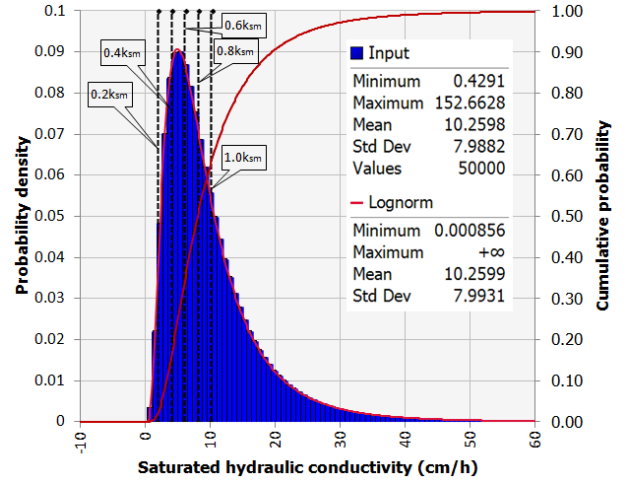


Fig. 5. Statistical distribution of the saturated hydraulic conductivity

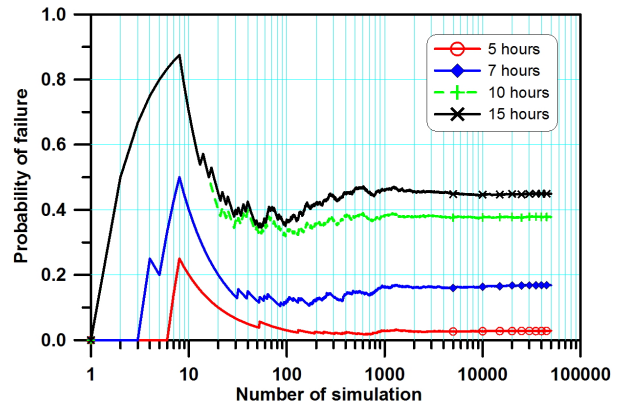


Fig. 6. Results of the monte carlo simulation: convergence of the probability of failure at different times ($p = 0.2k_{sm}$, D=2 m)

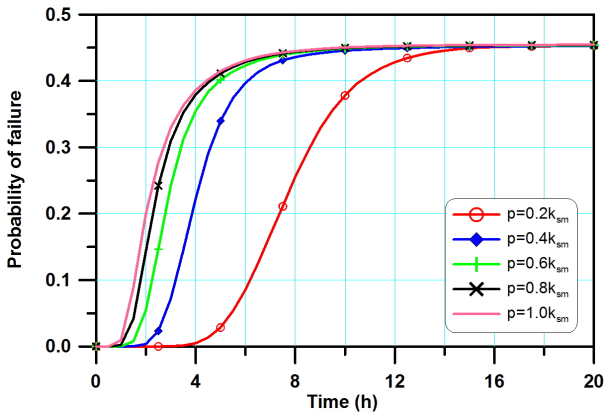
용된 해석대상과 경계조건은 결정론적 해석의 경우와 동일하다.

Fig. 5는 MCS 수행을 위해 실제 샘플링된 포화투수계수 k_s 의 분포를 작용하는 강우강도($p = 0.2k_{sm} \sim 1.0k_{sm}$)와 함께 나타낸 히스토그램 및 누적분포도이다. 대수정규분포는 정규분포와는 달리 대칭이 아니므로 평균과 최빈값(mode)이 동일하지 않다. Fig. 5에서 평균보다 작은 5.0cm/h이 최빈값이므로 이 부근에서 가장 높은 확률밀도를 나타냄을 알 수 있다. 샘플링된 k_s 에 따라 강우강도가 k_s 보다 작아지기도 하고 커지기도 하며, 강우강도가 작을수록 3.1.2 절에 제안된 $p \leq k_s$ 인 경우의 침투모형을 적용하는 해석 횟수가 증가한다.

