

확률론적 침투해석을 통한 무한사면 파괴의 특성 연구

Study on the Characteristics of Infinite Slope Failures by Probabilistic Seepage Analysis

조 성 은¹ Cho, Sung-Eun

Abstract

Many regions around the world are vulnerable to rainfall-induced slope failures. A variety of methods have been proposed for revealing the mechanism of slope failure initiation. Current analysis methods, however, do not consider the effects of non-homogeneous soil profiles and variable hydraulic responses on rainfall-induced slope failures. In this study, probabilistic stability analyses were conducted for weathered residual soil slopes with different soil thickness overlying impermeable bedrock to study the rainfall-induced failure mechanisms depending on the soil thickness. A series of seepage and stability analyses of an infinite slope based on one-dimensional random fields were performed to consider the effects of uncertainty due to the spatial heterogeneity of hydraulic conductivity on the failure of unsaturated slopes due to rainfall infiltration. The results showed that a probabilistic framework can be used to efficiently consider various failure patterns caused by spatial variability of hydraulic conductivity in rainfall infiltration assessment for a infinite slope.

요 지

세계의 많은 지역이 강우에 의한 사면파괴가 취약하다. 사면파괴의 발생 메커니즘을 파악하기 위해 지금까지 다양한 방법들이 제안되어져 왔으나 현재 사용되는 방법들은 비균질한 지반분포와 수리학적 거동이 강우로 인한 사면 파괴에 미치는 효과를 고려하지 못한다. 본 연구에서는 강우 시 토층의 두께에 따른 사면파괴의 발생 메커니즘을 연구하기 위하여 불투수 기반암 위에 존재하는 풍화 잔류토 사면에 대한 확률론적 사면안정 해석을 수행하였다. 불균질한 투수계수의 공간적 분포로 인한 불확실성이 강우침투에 의한 불포화 사면의 파괴에 미치는 영향을 고려하기 위하여 일차원 랜덤필드에 기초한 일련의 침투해석과 사면 안정해석을 수행하였다. 해석결과에 의하면 확률론적 해석법은 사면에 대한 강우의 침투 평가 시 투수계수의 공간적인 변동에 의하여 발생하는 다양한 파괴 패턴을 효과적으로 고려할 수 있음을 보여준다.

Keywords : Rainfall infiltration, Monte Carlo Simulation, Probability, Random field, Infinite slope, Hydraulic conductivity

1 정희원, 한경대학교 토목안전환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil, Safety, and Environmental Engrg., Hankyong National Univ., Tel: +82-31-670-5149, Fax: +82-31-678-4674, drsecho@hanmail.net)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

사면파괴는 지질학 및 지형적 특성, 식생, 날씨 등의 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 특히 강우로 인한 사면파괴는 전 세계적으로 자주 보고되고 있으며 그 피해 또한 매우 큰 실정이다. 기존의 연구에 의하면 강우에 의하여 지하수위가 상승하거나 임시지하수위가 발생할 수 있으며, 사면표면에 침식이 발생하고 함수비가 증가하여 흙의 단위중량이 증가하게 된다(Ng and Shi, 1998; Cho and Lee, 2001).

강우에 의한 사면파괴는 파괴면의 깊이가 얇고 파괴면이 사면표면과 평행한 얇은 파괴의 특성을 보이는 경우가 많다. 토층의 두께가 1~3m일 때 얇은 사면파괴가 주로 발생하는 것으로 알려져 있으며(Ray et al., 2010) 얇은 사면파괴를 해석하기 위하여 일차원의 무한사면 모델이 자주 사용된다(Cho and Lee, 2002; Lu and Godt, 2008; Ray et al., 2010; Santoso et al., 2011; Li et al., 2013).

토층으로의 물의 침투와 이로 인한 간극수압의 변화는 얇은 사면파괴를 유발하는 조건을 이해하는데 매우 중요하며 강한 강우 발생 시점과 간극수압의 변동 사이에는 강한 상관성이 존재한다(Lu and Godt, 2013). 사면으로의 물의 침투는 강우의 강도와 지속시간 뿐 아니라 포화투수계수, 투수계수함수 또는 함수특성 같은 지표 근처 흙의 수리학적 특성에도 영향을 받는다. 사면 내부의 모관 흡수력이 소산되기 위해서는 강우가 상당 시간동안 지속되어야 하고 강우강도는 흙의 포화투수계수에 근접하여야 한다(Fredlund et al., 2012; Zhang et al., 2004).

일반적으로 강우에 의한 사면파괴를 해석하기 위해 각각의 지층은 균질하다고 가정하여 흙의 특성치를 하나의 상수로 표현하는 결정론적 방법들이 사용된다(Gui et al., 2000). 그러나 강우의 사면으로의 침투를 예측하는 과정은 필연적으로 불확실성을 포함하게 된다. 게다가, 흙은 매우 변동적이며 불균질하다. 퇴적 또는 풍화 과정은 지반에 위치에 따라 재료의 특성이 무작위로 변동하는 공간적인 불균질성을 초래할 수 있다(Lacasse and Nadim, 1996).

Griffiths and Fenton(1993), Fenton and Griffith(1993)가 정상상태의 침투해석에 RFEM(Random Finite Element Method)을 처음 적용한 이후로 랜덤필드 이론에 의하여 물성치의 공간적인 변동성을 고려하는 침투에 대한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 수행되어져 왔다(Gui et al., 2000; Srivastava et al., 2010; Cho, 2012).

투수계수의 불확실성과 공간적인 변동성이 사면안정에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다. Gui et al. (2000)은 투수계수의 공간적 변동성이 흙댐의 사면안정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 랜덤필드 이론, 침투 해석 및 사면안정해석을 조합한 확률론적 해석을 수행하였다.

Srivastava et al.(2010)은 상업용 유한차분해석 프로그램인 FLAC을 사용하여 투수계수의 변동성이 정상상태의 침투와 이로 인한 사면의 안정성 해석에 미치는 영향을 연구하였다.

Santoso et al.(2011)은 강우 시 불포화 무한사면의 안정성을 평가하기 위해 확률론적 해석법을 제시하였다. 흙의 공간적 변동성은 흙의 포화투수계수를 대수정규 분포를 따르는 랜덤필드로 고려하여 모델링하였으며 사면의 파괴확률을 계산하기 위하여 subset simulation을 사용하였다. 이들은 싱가포르에서 폭 넓게 관찰되는 얇은 사면파괴가 지표 근처 토층에서 발생하는 양의 간극수압과 연관되어 있음을 보였다. 또한 포화투수계수의 공간적인 변동성을 고려하는 확률론적 해석법이 얇은 파괴의 메커니즘을 설명할 수 있음을 보였다. 그러나 그들은 풍화토층의 깊이가 얇은 경우의 파괴 메커니즘은 고려하지 않았다. Cho(2014)는 Santoso et al.(2011)의 방법을 확장하여 풍화토층의 깊이가 얇은 경우에 기반암의 존재로 인한 지하수위의 상승으로 사면에 침투력이 작용하고 흙의 단위중량이 증가하여 토층 아래 위치한 기반암과의 경계 부근에서 파괴면이 형성되는 메커니즘을 설명하였다.

본 연구에서는 강우로 인한 사면파괴에 대한 확률론적 안정해석을 수행하여 강우 시 토층의 두께에 따른 사면파괴 특성을 연구하였다. 강우에 대한 불포화 무한사면 해석을 사면에서의 투수계수의 불확실성과 공간적 변동성을 고려할 수 있는 확률론적 접근법을 개발하기 위하여 확장하였다. 풍화토층에서 강우로 인한 모관 흡수력의 감소와 기반암 위로 수위가 상승하여 발생하는 양의 간극수압을 모두 고려할 수 있도록 포화 및 불포화 조건을 연속적인 형태로 모두 고려할 수 있는 통합된 유효응력 개념을 적용하였다. 침투로 인한 함수비 변화로 달라지는 흙의 단위중량 또한 고려하였다.

2. 침투해석(Seepage analysis)

본 연구에서는 흙 사면을 통한 강우의 침투를 해석하

기 위하여 유한차분 해석 프로그램인 FLAC Ver. 7.0 (Itasca, 2011)을 사용하였다. FLAC은 다공매체를 통한 서로 섞이지 않는 두 가지 유체의 흐름을 모델링할 수 있는 2상 흐름 해석 기능(two-phase flow option)을 제공하며 내부 프로그래밍 언어인 FISH를 사용하여 유한차분 격자 내에서의 물성치의 변동이나 시간에 따른 경계 조건 등을 지정할 수 있다.

본 연구에서는 습윤유체(wetting fluid)와 비습윤유체(non-wetting fluid)를 물과 공기로 가정하여 흙을 통한 불포화 흐름을 해석하였다. 조립질의 화강풍화토로 이루어진 사면의 경우 지반 내 간극 공기압은 대기와 접해 있어 0에 가까운 값을 가지므로 간극 공기압은 해석영역 전체에 대하여 대기압으로 가정하여 습윤유체(wetting fluid)의 흐름만을 고려하였다.

