

습윤상태를 고려한 불포화 토사사면의 불안정성 해석

김용민* · 김재홍**

Kim, Yong Min*, Kim, Jaehong**

Instability Analysis of Unsaturated Soil Slope Considering Wet Condition

ABSTRACT

The monolithically coupled finite element analysis for a deformable unsaturated soil slope is performed to investigate the effect of antecedent rainfall which is assumed by initial conditions varying degree of saturation (36, 51, 77%) in finite element analysis. The distributions of matric suction and deformation on slope surface obtained from numerical simulation show the instability of antecedent rainfall-induced unsaturated soil slope. Moreover, the numerical analysis using Drucker-Prager model can be checked if a soil slope has reached failure (trial failure criterion $f^{tr} > 0$, plastic behavior) or not (trial failure criterion $f^{tr} < 0$, elastic behavior). It is found that displacement of slope surface layer increases and the matric suction on soil slope decreases with an increase of initial degree of saturation by antecedent rainfall. Especially, the matric suction of the soil slope in dry condition (S=36%) rapidly decreases rather than that in wet condition (S=51%) at the same rainfall duration. The results of the trial failure criterion ($f^{tr} > 0$) show slope instability in the toe region and surface of the slopes.

Key words : Antecedent rainfall, Hydro-mechanical analysis, Finite element analysis, Drucker-Prager model, Slope stability

초 록

본 연구에서는 불포화 사면에서 선행강우의 영향을 고려하고자 지반의 초기 포화도를 3가지(36, 51, 77%)로 설정하여 수리학적-역학적 동시 유한요소해석(monolithically coupled finite element analysis)을 수행하였다. 선행강우에 의한 불포화 사면의 불안정성은 사면 내 모관흡수력 분포와 사면표층의 변위를 통하여 확인할 수 있다. 또한 Drucker-Prager model의 항복경계기준(trial failure criterion)을 적용하여 강우 침투에 의한 불포화 사면의 탄성 및 소성거동을 파악하였다. 그 결과, 선행강우에 의한 지반의 초기 포화도가 클수록 강우에 의한 변위가 크게 발생하며 모관흡수력 또한 감소한다. 특히, 모관흡수력은 지반이 건조할수록 빠르게 감소하며, 초기에 동일한 모관흡수력을 갖는 사면표층에서 포화도가 작은 지반일수록 더 빠른 모관흡수력 감소를 보였다. 포화도의 탄성과 소성거동을 구분하기 위해 사용된 Drucker-Prager model을 통해 사면 파괴가 시작되는 항복경계지점을 확인할 수 있었다.

검색어 : 선행강우, 침투거동해석, 유한요소해석, Drucker-Prager model, 사면안정성

1. 서론

최근 우리나라는 강우에 의한 사면파괴가 증가하면서 산사태 및 토석류에 의한 인명 및 재산피해가 증가되고 있으며, 기후변화에 의한 집중강우의 발생빈도가 증가되면서 그 위험성은 급격히 증가하고 있는 추세이다. 특히 우리나라의 경우에는 국토면적의 약 70%가

* 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (kimkimym@yonsei.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 기후변화 적응형 사회기반시설 연구센터 박사 후 연구원
(Corresponding Author · Yonsei University · woghdjfk@gmail.com)

Received January 4 2013, Revised April 22 2013, Accepted June 4 2013

산지로 둘러 쌓여 있기 때문에 강우 침투에 의한 얇은 사면파괴가 대부분을 이루고 있다(Kim et al., 2002; Jeong et al., 2008; Kim et al., 2012).

일반적으로 강우가 일정 기간 지속되면 지반의 함수비가 증가함과 동시에 지반의 전단강도를 증가시키는 모관흡수력(matric suction)이 감소하기 때문에 사면의 불안정성이 증가하게 된다(Ng and Shi, 1998; Kim et al., 2004; Jeong et al., 2009). 또한 강우침투에 의한 사면의 불안정성은 선행강우에 큰 영향을 받게 된다. 사면이 건조한 상태로 지속되면 표층과 상부에서 인장균열이 발생되며 불포화 상태의 투수계수는 작아진다. 그리고 지하수위는 점점 낮아지며 사면 전체의 최대 모관흡수력은 증가하여 외부하중이 가해지지 않는 한 불포화 사면은 안정한 상태로 존재한다. 이러한 건조한 상태에서 선행강우가 발생하면 인장균열이 발생한 지점으로 물이 깊숙이 침투하여 모관흡수력은 급격히 감소되고 불포화 투수계수는 점차 증가된다. 선행강우 이후에 집중강우가 발생할 경우에는 사면의 전단강도 감소와 불포화투수계수 증가로 인한 강우침투가 증가하게 되어 사면이 매우 불안정한 상태가 된다(Rahardjo et al., 2009).