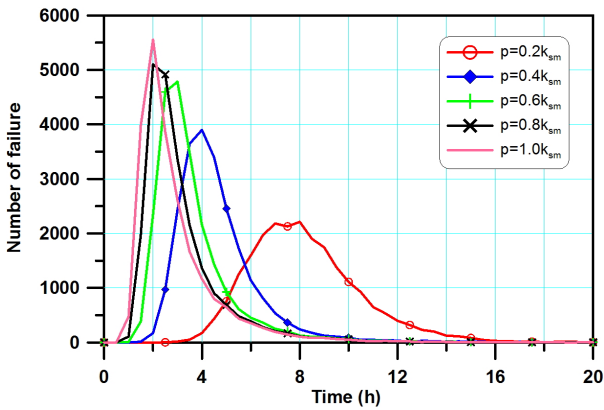
Fig. 6은 강우강도가 $0.2k_{sm}$ 인 경우에 파괴확률의 수렴을 MCS의 시행횟수에 따라 나타낸 것이다. 강우가 지속됨에 따라 침윤전선이 하강하므로 시간이 지남에 따라 사면의 파괴확률이 상당히 증가하고 있음을 보여

준다.

Fig. 7(a)는 시간에 따른 사면의 파괴확률을 나타낸다. $t=0$ 일 때는 침투가 진행되지 않아 지반의 수리학적 물



(a) Probability of failure



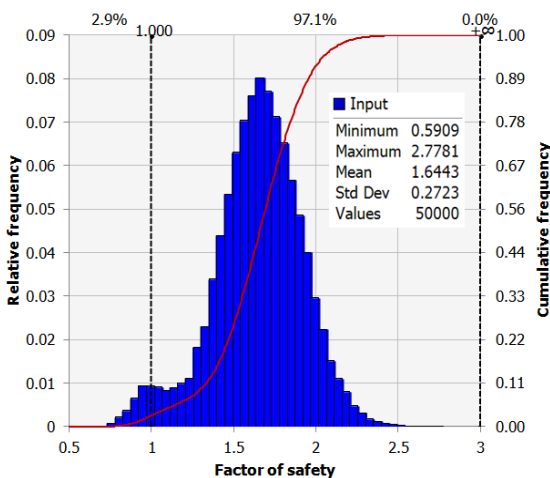
(b) Number of failure

Fig. 7. Effect of rainfall intensity and duration on slope stability ($p = 0.2k_{sm}, 0.4k_{sm}, 0.6k_{sm}, 0.8k_{sm}$; $D=2$ m)

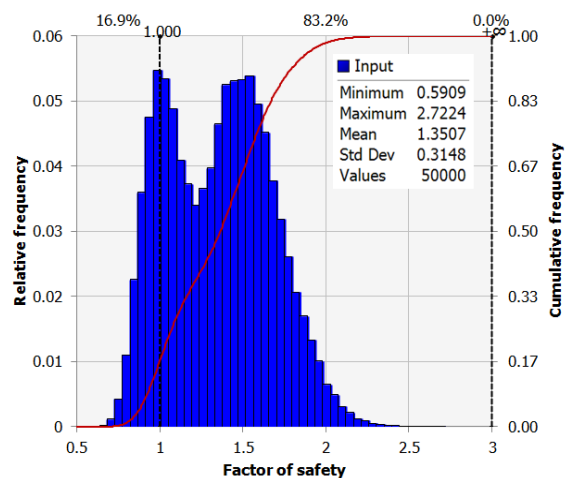
성을 나타내는 랜덤변수들의 변동이 반영되지 않으므로, 초기 파괴확률은 지반의 전단강도 정수의 변동만이 고려되었을 때의 파괴확률에 해당한다. 파괴확률은 강우 후 일정 시간까지는 0에 가까운 매우 작은 값을 보이다가 시간에 따라 증가하기 시작한다. 이는 강우 초기에는 침투 깊이가 얇아 사면의 안정에 미치는 영향이 작고, 침투깊이가 증가함에 따라 영향이 커지기 때문이다. 이후 어느 정도 시간이 지나면 일정한 파괴확률에 수렴하는데 이는 모든 경우에 침윤전선이 기반암에 도달하고 토사층이 완전 포화상태에 도달하였음을 의미한다.