물의 흐름은 Darcy의 법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{q}^w = -\mathbf{k}^w \kappa_r^w (\nabla P_w - \rho_w \mathbf{g} \nabla x) \quad (1)$$

여기서, \mathbf{k}^w 는 물의 포화 이동계수(saturated mobility coefficient), κ_r 는 포화도 S_w 의 함수인 물의 상대침투(relative permeability), P_w 는 간극수압(pore water pressure), ρ_w 는 물의 밀도, \mathbf{g} 는 중력가속도이다.

FLAC에서 침투정도는 이동계수에 의해 표현된다. 이동계수는 지반공학에서 사용되는 흙의 투수계수 k_s (혹은 수리전도도, hydraulic conductivity)를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \frac{k_s}{g \rho_w} \quad (2)$$

흙의 함수특성은 다음과 같이 유효포화도(effective saturation)로 표현된다(van Genuchten, 1980).

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (3)$$

여기서, $m = 1 - 1/n$, S_r 는 잔류포화도(residual saturation), ψ 는 모관흡수력, n 과 α 는 상수이다.

흙의 불포화투수계수는 다음과 같이 유효포화도의 향으로 표현되는 상대침투(relative permeability)와 흙의 포화투수계수와 곱으로 표현된다(van Genuchten, 1980).

$$k = k_s \kappa_r^w = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^2] \quad (4)$$

유체의 균형법칙(balance law)과 구성법칙(constitutive law)을 조합하면 유체의 균형방정식(balance equation)은 다음과 같이 정리된다(Itasca, 2011).

$$n \left[\frac{S_w}{K_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} + \frac{\partial S_w}{\partial t} \right] = -[\nabla \cdot \mathbf{q}^w + S_w \frac{\partial \epsilon}{\partial t}] \quad (5)$$

여기서, ϵ 는 체적변형률, n 은 간극률(porosity), K_w 는 물의 체적변형률계수(fluid bulk moduli)이다.

유체만 고려하면 $\frac{\partial \epsilon}{\partial t}$ 은 생략되며 위 식 (5)를 유한차분법으로 풀게 된다.

3. 사면안정해석

3.1 무한사면 해석

강우에 의한 사면파괴는 파괴면이 사면의 표면과 평행하게 형성되며 그 깊이가 얕은 것이 특징이므로 무한사면 해석법에 의해 해석되어질 수 있다. 이러한 조건에서 안전율을 계산하기 위해 한계평형법을 쉽게 적용할 수 있으며(Cho and Lee, 2002) 흙의 전단강도는 Mohr-Coulomb 파괴규준과 유효응력 개념에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (6)$$

여기서 τ_f 는 파괴시 전단강도, c' 는 유효점착력, σ' 는 유효 수직응력이며 ϕ' 는 유효마찰각이다.

Fig. 1에 나타난 무한사면에 대한 안전율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{W \sin \beta \cos \beta} \quad (7)$$

여기서, τ_m 는 파괴면에서의 전단응력, β 는 사면의 경사각, W 는 흙 절편의 무게이다.

유효응력의 개념을 불포화 토질역학의 범위까지 확장하기 위하여 유효응력과 모관흡수력의 관계가 여러 연구자들에 의해 제안되어져 왔으며(Bishop, 1959) 최근 들어 포화상태와 불포화상태에서 통합된 유효응력

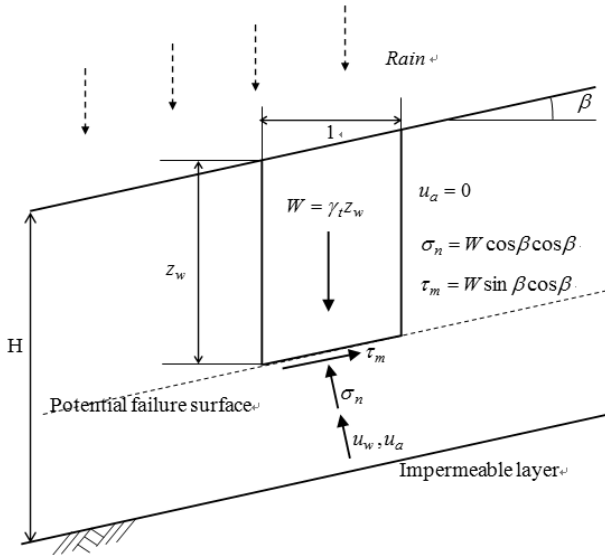


Fig. 1. Stability analysis of an infinite slope with shallow impermeable layer

개념이 다음과 같이 제안되었다(Lu and Likos, 2006; Lu and Godt, 2008).

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) - \sigma^s \quad (8)$$

여기서 \$u_a\$는 간극 공기압, \$\sigma_n\$은 흙의 자중에 의한 총 응력이다.

\$\sigma_s\$는 다음과 같이 나타낼 수 있는 흡수응력특성곡선으로 정의된다(Lu and Godt, 2008).

$$\sigma^s = -S_e(u_a - u_w) \quad (9)$$

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

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

여기서 \$u_w\$는 간극수압이다.

수정된 유효응력식인 식 (8)을 식 (7)에 대입하면 포화상태와 불포화상태에 대하여 통합된 안전율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_s = \frac{c' + [(\sigma_n - u_a) - \sigma^s] \tan \phi'}{W \sin \beta \cos \beta} \quad (10)$$

여기서, \$W = \gamma_t z_w\$, \$\sigma_n = \gamma_t z_w \cos^2 \beta\$이고 대기압상태에서 \$u_a = 0\$이므로(여기서 \$z_w\$는 절편의 연직 깊이, \$\gamma_t\$는 흙의 총단위중량) 식 (10)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_t z_w \cos^2 \beta - \sigma^s) \tan \phi'}{\gamma_t z_w \sin \beta \cos \beta} \quad (11)$$

식 (11)은 불포화 사면의 안정성을 평가하는데 있어 모관흡수력과 전단강도 사이의 비선형 관계를 무시하고, 모관흡수력의 감소와 양의 간극수압의 생성을 연속적인 하나의 형태로 고려할 수 있다는 장점이 있다(Li et al., 2013).

강우에 의한 사면 내 흙의 총단위중량 \$\gamma_t\$는 포화도에 따라 다음과 같이 변화한다.

$$\gamma_t = \frac{G_s + S_w e}{1 + e} \gamma_w = \gamma_d + S_w n \gamma_w \quad (12)$$

여기서, \$G_s\$는 흙의 비중, \$\gamma_w\$는 물의 단위중량, \$\gamma_d\$는 흙의 건조단위중량, \$e\$는 간극비, \$n\$은 간극률이며 \$S_w\$는 포화도이다.

강우에 의한 단위중량의 증가를 고려하기 위해서 단위 면적당 흙기둥의 무게 \$W\$는 식 (13)과 같이 계산할 수 있으며 FLAC 해석에서는 파괴면 위의 영역(zone)들의 무게의 합으로부터 구할 수 있다.

$$W = \int_0^{z_w} \gamma_t dz = \int_0^{z_w} (\gamma_d + n S_w(z) \gamma_w) dz \quad (13)$$

3.2 확률론적 사면안정 해석

신뢰성해석 문제는 종종 기본 랜덤변수들로 이루어진 벡터 \$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]\$로 정식화되며 랜덤변수들에 의해 한계상태를 나타내는 한계상태함수 \$g(\mathbf{X})\$가 정의된다. 한계상태는 설계변수의 공간에서 안전과 파괴의 경계(즉, \$g(\mathbf{X}) = 0\$)를 정의하며 이때 파괴확률은 다음과 같이 표현되는 다차원 적분식으로 정의된다.

$$P_f = P[g(\mathbf{X}) \leq 0] = \int_{g(\mathbf{X}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1, dX_2, \dots, dX_n \quad (14)$$

여기서, \$f_{\mathbf{X}}(X_1, X_2, \dots, X_n)\$는 기본 랜덤변수들 \$X_1, X_2, \dots, X_n\$의 결합확률밀도함수(joint probability density function)이며, 파괴영역에 대하여 적분을 수행한다.

사면안정해석의 경우 한계상태함수는 식 (15)와 같이

정의할 수 있다.

$$g(X) = F_s - 1.0 \quad (15)$$

여기서, F_s 는 무한사면해석에 의해 계산되는 안전율이다.