우기 시 발생하는 사면파괴는 선행강우에 큰 영향을 받지 않는다는 연구결과가 일부 발표된 적은 있으나(Brand, 1984; Pitts, 1985), Tan et al. (1987)과 Chatteriea (1989)는 기존 연구결과와 상반되게 선행강우가 사면파괴에 큰 영향을 미친다고 분석하였다. Wei et al. (1991)은 선행강우의 지속시간과 강우가 발생하지 않은 시간이 산사태 발생과 연관이 있다고 분석하였다. Morgenstern (1992)은 지반조건에 따라서 선행강우의 영향이 서로 다름을 보고한바 있다. 또한 Rahardjo et al. (2001)은 선행강우에 대한 영향을 추가적으로 분석하기 위하여 강우에 따른 간극수압 변화를 장기적으로 관찰하여, 선행강우가 사면불안정성에 중요한 역할을 한다고 분석하였다.

이와 같이 불포화 사면에서는 선행강우에 의해 지반의 초기 강도가 좌우되고 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 사면파괴를 예상하고 이에 적절하게 대응하기 위해서는 불포화 지반의 모관흡수력과 지반의 초기 포화도 상태를 확인하여 모관흡수력이 사면의 안정성에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 선행강우에 따른 불포화 사면의 불안정성을 분석하기 위해 침투와 흡의 거동 해석을 동시에 수행하고 간극수압과 변형이 연계된 유한요소해석(Kim, 2010)을 수행하였으며, 불포화토의 수리학적 특성을 대표하는 함수특성곡선 실험을 통해 서울지역에 분포되어 있는 불포화 풍화토의 특성범위를 결정하였다. 유한요소 해석을 통해 지반 내 모관흡수력 변화와 사면 표층지반의 변위를 분석하여 사면의 불안정성을 파악하였으며, Drucker-Prager model의 항복경계기준(trial failure criterion)을 적용하여 사면 파괴가 시작되는 항복경계지점을 확인하였다.

2. 불포화 풍화토 지반의 함수특성곡선

함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 불포화 지반의 수리학적 특성과 역학적 특성을 결정하는 고유한 물성이라 할 수 있으며, 대부분 실내 실험을 통해 체적함수비에 따른 모관흡수력의 관계로 나타낼 수 있다. 본 절에서는 우리나라의 산지의 대부분을 차지하고 있는 화강풍화토 지반의 함수특성곡선을 산정하기 위해 서울 내 여러 지역의 풍화토를 대상으로 실험을 수행하였으며, 실험장치와 실험방법은 다음과 같다.

2.1 실험장치 및 시료

Figure 1에 나타난 바와 같이 압력조절장치(pressure panel), 부피측정장치(volume tube), 세라믹디스크(HAVE disks)등으로 구성되어 있는 GCTS SWC-150 장비(Pham and Fredlund, 2004)를 이용하여 실내실험을 수행하였다. Pressure chamber의 높은 압력을 이용하여 장시간 실험을 통해 함수특성곡선을 측정할 수 있으며, 화강풍화토 실험에 적합한 실트질모래용(300~500kPa) 세라믹디스크를 사용하였다. 포화된 시료에 공기압을 가하여 불포화상태로 만들어 배출된 간극수의 부피는 pressure cell 밑 부분에 연결된 2개의 뷰렛을 통해 산정할 수 있다.

체적함수비를 산정하는 과정은 건조과정(drying process)과 배출된 간극수가 흙 내부로 다시 흡수되는 습윤과정(wetting process)을 통해 산정할 수 있다. 실제 강우침투 현상과 유사한 방법이 습윤과정이지만, 건조과정 이후에 습윤과정을 모사해야 하기 때문에 상당한 시간이 소요되고 이력현상에 따라서 약 2kPa정도의 모관흡수력 차이(Huang et al., 2011)를 보이기 때문에 본 연구에서는 건조과정을 통해 함수특성곡선을 산정하였다. 이력현상을 갖는 함수특성곡선은 포화체적함수비가 다르게 나타나 공기함입치와 불포화 투수계수에 영향을 미치기도 한다(Kim et al., 2012).

본 실험에서는 시료의 최소단위중량(γ_{min})과 최대단위중량(γ_{max})을 산정하고 50% 상대밀도로 수행하였다. 또한 균등한 다짐을 위해 3단 다짐법을 이용하였으며, 상향침투를 이용하여 시료를 포화시켰다(Lee et al., 2007).