강우강도가 커짐에 따라 침투가 빨리 진행하기 때문에 시간에 따른 파괴확률 곡선의 기울기는 강우강도가 증가함에 따라 커지는데, 어느 정도 이상의 강우강도에서는 파괴확률이 일정한 모양으로 수렴하며 기울기가 증가하는 경향은 감소한다. 식 (4)와 같이 파괴확률 곡선의 기울기는 사면파괴의 확률밀도를 의미하는데 본 연구에서는 이해하기 쉽도록 시간에 따른 사면 파괴의 수로 표시하여 Fig. 7(b)에 나타내었다. Fig. 7(b)의 각 곡선의 정점은 파괴가 가장 빈번하게 발생하는 시간에 대응하는 점이다. 강우강도가 커질수록 Fig. 7(b)의 곡선은 좁고 높아지며 왼쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 즉, 강우강도가 강할수록 강우 초기에 집중적으로 파괴가 발생하게 되고 강우강도가 작으면 파괴 발생 시간이 늦어지고 상대적으로 긴 시간대에 걸쳐 파괴가 발생하게 된다.

Fig. 8은 5, 7, 10, 15시간 동안 강우가 지속되었을 때 안전율의 통계적 정보를 히스토그램과 누적분포로 나



(a) After 5 hours

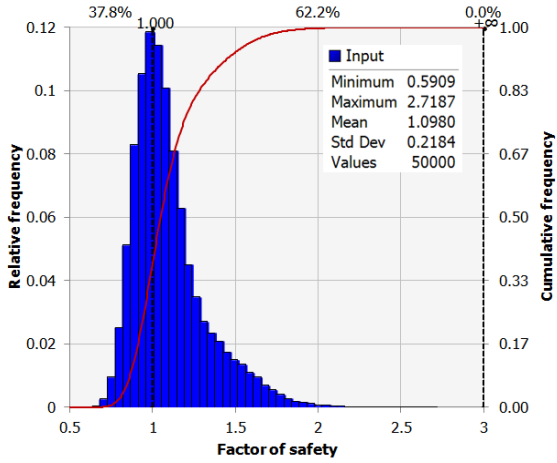


(b) After 7 hours

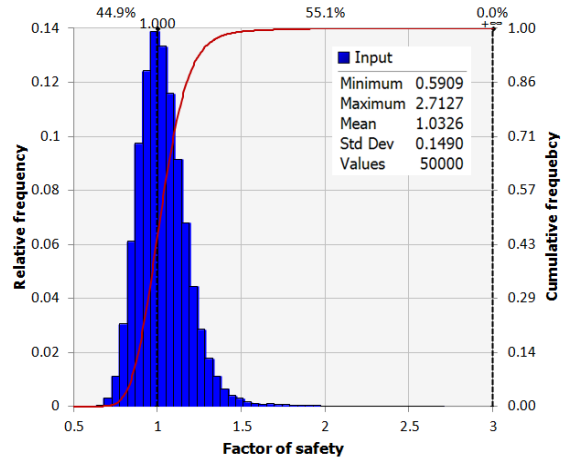
Fig. 8. Results of the monte carlo simulation: relative frequency and cumulative frequency of the factor of safety ($p = 0.2k_{sm}$; $D=2$ m) (Continued)

타낸 것이다. 안전율 1.0보다 작은 영역이 파괴에 해당 하는 부분이다. 강우 초기인 5시간에는 안전율 1.0을 중심으로 안전율의 빈도가 약간 높아졌으나 평균값인 1.6 부근에서 가장 높은 빈도를 보인다. 7시간에서는 안전

율 1.0 부근의 빈도가 크게 높아져 쌍봉 형태의 분포를 나타내고 있다. 이는 2가지의 중요한 사면 파괴모드가 존재하며 강우의 침투에 따라 파괴모드가 점진적으로 다른 쪽으로 이동하고 있음을 보여준다. 10시간 및 15