식 (14)의 경우 확률론적 문제에 대한 정확한 해를 얻을 수 있는 유일한 보편적인 방법은 Monte Carlo 시뮬레이션 방법이며 지반의 공간적 변동성을 고려하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 지반의 특성을 나타내는 통계적 정보인 확률분포와 상관구조를 만족하는 일련의 랜덤필드를 생성하고 각각의 생성된 랜덤필드에 대하여 해석을 수행함으로써 사면의 거동을 계산하게 된다. 이러한 과정을 여러 번 반복하여 사면에 대한 파괴확률을 구할 수 있으며 Monte Carlo 시뮬레이션은 파괴확률 뿐 아니라 사면의 거동에 대한 평균, 표준편차, 확률밀도함수 및 누적확률분포 등의 정보를 평가할 수 있으므로 주어진 사면에 대한 보다 폭 넓은 정보를 제공할 수 있게 해준다.

4. 랜덤 필드 모델

4.1 지반의 공간적 변동성

자연재료로서 지반은 균질한 지층에서도 위치에 따라 특성에 변동성을 보인다. 이러한 공간적인 변동성은 지반의 조성 성분, 퇴적상황, 응력이력 등의 원인으로 발생하며 지반의 불확실성을 유발하는 본질적인 원인이다(Lacasse and Nadim, 1996; Elkateb et al., 2002).

지반의 특성이 강한 상관성을 나타내는 공간적인 범위를 표현함으로써 지반의 상관성을 나타내기 위하여 자기상관함수값이 $1/e$ 로 감소하는 거리로 정의되는 자기상관거리(autocorrelation distance, DeGroot and Baecher, 1993)를 사용한다.

큰 값의 자기상관거리는 지반의 물성이 넓은 공간적 범위에 걸쳐서 강한 상관성을 나타내어 지층 내에서 점진적인 변화를 보이는 것을 의미하며 반대로, 작은 자기상관거리는 지반의 변동폭이 크게 나타나는 것을 의미한다.

일차원 Gaussian 랜덤필드는 평균 $\mu_{\ln k_s}$, 분산 $\sigma_{\ln k_s}^2$ 및 자기상관함수 $\rho(z, z')$ 에 의해서 완전히 정의될 수 있으며 본 연구에서는 다음과 같은 지수형태의 상관함수를

사용하였다.

$$\rho(z, z') = \exp\left(-\frac{|z - z'|}{l_v}\right) \quad (16)$$

여기서, l_v 는 $\ln k_s$ 의 연직 방향의 자기상관거리이다.

4.2 랜덤필드의 이산화

지반 특성의 공간적 변동성은 지반 특성을 나타내는 변수를 하나의 랜덤 변수로 모델링하면 고려할 수 없으며 공간적 변동성을 나타내기 위해서 랜덤필드로 모델링해야 한다. 한계평형법, 유한요소법이나 유한차분법 같은 수치해석법은 불연속적인 특성을 가지므로 해석을 수행하기 위해서는 지반물성의 랜덤필드 또한 유한개의 랜덤변수들로 표현되어야 하며 이러한 과정을 랜덤필드의 이산화(discretization)라 한다.

본 연구에서는 포화투수계수의 1차원 랜덤필드를 이산화하기 위해서 Karhunen-Loève 전개법을 사용한다. 랜덤필드 이산화를 위한 자세한 절차는 Ghanem and Spanos (1991)와 Cho and Park(2008)에 의하여 기술되었다.

5. 해석 결과

우리나라의 경우는 많은 사면파괴가 기반암 위에 존재하는 얇은 풍화잔류토 층에서 발생하고 있으며 파괴면의 깊이가 얇고 풍화토층과 기반암의 경계면 근처에 형성되는 특징을 가지고 있지만, 강우에 의한 얇은 사면파괴는 전 세계적으로 관찰되는 현상으로 토층의 심도가 얇은 경우뿐 아니라 토층의 두께가 깊은 경우에도 관찰된다. 본 연구에서는 강우에 의한 사면파괴의 메커니즘을 연구하기 위하여 기반암 위에 존재하는 토층의 심도가 2m와 5m인 두 사면에 대한 확률론적 안정해석을 수행하였다.

불포화 상태에서 투수계수의 공간적 분포와 불확실성은 사면의 거동과 연관되는 간극수압과 유효응력에 직접적인 영향을 미치므로 불포화투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 포화투수계수 k_s 를 랜덤필드로 고려하여 불포화 상태의 사면에서 투수계수의 공간적 변동성을 고려하였다.

일반적으로 확률론적 사면안정 해석은 투수계수 뿐 아니라 전단강도의 변동성과 공간적 분포도 고려해야

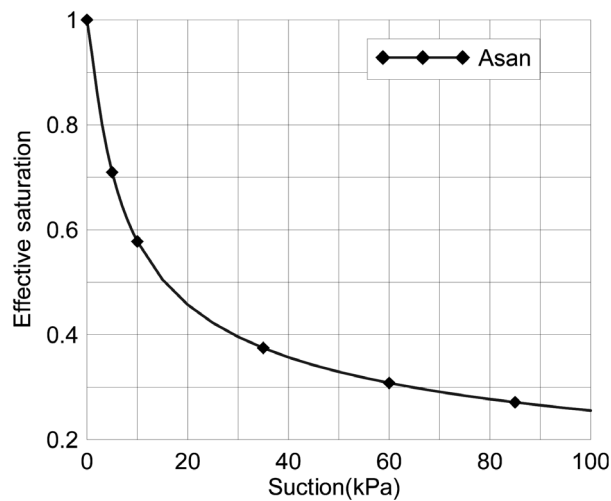
하지만 본 연구에서는 투수계수의 공간적 변동에 의한 효과를 명확하게 파악하기 위하여 전단강도는 결정론적 값으로 취급하였다.

5.1 결정론적 해석

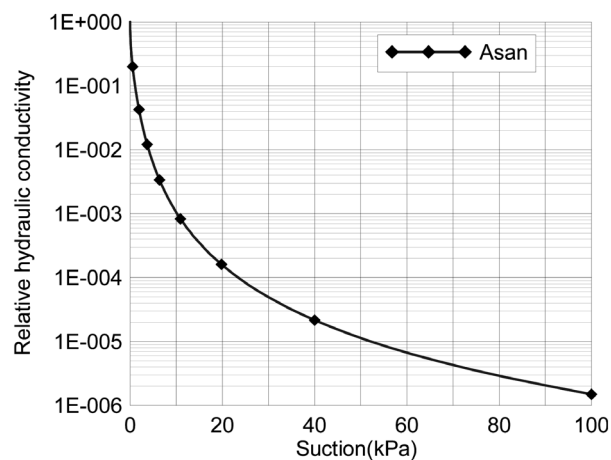
확률론적 해석을 수행하기에 앞서, 강우에 의한 사면의 침투거동을 알아보기 위해 결정론적 일차원 해석을

Table 1. Statistical properties of soil parameters used for seepage analysis

Parameter	Mean μ	COV	Autocorrelation distance (m)
k_s (m/s)	3×10^{-6}	0.5	0.5
Porosity, n	0.29	-	-
α (kPa^{-1})	0.398	-	-
n	1.37	-	-
m	0.27	-	-



(a) Effective saturation curve



(b) Relative Hydraulic conductivity function

Fig. 2. Hydraulic properties for analysis

수행하였다. 해석은 투수계수의 평균값을 이용하였고 그 밖의 수리학적 변수들은 Table 1에 제시된 값을 사용하였다.

해석은 기반암 위에 2m와 5m 두께로 존재하는 토층으로 구성된 사면에 대하여 강우강도를 표면에 작용하는 방식으로 수행하였다. Table 1의 함수특성은 아산에서 채취된, 통일분류법에 의해 SP로 분류되는 화강풍화토의 값을 사용하였다(Kim, 2003).

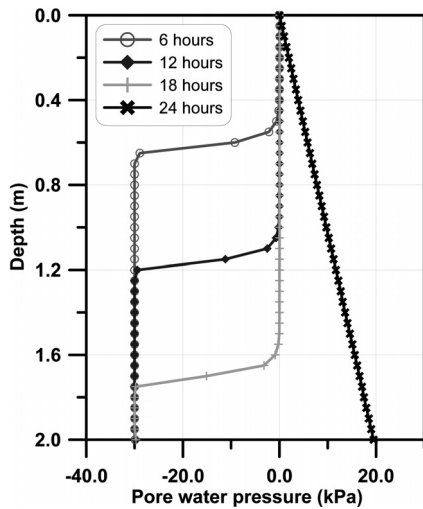
Fig. 2(a)는 압력판추출시험(pressure plate test)에 의해 구한 습윤과정에 대한 함수특성곡선 결과를 식 (3)의 유효포화도로 나타낸 것이며 Fig. 2(b)의 투수계수함수는 식 (4)로부터 예측하였다. 침투해석을 위한 초기조건으로는 깊이에 따라 일정한 30kPa의 모관흡수력을 가정하였다. 사면의 바닥은 불투수 기반암을 모사하기 위하여 흐름이 발생하지 않는 경계조건을 적용하였고 사면의 표면에는 우리나라에서 발생하는 사면파괴의 주요 원인인 큰 강우강도를 고려하기 위해 흙의 포화 투수계수, k_s 의 크기와 같은 값인 10.8mm/hr(3×10^{-6} m/s)의 강우강도를 시간에 따라 일정하게 경계조건으로 적용하였다.