2.2 시료의 수리-물리적 특성

본 연구에서는 서울지역에 분포하는 화강풍화토를 채취해 3가지 흙 시료들에 대해 함수특성곡선 실험을 수행하였다. 각 시료의 기본적인 물리적 특성들은 Table 1에 정리하였으며, Figure 2에 시료에 대한 입도분포곡선을 도시하였다.

함수특성곡선은 토립자의 입경과 입도분포, 구성성분 그리고 간극비 등에 따라 공기함입치(air-entry value)와 잔류체적함수비

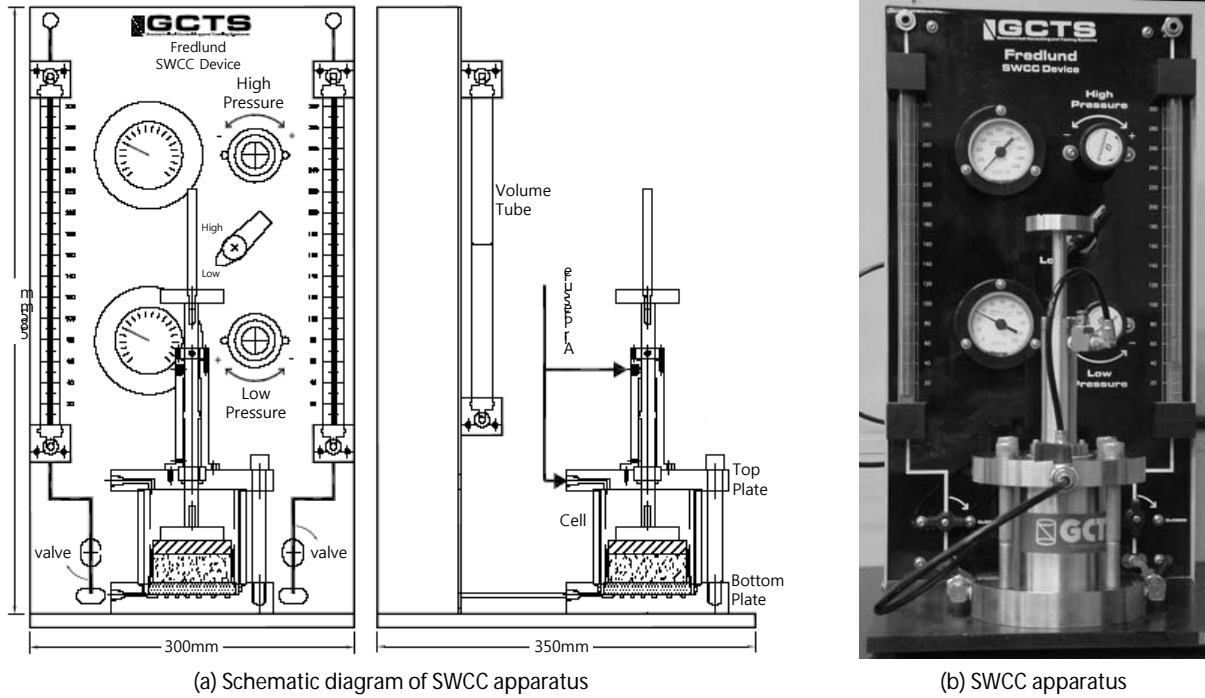


Fig. 1. GCTS pressure plate apparatus

Table 1. Physical properties of weathered soils

Property	Weathered granite soil (Seoul area, 3 sites)
Specific gravity (G_s)	2.64
Max. dry unit weight ($\gamma_{d \max}$, kN/m^3)	17.5
Min. dry unit weight ($\gamma_{d \min}$, kN/m^3)	13.5
Uniformity coefficient (C_u)	9.3
Coefficient of gradation (C_c)	0.77
USCS	SP