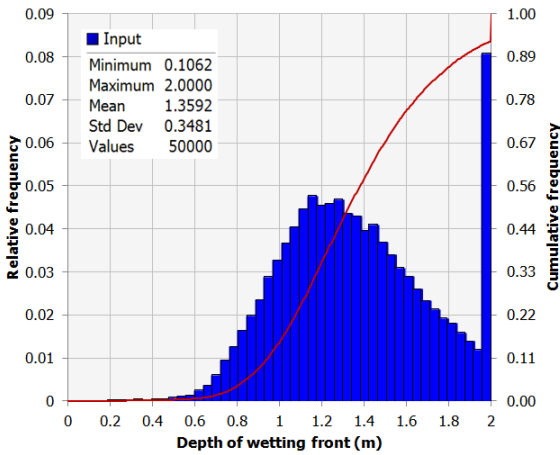


(c) After 10 hours

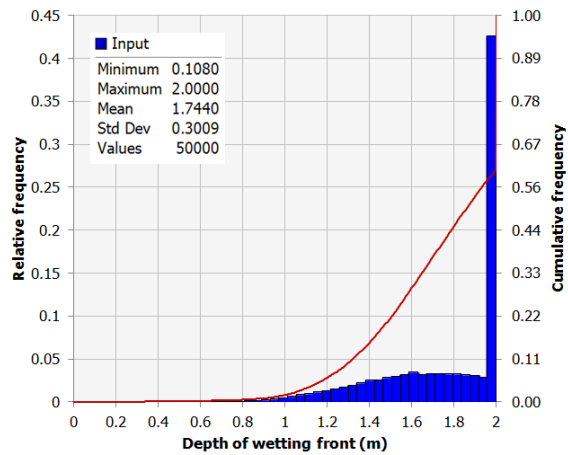


(d) After 15 hours

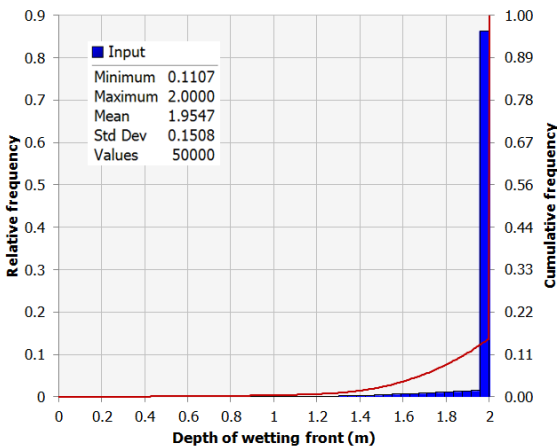
Fig. 8. Results of the monte carlo simulation: relative frequency and cumulative frequency of the factor of safety ($p = 0.2k_{sm}$; $D=2$ m)



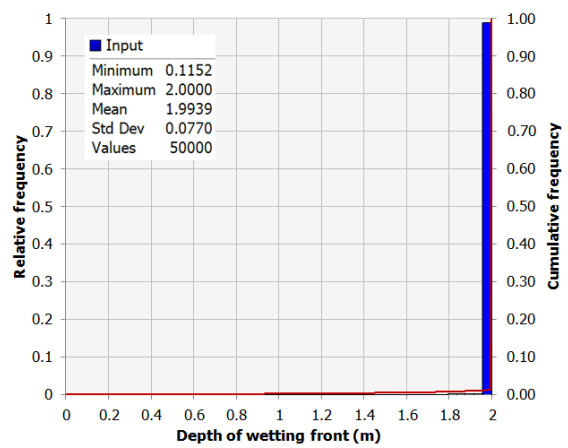
(a) After 5 hours



(b) After 7 hours



(c) After 10 hours



(d) After 15 hours

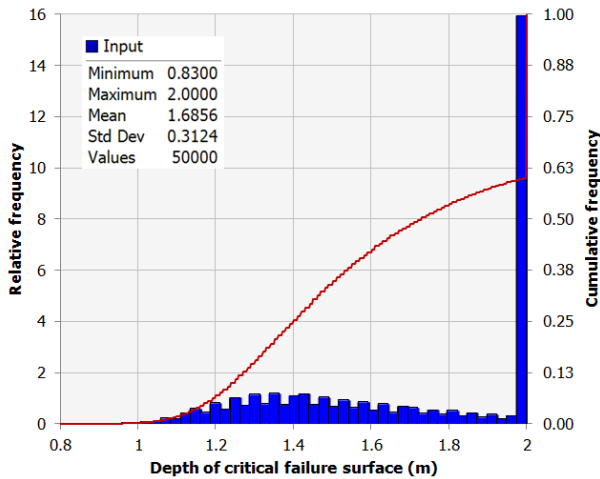
Fig. 9. Results of the monte carlo simulation: relative frequency and cumulative frequency of depth of the wetting front ($p = 0.2k_{sm}$; $D=2$ m)

시간 후에는 안전율 분포가 1.0 부근으로 이동하여 안전율 1.0의 빈도가 가장 높게 나타났다. 이때 시간이 지남에 따른 안전율의 최대 및 최소값은 변화가 없으나 안전율의 평균은 지속적으로 감소하고 있다.