사면의 표면에서 흙의 침투능을 넘어서는 강우는 경사진 사면의 표면을 따라 유출된다는 가정에 따라 폰딩(ponding)이 발생하지 않는 조건을 적용하였다. 강우의 침투해석에 의한 결과는 무한사면 해석을 위한 입력값으로 사용하였으며 무한사면 해석에 사용된 흙의 역학적 물성치는 Table 2와 같은 값을 가정하여 사용하였다.

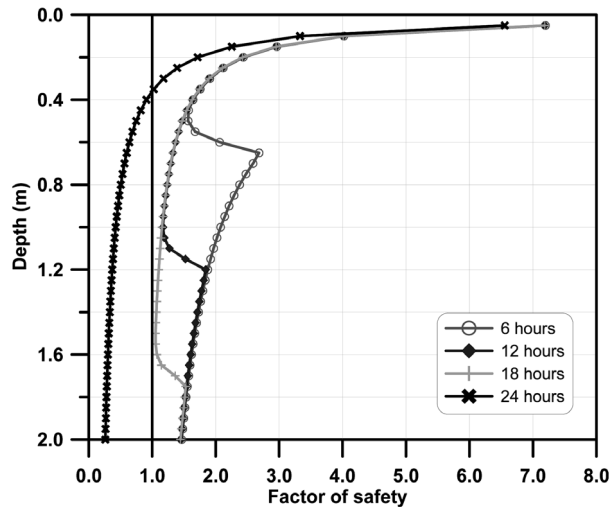
Fig. 3(a)는 토층의 두께가 2m인 경우, 강우에 의한 사면의 간극수압 분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 강우강도가 흙의 포화투수계수와 같기 때문에 사면표면에서의 모관흡수력은 강우가 시작되어 얼마 지나지 않아 사라지게 된다. 적용된 흙의 함수특성곡선과 투수계수함수의 기울기가 급하기 때문에 침투가 진행됨에 따라 피스톤 형상의 습윤전선(wetting front)이 형성된다. 해석결과에 의하면 강우가 침투함에 따라 습윤전선이

Table 2. Input parameters used for slope stability analysis

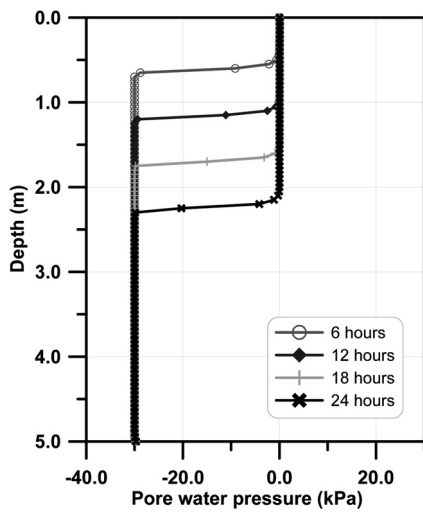
Parameter	Value
γ_d (kN/m^3)	16.0
c' (kPa)	3.0
ϕ' ($^\circ$)	35
β ($^\circ$)	40



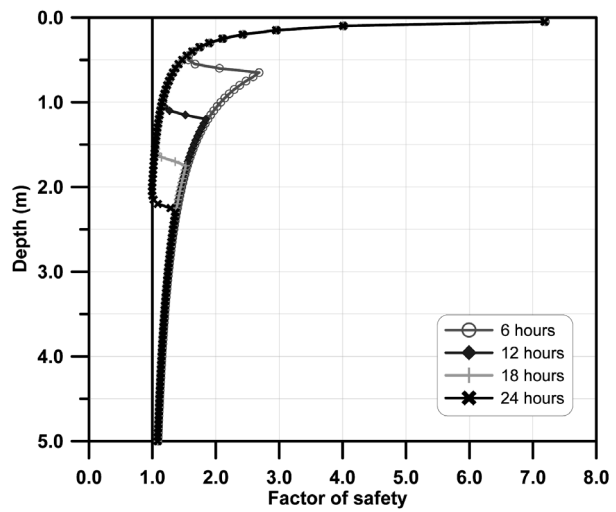
(a) Pore pressure profiles (H = 2 m)



(b) Variance of the factor of safety with propagation of the wetting front (H = 2 m)



(c) Pore pressure profiles (H = 5 m)



(d) Variance of the factor of safety with propagation of the wetting front (H = 5 m)

Fig. 3. Results of deterministic analysis

확장되고 결국은 불투수성인 기반암에 도달한다. 습윤전선 뒷부분의 모관흡수력은 거의 사라지며 이는 흙이 침투에 의해 불포화상태에서 포화상태로 변함을 의미한다. 습윤전선이 기반암에 도달한 이후에도 강우가 지속되면 양의 간극수압이 발생하며 사면의 지하수위는 정상상태가 될 때까지 증가한다.

시간에 따른 습윤전선의 발전에 따른 깊이별 안전율이 Fig. 3(b)에 표시되었으며, 사면안정에 대한 강우침투의 영향을 명확하게 보여주고 있다. 습윤전선이 하강하면 최소안전율은 점점 작아지고 양의 간극수압이 생성되면 안전율이 크게 감소함을 보여준다.

Fig. 3(c)는 토층의 두께가 5m인 경우, 침투에 의한 사면의 간극수압 분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 침투가 진행됨에 따라 피스톤 형상의 습윤전선(wetting

front)이 하강하는 형상은 토층의 두께가 2m인 경우와 유사하나 토층의 두께가 두껍기 때문에 24시간이 지난 후에도 습윤전선은 기반암에 도달하지 못하고 계속 하강하는 모습을 보여준다. 따라서 토층내에서 큰 양의 간극수압은 발생하지 않는다.

Fig. 3(d)는 습윤전선의 발전에 따른 깊이별 안전율을 나타내며, 토층의 두께가 2m인 경우처럼 양의 간극수압에 의해 전체 토층에 걸쳐 안전율이 크게 감소하지는 않지만 습윤전선이 충분히 하강하면 최소안전율은 1.0보다 작아짐을 보여준다.

5.2 확률론적 해석

사면의 포화투수계수를 랜덤필드로 고려한 강우의

침투에 대한 확률론적 안정해석을 Table 1에 제시된 사면의 통계학적 물성치를 사용하여 수행하였다. 정확한 확률론적 거동을 구하기 위해 3,000번의 랜덤필드를 생성하여, 각각의 생성된 랜덤필드에 대한 해석을 수행하였다. 사용된 격자망과 경계조건은 결정론적 해석의 경우와 동일하다.

생성된 랜덤필드는 FLAC의 침투해석 기능과 연계되며, 해석결과 얻어진 간극수압 분포는 임계파괴면과 최소안전율을 구하기 위한 무한사면해석의 입력치로 사용되도록 FISH를 사용하여 프로그래밍 하였다.

포화투수계수는 확률론적으로 평균 μ_{k_s} 와 표준편차 σ_{k_s} 로 정의되는 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. 무차원의 변동계수 $COV_{k_s} = \sigma_{k_s} / \mu_{k_s}$ 를 정의하면 투수계수의 대수값은 정규분포를 따르게 되며 평균과 표준편차는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{\ln k_s} = \sqrt{\ln\{1 + COV_{k_s}^2\}} \quad (17)$$

$$\mu_{\ln k_s} = \ln \mu_{k_s} - 0.5 \sigma_{\ln k_s}^2 \quad (18)$$

Karhunen-Loève 전개법은 해석영역의 임의의 점에서 랜덤변수 값을 계산하는 것이 가능하며 본 연구에서는 격자망의 각 영역(zone)의 중앙점에서 투수계수를 계산하여 해석에 활용하였다.

연직방향의 자기상관거리와 포화투수계수의 변동계수에 따른 경우에 의한 사면의 거동은 Cho(2014)에 의

하여 연구된 바 있다. 지반의 자기상관거리에 대해서는 축적된 자료가 많지 않아 연구가 필요한 실정이지만 Huber et al.(2009)이 수행한 문헌연구의 결과에 따르면 투수계수의 경우 연직방향의 자기상관거리는 0.2~3.2m 정도인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 토층의 심도가 2m와 5m인 두 사면에 대한 확률론적 안정해석을 수행하므로 충분한 변동성을 고려하기 위하여 해석 대상으로 $l_v = 0.5m$, $COV_{k_s} = 0.5$ 인 조건에 대하여 침투 및 사면 안정거동을 연구하였다. 무차원의 변동계수 및 자기상관거리의 결정에 대한 전반적인 경향과 설정한 계수값들의 의미 등은 Baecher와 Christian(2003)에 상세히 기술되어 있다.