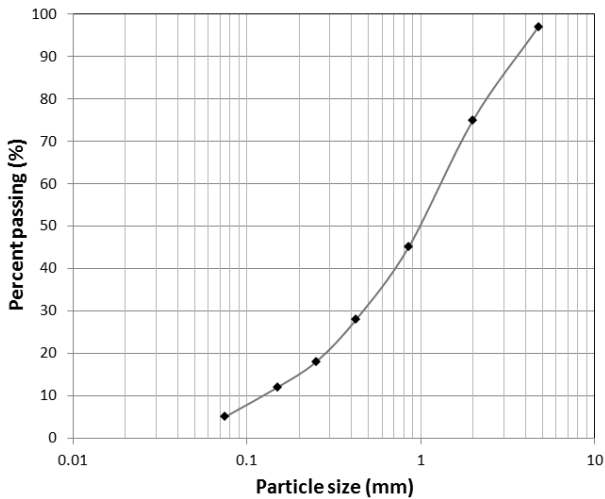


Fig. 2. Grain-size distribution curve of weathered soils

(residual volumetric water content)가 각각 다르게 나타난다. 사질토에 비해 입경이 작은 실트질 흙이나 점토질 흙을 포함하는 시료는 동일한 모관흡수력의 변화에 따른 체적함수비의 변화가 작게 나타난다. 본 연구에서는 다양한 입도분포, 다짐함수비, 간극비를 가진 시료를 서울 여러 지역에서 채취하여 여러 흙으로 구분하지 않고 3가지의 함수특성곡선을 산정하였다. 그리고 van Genuchten (1980)의 제안식을 이용하여 평균적인 함수특성곡선을 나타내었다 (Figure 3). 최소자승법을 통하여 대표적인 함수특성곡선을 산정하였으며, 상관계수(R^2)가 97.1%에 근접한 오차를 갖는다.

잔류체적함수비는 모관흡수력이 큰 조건에서 측정할 수 있기 때문에 실험장비 및 실험여건의 제한으로 잔류체적함수비를 확인하지 못하여 '0'으로 가정하였다. 실험을 통해 산정된 함수 특성곡선은 Table 2에 나타난 바와 같이 함수특성곡선의 공기함

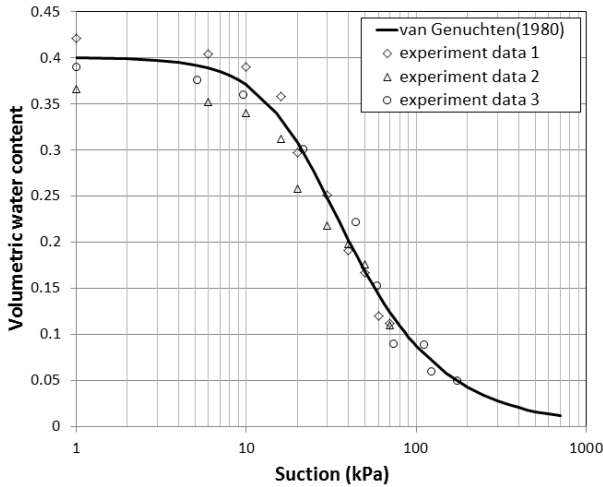


Fig. 3. Soil-water characteristic curve of weathered soils

Table 2. Curve fitting parameters of the SWCC and permeability (RETC, 2009)

Curve Fitting Parameters	
van Genuchten (1980)	$\alpha = 0.0412 / \text{kPa}$ $n = 2.07$ $m = 0.517$
Saturated volumetric water content (θ_s)	0.39
Residual volumetric water content (θ_r)	≈ 0.0
Correlation factor (R^2)	0.9719
Saturated permeability (k_s)	$4.67 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$

입치는 α , 곡선의 경사는 n , 잔류함수비에 대한 계수는 m 으로 표시하였으며, 불포화 투수계수 산정 및 침투해석의 입력데이터로 사용하였다.

3. 유한요소해석

3.1 지배방정식

자연상태의 불포화토는 토립자(n^s), 물(n^w), 공기(n^a) 3상으로 구성되어 있으며, 체적비($1 = n^s + n^w + n^a$)에 따라 각 요소들을 구분하는 Mixture Theory (Coussy, 2010)가 지배방정식의 근간을 이루고 있다. 불포화토의 지배방정식은 토립자의 변위(u)와 토립자 내부에서 발생하는 간극수압(p_w)이 미지수이며, 물체에 작용하는 모든 힘들은 평형을 이룬다는 평형방정식(balance equation)과 물체의 질량이 시간에 따라 변하지 않는다는 질량보존의 법칙(balance of mass)을 기본가정으로 하고 있다.