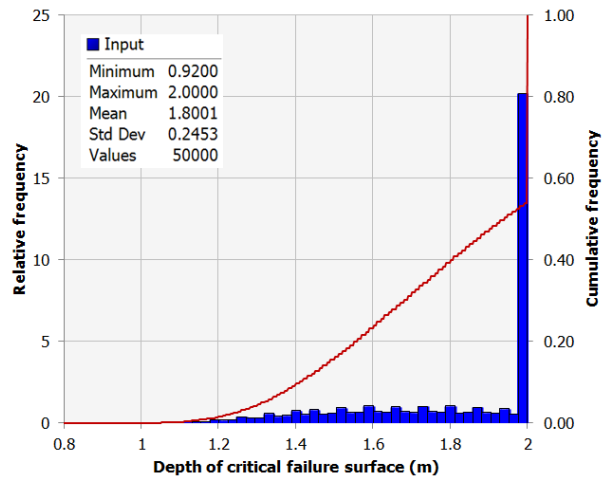
Fig. 9는 강우 침투깊이의 상대빈도 히스토그램 및 누적분포를 시간 단계에 따라 나타낸 것이다. 시간에 따라 침윤전선이 하강하며 10시간 이후에는 대부분의 경우에 침윤전선이 기반암 깊이에 도달한 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 시간 단계에 따라 가장 작은 안전율이 계산된 임계깊이의 히스토그램을 상대빈도로 나타낸 것이다. 강우 전 초기의 최소 안전율은 토사층과 기반암 접촉면에서 1.85로 계산되었다. 강우 5시간 후에는 강우의 침투로 인하여 60% 이상의 임계깊이가 토사층 내에서 발생하였다(Fig. 10(a)). 이는 강우의 침투에 의하여 토층에서의 안전율이 감소하여 임계파괴면이 초기조건일

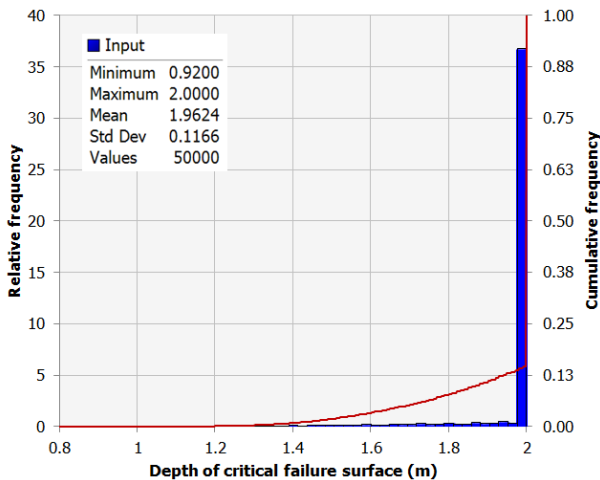
때의 기반암 위치에서 토층 내부로 이동했음을 의미한다. 침투가 진행됨에 따라 임계깊이는 지속적으로 사면 하부로 이동하게 되고 15시간 후에는 거의 모든 임계깊이가 기반암 깊이에서 발생하였다. 강우강도가 포화투수계수보다 큰 경우에는 침윤전선이 기반암에 도달함과 거의 동시에 토층이 완전 포화상태에 도달하고 간극수압은 정수압 상태로 증가하여 안전율이 급감한다. 강우강도가 포화투수계수보다 작은 경우에는 침윤전선이 기반암에 도달한 이후에도 토층이 불포화 상태를 유지하므로 지하수위가 기반암으로부터 상부로 상승하여 지표면에 도달하면서 전체 토사층이 완전포화 상태에 도달한다. 결론적으로 강우 시간이 충분히 길어지면 토사층은 완전 포화상태에 도달하므로, 간극수압의 증가에 따라 급격하게 유효응력이 감소하는 토사층의 바닥에서 파괴면이 발생한다.