임의의 깊이에서의 포화투수계수, k_s 는 Table 1과 같은 통계적 값을 갖는 대수정규분포를 따르므로 Fig. 4와 같은 범위에서 확률분포에 따라 랜덤하게 샘플링된다. 이때 공간적 위치(깊이)에 따른 변동은 자기상관거리 범위에서 상관성을 가지며 이 값보다 큰 거리에서는 상관성이 매우 작은 분포를 갖게 된다. 즉, 임의의 두 점 사이의 거리가 크면 상관성이 작은 투수계수값들이 Fig. 4의 분포를 따라 샘플링되고 두점 사이의 거리가 작으면 상관성이 큰 투수계수값들이 Fig. 4의 분포를 따라 샘플링된다.

일정한 30kPa의 모관흡수력을 가정한 초기조건에서, 안전율은 깊이에 따라 단조적으로 감소하므로 임계파괴면이 발생하는 임계깊이는 항상 토층의 바닥에서 결정된다.

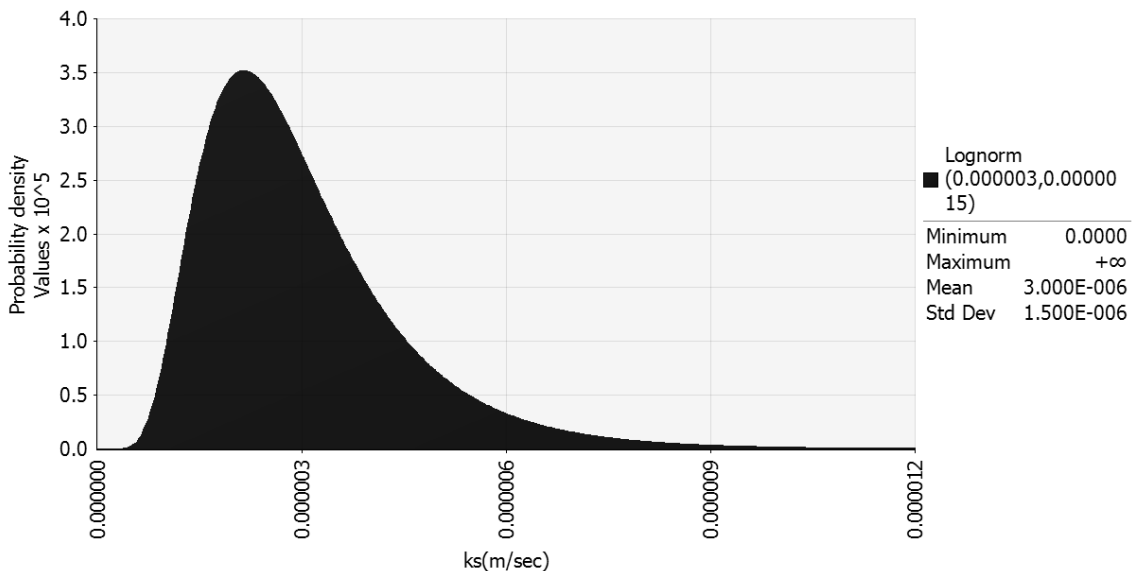


Fig. 4. Statistical distribution of the saturated hydraulic conductivity

Fig. 5는 임계깊이에 대한 상대빈도의 히스토그램을 시간단계에 따라 나타낸 것이다. Figs. 5(a) and 5(b)는 토층의 두께가 2m인 경우의 결과를 보여준다. 강우 지속 18시간 후 임계파괴면 중 2.5%만이 사면의 바닥에서 발생하였고 나머지는 더 얇은 곳에서 발생하였음을 보여준다(Fig. 5(a)). 이는 강우의 침투에 의한 습윤전선의 진행이 사면의 상부인 지표부근에서 안전율을 감소시켜 임계파괴면이 초기조건일 때의 사면바닥에서 사면의 상부 쪽으로 이동했음을 의미한다. 침투가 진행함에 따라 임계파괴면은 사면 하부로 이동하게 되고 임계파괴면이 사면의 바닥에서 발생하는 비율은 습윤전선이 기반암에 도달할 때까지 꾸준히 감소한다. 일단 침투한 강우가 불투수성인 기반암과 풍화토층의 접촉면에 도달하면 강우가 축적되어 양의 간극수압이 발생하고, 수압은 수위의 증가와 더불어 급격하게 증가하여 사면의 불안정을 유발한다. 결론적으로 파괴면은 급격한 유효응력의 감소에 의하여 최소안전율이 계산되는 토층의 바닥에서 발생한다. Fig. 5(b)에서 32.6%의 임계파괴

면이 사면의 바닥에서 발생하였으며 이는 침투지속시간이 충분히 유지되면 강우가 불투수 기반암에 도달할 가능성이 증가하기 때문이다.

Figs. 5(c) and 5(d)는 토층의 두께가 5m인 경우의 결과를 나타낸 것이다. 토층의 두께가 2m인 경우와는 달리 강우 지속 18시간 후 임계파괴면 중 59%가 사면의 바닥에서 발생하였다(Fig. 5(c)). 마찬가지로 강우침투가 진행함에 따라 습윤전선의 전진이 사면의 상부인 지표부근에서 안전율을 감소시켜 임계파괴면이 사면바닥에서 사면의 상부 쪽으로 점차 이동하지만 토층이 2m인 경우와 같이 급격하게 이동하지는 않음을 알 수 있다(Fig. 5(d)). 침투가 진행함에 따라 임계파괴면은 사면 하부로 계속 이동하게 되고 임계파괴면이 사면의 바닥에서 발생하는 비율은 꾸준히 감소한다. 이 경우, 토층의 두께가 두꺼워 24시간이 지난 후에도 습윤전선이 기반암에 도달하지 못하므로 토층 바닥에서의 급격한 양의 간극수압 발생을 기대하기 어렵다.

토층의 두께가 2m인 경우와 5m인 경우는 시간에 따

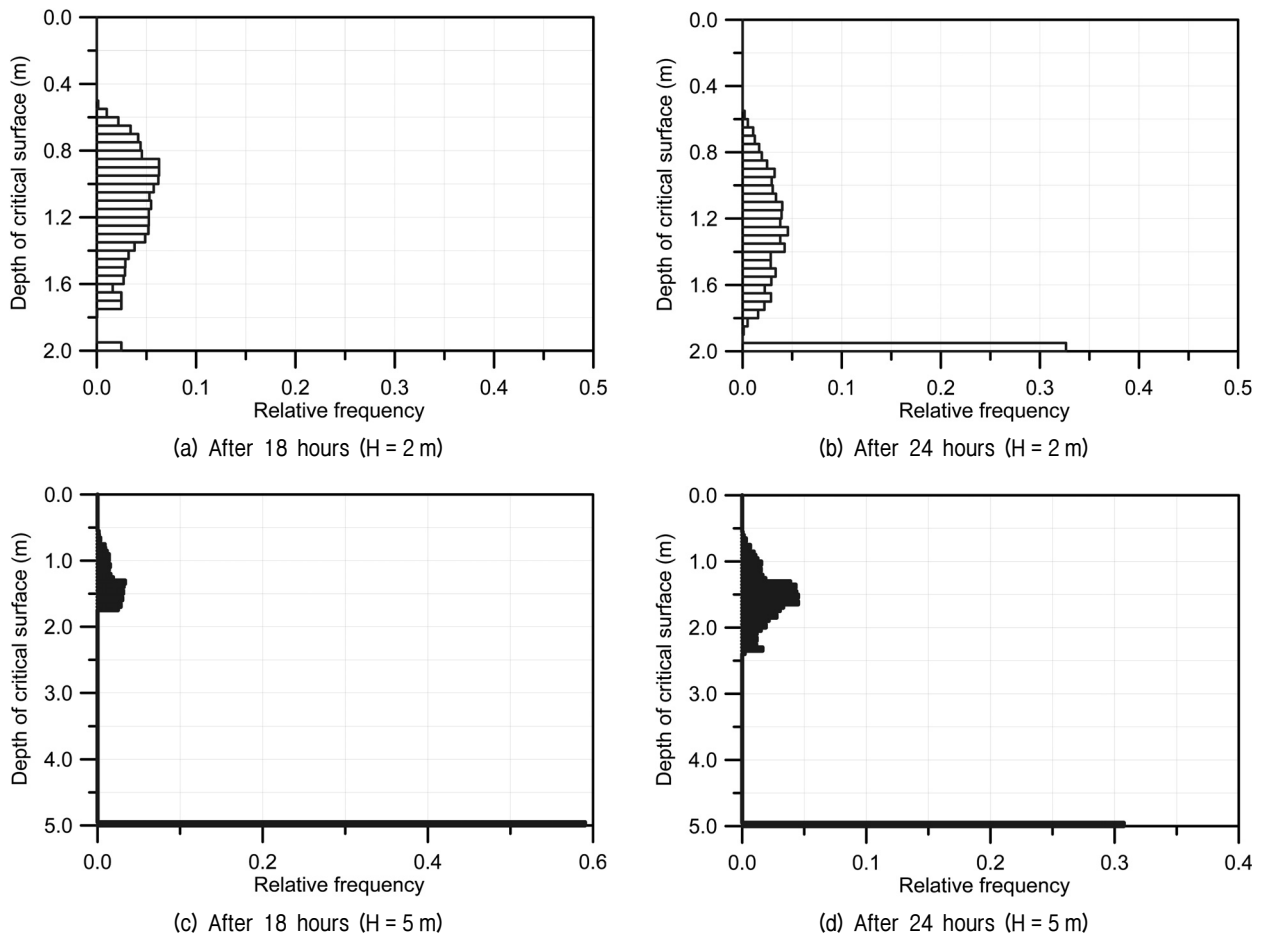
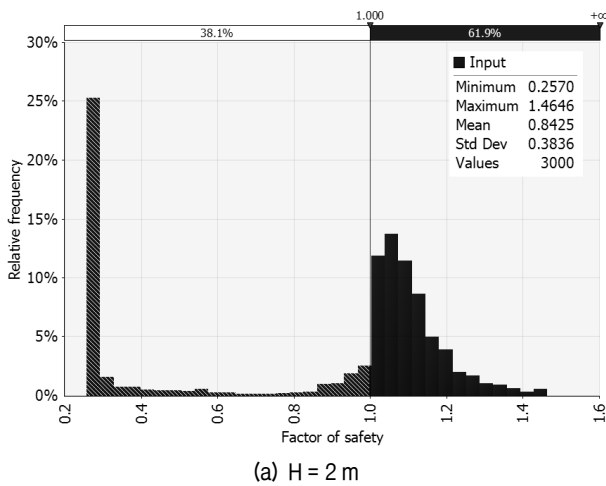