불포화토 내 물의 이동은 흙 입자의 움직임에 종속되기 때문에 흙 입자에 대한 평형방정식(balance of linear momentum)으로부터 변위를 계산할 수 있으며, 불포화토 내 물의 흐름을 파악하는

평형방정식(balance of mass of the water)으로부터 간극수압을 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 침투에 의한 지반의 거동과 수리학적-역학적(hydro-mechanical)특성을 동시에 고려할 수 있는 유한요소해석 코드를 구성하였으며 지배방정식은 다음과 같다 (Kim, 2010).

$$\text{DIV} \sigma + \rho g = 0 \tag{1}$$

$$-n \frac{\partial S}{\partial s} \dot{p}_w + S \text{DIV} v = -\text{DIV} \tilde{v}^w \tag{2}$$

여기서 σ 는 전응력, p 는 밀도, g 는 중력가속도, n 은 간극률, S 는 포화도, s 는 모관흡수력, \dot{p}_w 는 시간에 따른 간극수압, v 는 흙 입자의 흐름 속도, \tilde{v}^w 는 실제 물의 속도(v_w)와 흙 입자의 속도(v)의 차이를 나타낸다.

또한 응력 해석을 위해 필요한 유효응력 구성방정식과 불포화토 내 물의 흐름을 파악할 수 있는 Darcy's law는 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다(van Genuchten, 1980; Coussy, 2010).

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma' - p_a \mathbf{1} + \chi(p_a - p_w) \mathbf{1} \\ &= \sigma' - \chi p_w \mathbf{1} = \sigma' - S_e p_w \mathbf{1}, \quad \sigma' = c^e : \varepsilon \end{aligned} \tag{3}$$

$$\tilde{v}^w = k_w(S, n)(-\nabla p_w + \rho^{wR} g) \tag{4}$$

여기서 c^e 는 탄성계수, ε 은 변형율, k_w 는 불포화토 투수계수, x 는 유효응력계수, 인장력(tension)을 '+', 압축력(compression)을 '-' 값을 나타내며, 본 수치해석에서는 유효포화도(effective degree of saturation, S_e)를 적용시켜 해석을 수행하였다. p^{wR} ($= p_w / n^w$)는 물의 실제 밀도를 나타내며, 시간에 따른 침투와 지반응력 산정에 필요한 간극률, 그리고 전체 밀도는 Eq. (5)와 Eq. (6)으로부터 계산할 수 있다.

$$n_{n+1} = \frac{n_n + \Delta \varepsilon_v}{1 + \Delta \varepsilon_v} \quad \text{and} \quad \Delta \varepsilon_v = \text{tr}(\Delta \varepsilon_v) \tag{5}$$

$$\rho = [1 - n(d)] \rho^{sR} + n(d) S(\theta) \rho^{wR} \tag{6}$$

여기서 침투 또는 외부하중에 의해 변화하는 간극률은 체적변형률($\Delta \varepsilon_v$)의 함수이며, 전체밀도 역시 시간에 따른 간극률($n(d)$)과 포화도($S(\theta)$)에 따라 결정된다.

1) 'n'은 함수특성곡선의 실험정수로 'n'은 간극률로 표시를 구분하였음.

3.2 유한요소해석을 위한 알고리즘

유한요소 해석을 위하여 흙의 변위와 내부 간극수압을 계산할 수 있는 비선형 약형(coupled nonlinear weak form)을 유도하기 위해 가중잔류항법(method of weighted residual)을 적용하였으며, 2가지 미지수에 대해 행렬함수(matrix form) 형태인 유한요소 방정식으로 표현하기 위해서 형상함수(shape function)를 적용하였다. 각 요소(element)들이 가지고 있는 내력(internal force)과 외력(external force) 벡터들의 평형조건에 의하여 계산 값들을 누적시키면 연계된 비선형 포물선 미분방정식(coupled nonlinear parabolic partially differential equation)을 전체 요소에 대해 Eq. (7)과 같은 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$C(D)\dot{D} + F^{INT}(D) = F^{EXT}(D) \quad (7)$$

여기서 $D = \begin{bmatrix} d \\ \theta \end{bmatrix}$, $\dot{D} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$, $C(D) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K^{\theta,INT}(\theta) & -K^{d,INT}(d, \theta) \end{bmatrix}$, $F^{INT}(D) = \begin{bmatrix} F^{d,INT}(d, \theta) - F^{d\theta,INT}(\theta) \\ -F^{\theta,INT}(d, \theta) \end{bmatrix}$, $F^{EXT}(D) = \begin{bmatrix} F^{d,EXT}(d, \theta) \\ F^{\theta,EXT} \end{bmatrix}$ 을 의미한다.