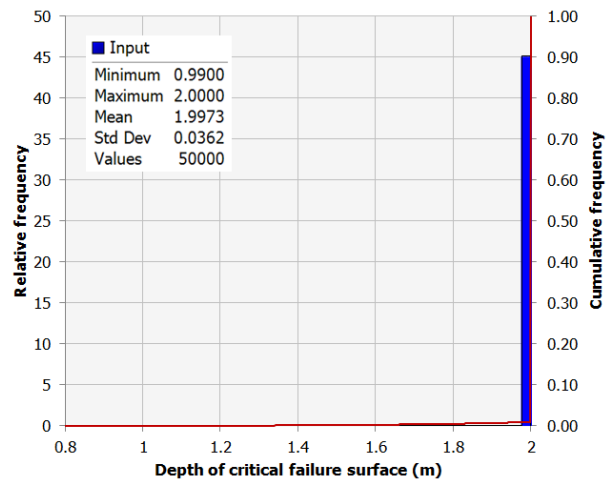
(a) After 5 hours



(b) After 7 hours



(c) After 10 hours



(d) After 15 hours

Fig. 10. Results of the monte carlo simulation: relative frequency and cumulative frequency of depth of the critical failure surface ($p = 0.2k_{sm}$; $D=2$ m)

기반암 깊이가 시간에 따른 사면의 파괴확률에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다른 조건은 고정한 채 기반암 깊이를 변화시키며 MCS를 수행하였다. Fig. 11(a)는 $p=0.2k_{sm}$ 인 경우의 시간에 따른 사면의 파괴확률을 나타낸다. 강우 후 일정 시간까지는 강우 발생 전의 매우 작은 초기 파괴확률 값을 보이다가 침투가 진행함에 따라 증가하기 시작한다. 이후 모든 경우에 침윤전선이 기반암에 도달한 후 토사층이 완전 포화상태에 도달하면 일정한 파괴확률에 수렴한다. 기반암의 깊이가 깊어짐에 따라 파괴확률이 증가하기 시작하는 시점이 늦어짐을 알 수 있다. 기반암 깊이가 4m와 5m인 경우에는 20시간이 지난 이후에도 파괴확률이 시간에 따라 계속 증가하였다. 기반암 깊이 5m인 경우의 초기 파괴확률은 다른 경우에 비하여 상대적으로 큰 값(0.0396)을 보였는데, 이는 토사층의 깊이가 깊어질수록 안전율이 감소하므로 어느 정도 깊이 이하에서는 작은 전단강도 정수가 샘플링되면 강우 전에도 사면의 파괴가 발생할 수 있기

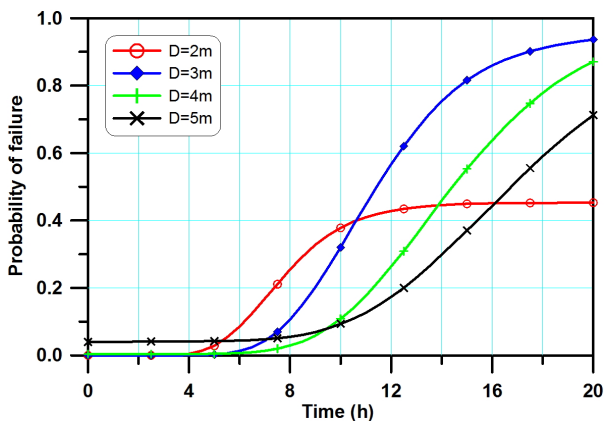
때문이다(Fig. 11(a)).

Fig. 11(b)는 시간에 따라 발생한 사면 파괴 횟수의 분포를 나타낸 것이다. 기반암 깊이가 깊어질수록 파괴가 가장 빈번하게 발생하는 곡선의 정점이 나타나는 시간이 점점 늦어지고 곡선의 폭은 점점 넓어지는 경향을 보인다. 즉, 기반암 깊이가 작을수록 강우 초기에 집중적으로 파괴가 발생하게 되고 기반암 깊이가 증가하면 긴 시간대에 걸쳐 파괴가 발생하게 된다. 침투깊이의 길이가 파괴 발생시간의 확률분포에 절대적인 영향을 미친 것은 명확하나, 침투깊이가 깊어짐에 따라 토층이 완전 포화되지 않아도 파괴가 발생하는 경향이 생기는 것도 일정부분 파괴 발생시간의 확률분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