Fig. 5. Results of the Monte Carlo simulation: histograms showing the relative frequency of the critical depth at three different times

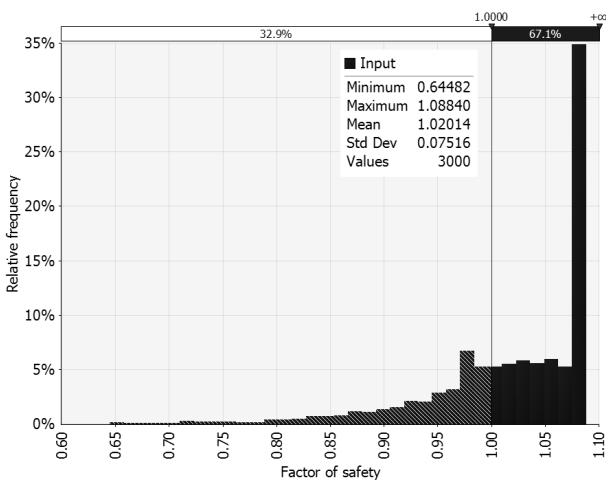
른 침투거동이 다르게 나타나므로 깊이에 따른 임계파괴면의 분포 경향이 다르지만 공통적으로 강우에 의해 얇은 깊이에 임계파괴면이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 토층의 두께가 2m인 경우에 강우지속 24시간 후 안전율의 확률밀도함수를 나타낸다. 전체 해석 결과 중 안전율이 1.0 보다 작은 결과의 비율로 계산된 파괴확률은 38.1%였다. Fig. 6(b)는 토층의 두께가 5m인 경우에 강우지속 24시간 후 안전율의 확률밀도함수를 나타내며 파괴확률은 32.9%로 토층의 두께가 2m인 경우의 파괴확률이 약간 크게 계산되었다. 안전율의 평균값은 토층 두께가 5m인 경우가 컸지만 안전율의 분포 폭은 좁아 1.0 근처에 대부분의 안전율이 분포했고 따라서 표준편차가 매우 작게 계산되었다.

두 경우 모두 안전율의 분포는 다중 파괴모드를 반영하며, 따라서 강우의 침투에 의한 시간에 따른 확률론적 안정해석의 결과는 평균과 분산만으로는 그 특성을 적



(a) H = 2 m



(b) H = 5 m

Fig. 6. Results of the Monte Carlo simulation: probability density function of the factor of safety after 24 hours of rainfall

절하게 표현할 수 없을 것으로 판단된다.

Figs. 7(a) and 7(b)는 토층의 두께가 2m인 경우에 강우지속 24시간 후 3,000번의 해석결과에 대한 안전율-임계깊이 관계와 간극수압-임계깊이의 관계를 각각 나타낸다. 마찬가지로 Figs. 7(c) and 7(d)는 토층의 두께가 5m인 경우의 안전율-임계깊이 관계와 간극수압-임계깊이의 관계를 나타낸다. Figs. 7(a) and 7(b)를 보면 토층의 두께가 2m인 경우에 임계깊이는 0.6m~2.0m에 분포하고 있다. 안전율이 1.0 이하인 임계깊이에 대응하는 간극수압은 모두 양의 값을 보이고 있어서 음의 간극수압이 존재하면 사면은 파괴되지 않는 것을 알 수 있다 (Fig. 7(b)). Fig. 7(b)에서 상대적으로 얇은 깊이에서는 큰 양의 간극수압이 발생해야 사면이 파괴되지만(안전율이 1.0 이하) 깊이가 증가할수록 사면파괴를 유발하기 위해 필요한 양의 간극수압의 크기가 작아져 기반암이 위치하는 깊이 2m에서는 아주 작은 양의 간극수압만 발생하여도 사면이 파괴에 도달함을 알 수 있다. 기반암에 습윤전선이 도달하면 간극수압이 급격하게 증가하므로 강우가 기반암에 도달하면 파괴확률은 급격하게 증가할 것이다.

토층의 두께가 5m인 경우에는 안전율이 1.0 이하인 임계깊이에 대응하는 간극수압은 상부에서는 양의 값을 보이나 깊이 약 2m 이하에서는 음의 간극수압이 존재하여도 파괴가 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 7(c)). 즉, 강우의 침투로 인하여 양의 간극수압이 발생하지 않아도 음의 간극수압이 작은 값으로 소산되면 파괴가 발생함을 의미한다. 강우로 인한 임계파괴면에서의 간극수압 변화 폭이 토층의 두께가 2m인 경우보다 더 크게 나타났으며 파괴면은 0.6m~2.5m에 분포하고 있다 (Fig. 7(d)).

24시간의 강우 지속 후 기반암 상부에서 임계파괴면의 간극수압 변화 폭은 토층 두께가 2m인 경우가 작지만(Figs. 7(b) and 7(d)) 이로 인한 안전율의 변화폭은 간극수압의 변화 폭이 더 큰 토층 두께가 5m인 경우보다 훨씬 크게 나타나고 있어(Figs. 7(a) and 7(c)) 토층의 두께가 얇은 경우에 강우의 침투로 인한 간극수압 변화가 사면의 안정성에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

토층의 두께가 2m인 경우의 파괴면은 포화상태와 연관되고 5m인 경우의 파괴면은 포화 및 불포화 상태 모두와 연관되어 있지만 두 경우 모두 파괴면의 깊이는 깊지 않았다.

Fig. 8은 임계깊이의 누적확률분포를 나타낸 것으로

강우의 침투에 의해 가장 위험한 임계깊이가 임의의 깊이에서 형성될 확률을 시간에 따라 나타낸다. Fig. 8에 의하면 거의 모든 파괴면들이 토층의 두께와 강우지속 시간에 상관없이 0.6m 이상의 깊이에서 발생하였다. 토

층의 두께가 2m인 경우에는 강우가 기반암에 도달한 후 토층의 바닥인 2m 깊이에서 임계깊이가 형성되는 확률이 크게 증가하는 것을 보여주고 있으나 토층의 두께가 5m인 경우에는 강우가 기반암까지 도달하지 못하여 임