Backward Euler 방법을 이용한 내제적방법(fully-implicit time integration)을 통해 위 Eq. (7)과 같은 행렬방정식을 Newton-Raphson 방법을 사용하여 미지수인 지반의 변위와 내부 간극수압을 계산할 수 있으며, Eq. (8)과 Eq. (9)로 다시 표현된다.

$$C(D_{n+1})\dot{D}_{n+1} + F^{INT}(D_{n+1}) = F^{EXT}(D_{n+1}) \quad (8)$$

$$C(D_{n+1})\dot{D}_{n+1} + K(D_{n+1})D_{n+1} = F^{EXT}(D_{n+1}) \quad (9)$$

행렬 방정식은 Newton-Raphson 방법에 의해 선형화된 형태로 현재 시간단계(t_{n+1})에서 해석이 수행되며 내력에 대해서 $F^{INT}(D_{n+1}) \approx K(D_{n+1})D_{n+1}$ 임을 가정할 수 있다. 결과적으로 수치학적-역학적 흙의 거동을 비선형 접근 방법인 반 내제적 방법(semi-implicit time integration)으로 결과를 도출하였다(Kim, 2010).

4. 강우특성에 따른 불포화 풍화토 사면의 수치해석 결과

4.1 선행강우를 고려한 모관흡수력의 변화

강우에 의한 사면의 불안정성은 우기 시 선행강우에 의해 크게 좌우된다. 토석류 발생과 같은 많은 비탈면 파괴의 사례를 살펴보면,

건조한 상태에서 내리는 폭우보다는 선행강우로 포화도가 높은 지반조건에서 내리는 강우에서 사면 파괴의 위험성이 높다는 것을 알 수 있다. 선행강우가 발생한 사면에서는 불포화 투수계수가 빨라지고 모관흡수력은 급격히 저하된 상태에서 사면의 표층이 강우로 인하여 빨리 포화되기 쉽게 된다. 지반의 포화 투수계수보다 큰 강우강도가 일정한 강우지속시간을 갖는다면 사면의 표층의 포화는 깊어지고, 사면 붕괴에 대한 위험도는 더욱더 커지게 된다.

본 연구에서 언급한 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 선행강우 조건은 초기 사면의 포화도 조건을 36, 51, 77%의 3가지 조건으로 나누어서 강우 시 사면내의 모관흡수력의 변화와 파괴발생 가능 위치의 변위를 확인하였다. 각각 Eq. (10)과 Eq. (11)에서처럼, van Genuchten (1980)의 함수특성곡선과 불포화 투수계수 방정식을 각각 사용하여 불포화도의 침투특성을 예측하였다.

$$\theta = \theta_s \{1 + (\alpha s)^n\}^{-\frac{1}{n}} \quad (10)$$

$$k_w = k_s \cdot \sqrt{S} [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2 \quad (11)$$

여기서 θ 는 체적함수비(volumetric water content), θ_s 는 포화 체적함수비, α 는 공기함입치(air-entry value)에 대한 실험정수, n 은 곡선의 경사에 대한 실험정수, 그리고 m 은 잔류 체적함수비에 대한 실험정수이다. 풍화토의 포화투수계수(4.67×10^{-6} m/sec)보다 큰 강우강도(5.56×10^{-6} m/sec)를 사용하여 불포화 사면의 표면이 완전 포화가 가능하도록 초기조건을 적용하였다. 유한요소해석에서는 선행강우를 고려하기 위해 초기 포화도 조건을 건조상태에서 습윤상태의 3가지 조건(36, 51, 77%)으로 나누어서 불포화 침투해석과 모관흡수력의 변화를 확인하였다. 강우특성은 강우강도와 지속시간으로 나눌 수 있는데, 강우강도는 일상에서 자주 발생하는 20mm/hr로 지반을 포화시킬 수 있는 크기로 설정하여 얇은 사면파괴를 유발할 가능성이 있는 조건이다. 강우지속시간은 강우강도에 의해 사면 표층부가 임의 깊이까지 완전 포화될 수 있는 24시간으로 가정하였다.

Figure 4와 같이 사면높이가 20m로 일정하며, 사면의 경사는 40°로 결정하고 사면 전체 영역은 등방(isotropic)인 지반으로 가정하였으며, 좌우측면과 하부 경계면은 불투수 경계조건으로 이에 수직인 방향으로 공기와 물의 흐름이 발생하지 않는다고 가정하였다. 또한 좌우측면은 수평방향 변위를, 하부 경계면은 수평과 연직방향의 변위를 구속하였다. 초기 지하수위는 건기 시를 가정하여 사면 바닥에서 10m 높이에서 수평하게 위치하였고, 지하수위 상부인 불포화도 영역에서 높이에 따라 최대 모관흡수력을 60kPa, 최소 20kPa로 가정하였다(Kim et al., 2012). Table 3은 해석에