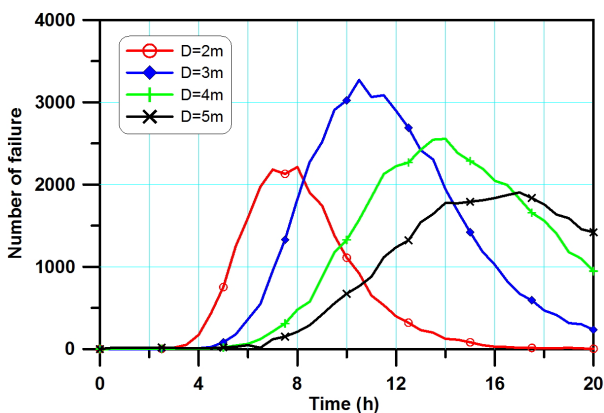
5. 결론

강우의 침투에 의한 토사사면의 파괴는 흙의 수리학적 특성과 전단강도 정수 등의 영향을 크게 받으므로 이들 특성값들의 불확실성과 변동에 따른 사면안정 거동에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 강우로 인한 사면파괴를 예측하기 위하여 지반의 수리학적 특성과 강도특성을 나타내는 변수를 랜덤변수로 고려하는 Monte Carlo Simulation에 의한 확률론적 해석 절차를 제안하였다. 일정한 강우 강도에 대한 토사사면의 침투거동 예측을 위하여 강우 강도에 따른 사면 표면에서의 상부 경계조건을 반영하여 Green-Ampt 모델을 수정하고 얇은 기반암의 하부 경계조건을 도입하였다. 침투해석의 결과를 무한사면 해석에 적용하여 안전율을 계산하였으며 제안된 확률론적 해석법을 사용하여 강우의 침투에 따른 사면의 시간 의존적 파괴확률을 계산하였다. 연구결과는 다음과 같다.



(a) Probability of failure



(b) Number of failure

Fig. 11. Effect of the depth to impermeable bedrock and duration on slope stability ($p=0.2k_{sm}$; $D=2, 3, 4, 5$ m)

(1) 파괴확률은 강우 후 일정 시간까지는 초기 파괴확률을 유지하다가 시간이 지나 침투깊이가 증가함에 따라 커지기 시작한다. 이후 일정 시간이 지나 모든 경우에 대하여 침윤전선이 기반암에 도달한 후 토사층이 완전 포화상태에 도달하면 일정한 파괴확률에 수렴한다.

(2) 강우강도가 커질수록 시간에 따른 사면 파괴의 발생 빈도를 나타내는 곡선은 좁고 높아지며 왼쪽으로 이동하는 경향을 보였다. 즉, 강우가 강할수록 강

우 초기에 집중적으로 파괴가 발생하게 되고 강우 강도가 작으면 긴 시간대에 걸쳐 파괴가 발생하게 된다.

- (3) 기반암의 깊이가 깊어짐에 따라 파괴확률이 증가하기 시작하는 시점이 늦어졌다. 기반암 깊이가 깊어질수록 파괴가 가장 빈번하게 발생하는 곡선의 정점이 나타나는 시간이 점점 늦어지고 곡선의 폭은 점점 넓어지는 경향을 보인다. 즉, 기반암 깊이가 작을수록 강우 초기에 집중적으로 파괴가 발생하게 되고 기반암 깊이가 증가하면 긴 시간대에 걸쳐 파괴가 발생하게 된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 한경대학교 교비 해외파견 연구비의 지원에 의한 것임.

참고문헌 (References)