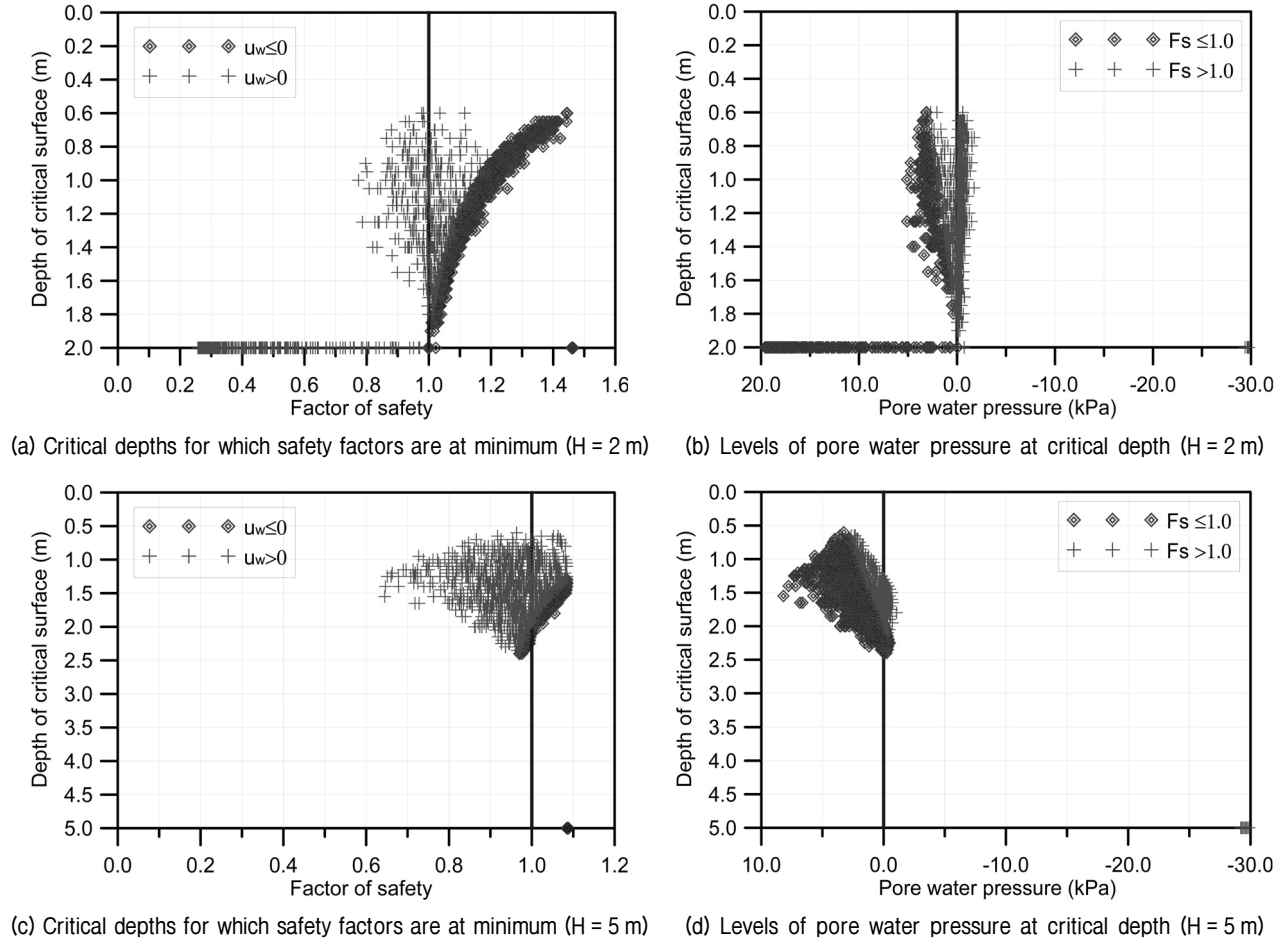


Fig. 7. Results of the Monte Carlo simulation: critical depth-factor of safety-pore water pressure relationship

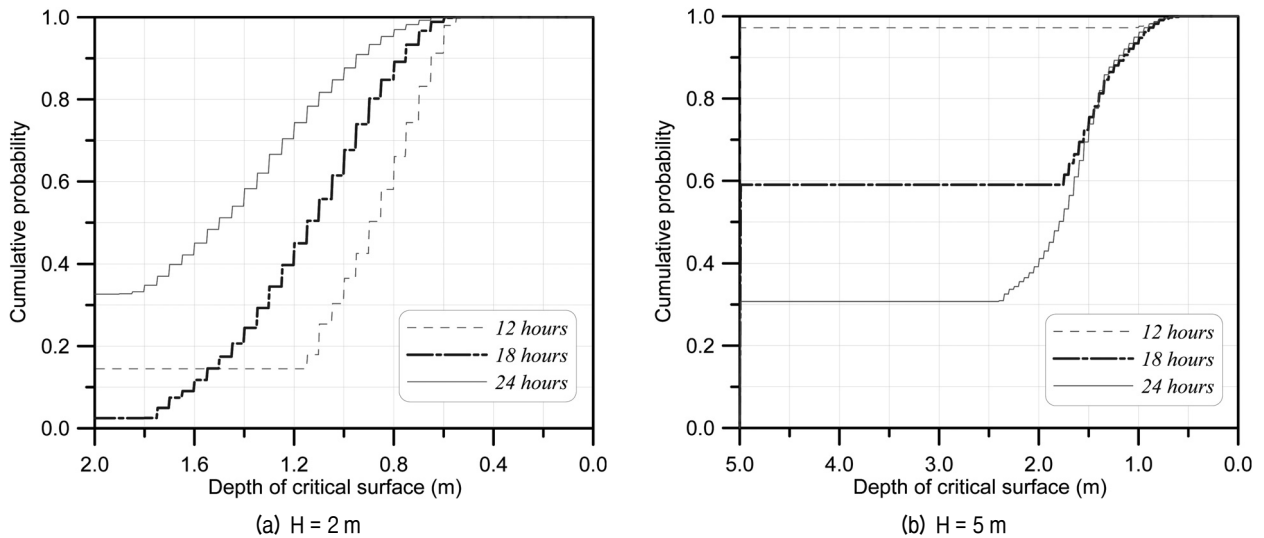


Fig. 8. Results of the Monte Carlo simulation: probability distribution of the depth of critical failure surface at three different times

계깊이 형성 위치가 연직방향으로 확대되는 양상을 보인다.

Fig. 9는 사면의 파괴확률이 Monte Carlo 시뮬레이션의 시행횟수에 따라 수렴하는 양상을 보인 것으로 강우 지속시간 18시간부터 24시간까지의 사이에 습윤전선의 하강으로 인한 유효응력의 감소로 사면의 파괴확률이 상당히 증가하였음을 보여준다. 강우지속 6시간과 12시간에서는 평균적인 의미에서의 습윤전선의 침투깊이가 사면의 파괴를 유발할 만큼 깊지 않아 파괴확률이 0에 가깝게 계산된다. 토층의 두께에 상관없이 시간이 지남에 따라 파괴확률의 증가율이 커지는 경향은 같지만 모든 시간에 걸쳐 토층의 두께가 2m인 경우가 5m인 경우보다 약간 큰 파괴확률을 보였으며 습윤전선이 기반암에 도달한 후에는 더 큰 차이를 보였다. 이는 기반암에 도달한 경우에 의한 간극수압의 증가로 인한 파괴메커니즘과 연관되어 있다.

6. 토 의

강우로 인한 사면파괴에 대한 확률론적 해석은 기존에도 수행된 바 있다. Jeon et al.(2013)은 국내 화강풍화토의 불포화 지반정수에 대한 확률론적 특성을 파악하고, 이를 바탕으로 불포화 화강풍화토 사면에 대하여 확률론적 사면안정해석을 수행하였다. Yoo et al.(2001)은 무한사면 해석법을 근간으로 확률론적 사면안정 해석법을 개발하여 파괴에 영향을 주는 매개변수의 민감도 분석을 수행하였다. 그러나 이들 연구는 안정해석에 영향을 미치는 변수들을 각각 하나의 랜덤변수로 고려하여 해석을 수행하므로 랜덤변수의 공간적 변동성에 의

한 다양한 파괴메커니즘을 고려하지는 못하였다.

투수계수의 공간적 분포에 의하여 파괴면이 다양한 깊이에서 발생하는 현상은 결정론적 해석 혹은 단일 랜덤변수에 의한 확률론적 해석에서는 고려하기 어려운 현상이다. 결정론적 해석에서 습윤전선이 기반암에 도달하기 전에는 토층에 양의 간극수압이 발생하지 않았으나(Fig. 3(c)), 투수계수의 공간적 분포를 고려한 해석에서는 습윤전선이 기반암에 도달하기 전에도 투수계수가 작은 영역의 존재로 인하여 양의 간극수압이 발생하여 안전율이 감소하는 현상을 보였다(Fig. 7(d)).

해석결과에서 알 수 있듯이 시간에 따른 강우의 침투와 관련된 사면안정 문제는 임계파괴면이 고정되지 않고, 깊이에 따른 안전율에 영향을 미치는 습윤전선의 진전과 더불어 연속적으로 변하는 복잡한 거동을 보인다. 사면안정 거동은 최소 안전율을 주는 임계파괴면이 기반암 상부의 토층에서 형성되느냐 혹은 기반암과의 접촉면에서 형성되느냐에 따라 달라지므로 강우에 의한 사면안정을 예측, 평가하기 위해서는 이러한 파괴메커니즘을 모두 고려할 수 있는 합리적인 모델이 필요하다.