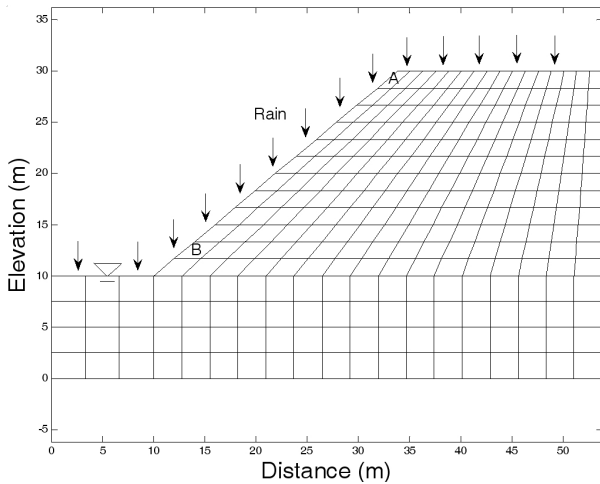


Fig. 4. Soil slope mesh and initial condition

Table 3. Mechanical properties of weathered soils and input parameters

Lame parameter (λ, μ)	$29 \times 10^6, 7 \times 10^6$ Pa
Effective friction, dilatancy angle and cohesion (ϕ', ψ', c')	$32^\circ, 10^\circ, 5$ kPa
Plasticity parameters (h_c, β)	10MPa, -1(TC)
Solid real density (ρ^R)	2700 kg/m ³
Water real density (ρ^w)	1000 kg/m ³
Air real density (ρ^a)	1.2 kg/m ³
Viscosity of water (η_w)	10^{-3} Pa·s
Initial porosity ($n = n^w + n^a$)	0.4 (=0.2+0.2)
Permeability at saturation (k_s)	4.67×10^{-6} m/sec
Rainfall intensity and duration	20mm/hr, 24hr

사용된 강도정수와 흙의 물리적 성질을 나타내고 있다.

Figure 5는 강우로 인한 사면 내의 모관흡수력 분포에 대해 마지막 단계를 보여주고 있다. 유한요소해석에 의한 mesh에서 하나의 요소는 변위를 위한 9개 절점과 간극수압을 위한 4개 절점으로 구성된다. 선행강우의 크기에 따라 달라지는 초기 사면의 포화도가 커짐에 따라 모관흡수력의 크기도 작아지고 있음을 확인할 수 있다(Figures 5-7). 포화투수계수보다 큰 강우강도의 조건이므로, 사면의 표층의 모관흡수력은 급격히 감소하여(즉, 0에 접근) 사면 표층이 점차적으로 포화되고 있음을 확인할 수 있다. Contour로 확인하는 모관흡수력의 변화를 직접 확인하기 위하여 Figure 4에서 나타난 것과 같이 A요소와 B요소에서 모관흡수력의 변화를 포화도에 따라 Figures 8-9에 나타내었다.

일반적으로 강우로 인한 사면의 불안정성은 침투수로 인한 표층 포화로부터 시작된다. 그래서 사면의 표층의 상단(A element)과 하단(B element)의 모관흡수력의 변화를 비교하고자 하였다. 각