- Carsel, R. F. and Parrish, R. S. (1988), "Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics", *Water Resources Research*, Vol.24, pp.755-769.
- Chen, L. and Young, M. H. (2006), "Green-Ampt Infiltration Model for Sloping Surface", *Water Resources Research*, Vol.42, W07420.
- Cho, S. E. (2014), "Probabilistic Stability Analysis of Rainfall-induced Landslides Considering Spatial Variability of Permeability", *Engineering Geology*, Vol.171, pp.11-20.
- Cho, S. E. (2015), "Surficial Stability Analysis by the Green-Ampt Infiltration Model with Bedrock Boundary Condition", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.1, pp.131-142.
- Cho, S. E. (2017a), "Influence of Estimation of Hydraulic Conductivity Function on Rainfall Infiltration into Unsaturated Soil Slope", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.9, pp.5-22.
- Cho, S. E. (2017b), "Prediction of Shallow Landslide by Surficial Stability Analysis Considering Rainfall Infiltration", *Engineering Geology*, Vol.231, pp.126-138.
- Cho, S. E. (2009), "Infiltration Analysis to Evaluate the Surficial Stability of Two-layered Slopes Considering Rainfall Characteristics", *Engineering Geology*, Vol.105, No.1-2, pp.32-43.
- Cho, S. E. and Lee, S. R. (2002), "Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.9, pp.756-763.
- Dou, H. Q., Han, T. C., Gong, X. N., and Zhang, J. (2014), "Probabilistic Slope Stability Analysis Considering the Variability of Hydraulic Conductivity under Rainfall Infiltration-redistribution Conditions", *Engineering Geology*, Vol.183, pp.1-13.
- Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911), "Studies of Soil Physics I-the Flow of Air and Water through Soils", *Journal of Agriculture Science*, Vol.4, No.1, pp.1-24.
- Jeon, K. H., Lee, S. R., and Kim, Y. T. (2012), "Probabilistic Characteristics Soil-water Characteristic Curve of Unsaturated Weathered Granite-soil", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.3, pp.133-139.
- Jeon, K. H., Lee, S. R., Yoon, S., and Kim, Y. T. (2013), "Slope Stability Analysis Based on Probabilistic Characteristics of Unsaturated Soil Properties of Weathered Granite Soil", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.1, pp.161-168.
- Jeong, S. S., Choi, J. Y., and Lee, J. H. (2009), "Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration", *Journal of KSCE*, Vol.29, No.1C, pp.1-9.
- Kim, J. H., Jeong, S. S., and Bae, D. H. (2013), "Predicting Rainfall Infiltration-Groundwater Flow based on GIS for a Landslide Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.7, pp.75-89.
- Kim, S. K. (1994), "Landslides in Korea", *Proceedings of the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows*, Seoul, Korea, pp.75-99.
- Lu, N. and Godt, J. (2008), "Infinite Slope Stability under Steady Unsaturated Seepage Conditions", *Water Resources Research*, Vol.44, No.11, W11404.
- Lu, N. and Likos, W. J. (2006), "Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
- Mein, R. G. and Farrel, D. A. (1974), "Determination of Wetting Front Suction in the Green-Ampt Equation", *Soil Science Society of America Proc.*, Vol.38, pp.872-876.
- Mein, R. G. and Larson, C. L. (1973), "Modeling Infiltration during a Steady Rain", *Water Resources Research*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
- Mualem, Y. (1976), A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
- Phoon, K. K., Santoso, A., and Quek, S. T. (2010), "Probabilistic Analysis of Soil-water Characteristic Curves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.3, pp.445-455.
- Pradel, D. and Raad, G. (1993), "Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.119, No.2, pp.315-332.
- Santoso, A. M., Phoon, K. K., and Quek, S. T. (2011), "Effects of Soil Spatial Variability on Rainfall-induced Landslides", *Computers and Structures*, Vol.89, No.11-12, pp.893-900.
- Sillers, W. C. and Fredlund D. G. (2001), "Statistical Assessment of Soil-water Characteristic Curve Models for Geotechnical Engineering", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.1297-1313.
- Srivastava, A., Sivakumar Babu, G. L., and Haldar, S. (2010), "Influence of Spatial Variability of Permeability Property on Steady State Seepage Flow and Slope Stability Analysis", *Engineering Geology*, Vol.110, No.3-4, pp.93-101.
- van Genuchten, M. T. (1980), "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898.
- Yoo, N. J., Park, B. S., Lee, M. W., and Lee, J. H. (2001), "Development of Probabilistic Model of Landslides Using Infinite Slope Stability Analysis", *Journal of KSCE*, Vol.21, No.1C, pp.57-68.
- Yoon, S., Lee, S. R., Kim, Y. T., and Go, G. H. (2015), "Estimation

of Saturated Hydraulic Conductivity of Korean Weathered Granite Soils Using a Regression Analysis”, *Geomechanics and Engineering*, Vol.9, No.1, pp.101-113.

29. Zhang, J., Huang, H. W., Zhang, L. M., Zhu, H. H., and Shi, B. (2014), “Probabilistic Prediction of Rainfall-induced Slope Failure Using a Mechanics-based Model”, *Engineering Geology*, Vol.168, pp.129-140.
30. Zhu, H., Zhang, L. M., Zhang, L. L., and Zhou, C. B. (2013),

“Two-dimensional Probabilistic Infiltration Analysis with a Spatially Varying Permeability Function”, *Computers and Geotechnics*, Vol.48, pp.249-259.

Received : January 31st, 2018

Revised : April 2nd, 2018

Accepted : April 17th, 2018