일차원 침투에서 물 입자는 투수계수가 작은 영역을 우회하여 회피할 수 없기 때문에 임의의 깊이에 투수계수가 매우 작은 영역이 존재한다면 강우는 더 이상 침투할 수 없게 되나, 2차원 흐름의 경우에는 강우가 투수성이 작은 영역을 회피하고 수평방향의 흐름성분이 발생하게 되는 차이점이 있다.

여러 단점에도 불구하고 가장 간단한 해석형태인 일차원 흐름과 연계된 무한사면해석법을 이용한 확률론적 안정해석은 강우에 의한 침투가 사면의 파괴에 기여하는 과정에 대한 중요한 통찰력을 제시해 준다.

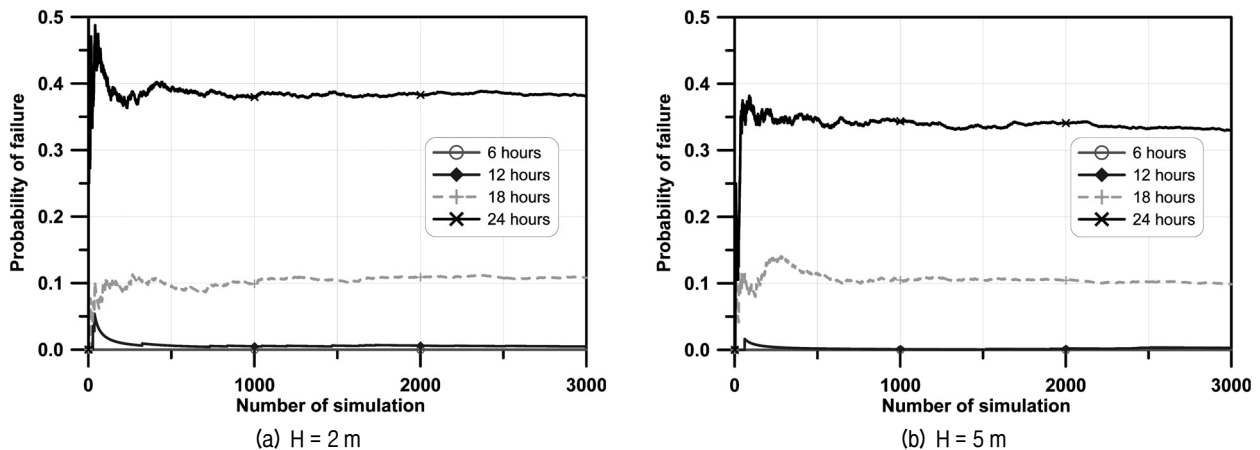


Fig. 9. Results of the Monte Carlo simulation: convergence of the probability of failure at different times

7. 결 론

본 연구에서는 투수계수의 공간적 변동으로 인하여 발생하는 다양한 파괴 패턴과 메커니즘을 효과적으로 고려할 수 있는 확률론적 강우침투 및 무한사면 해석을 실시하였으며 확률론적 안정해석을 수행하여 강우 시 토층의 두께에 따른 사면파괴 특성을 연구하였다.

이를 위해 풍화토층에서 강우로 인한 모관흡수력의 감소와 기반암 위로 수위가 상승하여 발생하는 양의 간극수압을 모두 고려할 수 있도록 포화 및 불포화 조건을 연속적인 형태로 모두 고려할 수 있는 통합된 유효응력 개념을 적용하였으며 함수비의 변화로 인하여 변하는 흙의 단위중량 또한 고려하였다.

결과에 의하면 시간에 따른 강우의 침투와 관련된 사면안정 문제는 임계파괴면이 고정되지 않고, 깊이에 따른 안전율에 영향을 미치는 습윤전선의 진전과 더불어 연속적으로 변하는 복잡한 거동을 보였다.

얕은 깊이에서는 작은 모관흡수력도 사면안정에 크게 기여하므로 기반암이 얇게 존재하여 토층의 얇은 사면의 경우에 파괴면은 포화상태와 연관되어 양의 간극수압 발생으로 인한 유효응력의 감소로 파괴가 발생하였다. 반면에, 기반암이 깊게 존재하고 토층이 두꺼워 상당한 깊이까지 침투가 진행된다면 단지 모관흡수력 소산에 의해서도 파괴가 발생하므로 파괴면은 포화 및 불포화 상태 모두와 연관되었다.

사면안정 거동은 최소 안전율을 주는 임계파괴면이 기반암 상부의 토층에서 형성되느냐 혹은 기반암과의 접촉면에서 형성되느냐에 따라 달라지므로 강우에 의한 사면안정을 예측, 평가하기 위해서는 이러한 불포화 및 포화영역에서의 파괴메커니즘을 모두 고려할 수 있는 모델이 필요하다.

강우의 침투에 의한 사면파괴는 포화투수계수, 투수계수함수 및 함수특성 같은 흙의 수리학적 특성 뿐 아니라 단위중량 및 전단강도 정수 등의 물리적, 역학적 특성에도 영향을 받으므로 이들 특성값의 변동에 따른 사면의 거동에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전연구사업의 지원(No. 2012M3A2A1050981)과 국토교통부/국토교통과학기술진흥

원 건설기술연구사업(13건설기술S01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2003), *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons.
2. Bishop, A. W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
3. Cho, S. E. (2012), "Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation", *Engineering Geology*, Vol.133-134, pp.30-39.
4. Cho, S. E. (2014), "Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability", *Engineering Geology*, Vol.171, pp.11-20.
5. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2001), "Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration", *Computers and Geotechnics*, Vol.28, No. 3, pp.185-208.
6. 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.
7. Cho, S. E. and Park, H. C. (2008), "A study on the probabilistic analysis method considering spatial variability of soil properties", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.24, No.8, pp. 111-123.
8. DeGroot, D. J. and Baecher, G. B. (1993), "Estimating autocovariance of in-situ soil properties", *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.1, pp.147-166.
9. Elkateb, T., Chalaturnyk, R., and Robertson, P. K. (2002), "An overview of soil heterogeneity: Quantification and implications on geotechnical field problems", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.1, pp.1-15.
10. Fenton, G. A. and Griffiths, D. V. (1993), "Statistics of block conductivity through a simple bounded stochastic medium", *Water Resources Research*, Vol.29, No.6, pp.1825-1830.
11. Fredlund, D. G., Rahardjo, H., and Fredlund, M. D. (2012), *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New York.
12. Ghanem, R. G. and Spanos, P. D. (1991), *Stochastic Finite Element-A Spectral Approach*, Springer Verlag, New York.
13. Griffiths, D. V. and Fenton, G. A. (1993), "Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil", *Géotechnique*, Vol.43, No.4, pp.577-587.
14. Gui, S., Zhang, R., Turner J. P., and Xue, X. (2000), "Probabilistic slope stability analysis with stochastic hydraulic conductivity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.1, pp.1-9.
15. Huber, M., Moellmann, A., Vermeer, P. A., and Bárdossy, A. (2009), "Contributions to probabilistic soil modelling", *Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop*, Delft, pp.1-12.
16. Itasca (2011), *User's Manual : Fluid-Mechanical Interaction*, FLAC 7.0, Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis.
17. 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 KOSHAM*,

- Vol.13, No.1, pp.161-168.
18. Kim, Y. K. (2003), *Permeability of unsaturated weathered soils by analyzing triaxial permeameter test results*, Master thesis, KAIST.
 19. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), *Uncertainties in characterizing soil properties. Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice*, In: Shackelford, C. D., Nelson, P. P., Roth, M. J. S. (Eds.), Geotechnical Special Publication No. 58. ASCE, pp.49-75.
 20. Li, W. C., Lee, L. M., Cai, H., Li, H. J., Dai, F. C., and Wang, M. L. (2013), "Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope", *Engineering Geology*, Vol.153, pp.105-113.
 21. 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.
 22. Lu, N. and Godt, J. (2008), "Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions", *Water Resources Research*, Vol.44, No.11, W11404.
 23. Lu, N. and Godt, J. (2013), *Hillslope Hydrology and Stability*, Cambridge University Press, New York.
 24. Ng, C. W. W. and Shi, Q. A. (1998), "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage", *Computer and Geotechnics*, Vol.22, No.1, pp.1-28.
 25. Ray, R., Jacobs, J., and de Alba, P. (2010), "Impacts of unsaturated zone soil moisture and groundwater table on slope instability", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.10, pp.1448-1458.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. 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.
 30. Zhang, L. L., Fredlund, D. G., Zhang, L. M., and Tang, W. H. (2004), "Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, No.4, pp.569-582.
 31. Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M., and Tang, W. H. (2011), "Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review", *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, Vol.164, No.5, pp.299-316.

Received : January 23rd, 2014

Revised : August 6th, 2014

Accepted : October 21st, 2014