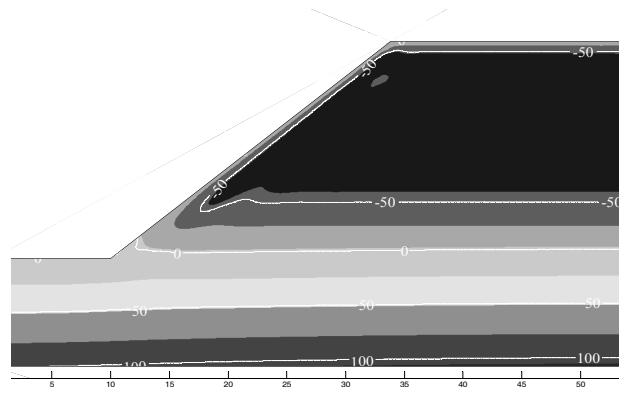


Fig. 5. Distribution of matric suction in soil slope with S=36%

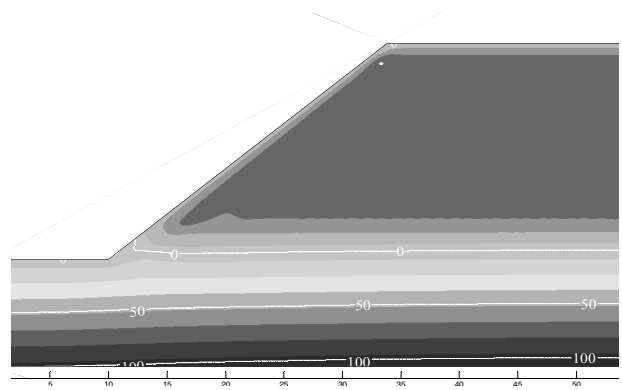


Fig. 6. Distribution of matric suction in soil slope with S=51%

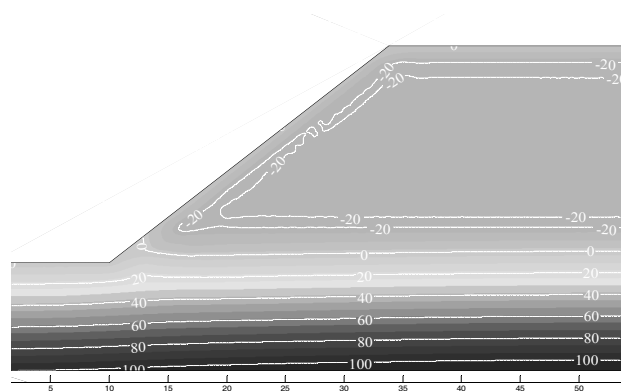


Fig. 7. Distribution of matric suction in soil slope with S=77%

요소에서 측정된 모관흡수력은 4개의 절점(node)에서 얻은 평균값을 사용하여 도시하였다. 강우 시 상단에 위치한 A요소에서 포화도에 따른 모관흡수력의 감소는 가장 건조한 사면(포화도 36%)의 경우 감소의 폭이 가장 크게 나타났으나, 선행강우로 인한 습윤한 사면조건(포화도 51%, 77%)은 모관흡수력의 감소폭은 작으나 초기조건부터 갖고 있는 함수량에 의해 포화되기 위한 가능성은 가장 높았다.

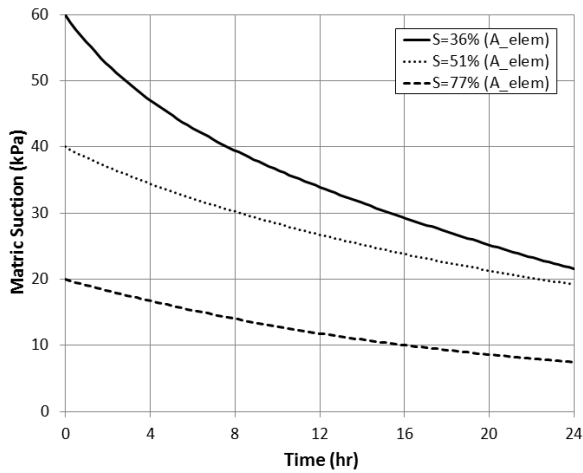


Fig. 8. Variation of matric suction at A element for a day

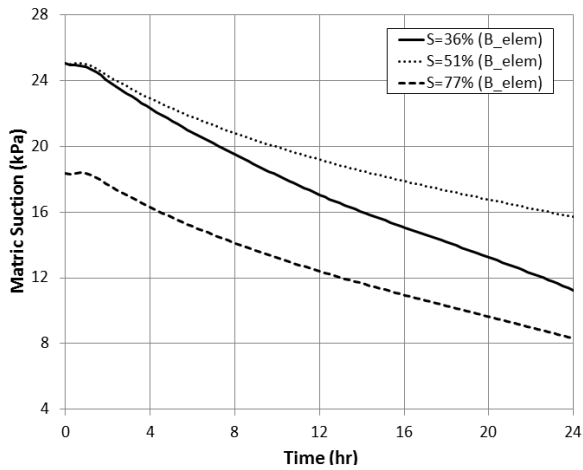


Fig. 9. Variation of matric suction at B element for a day

사면의 하단(B element)에서는 지하수위부터 상부로 점차적으로 증가하는 모관흡수력 조건 때문에 포화도 36%(최대 모관흡수력 60kPa)와 포화도 51%(최대 모관흡수력 40kPa)에 해당하는 B요소의 4개 절점의 초기 평균 모관흡수력은 대략 25kPa로 같은 크기에서 시작한다. 강우 시 가장 건조한 사면의 상태에서 표층의 모관흡수력은 급격하게 감소하기 때문에 포화도 36%인 사면 조건에서 좀더 빠른 모관흡수력의 감소를 보이고 있다(Figure 9). 사면 표층에서 초기 포화도가 낮을수록 강우로 인한 모관흡수력의 감소는 작아지나, 표층에서 같은 모관흡수력을 갖고 있다면 지반이 건조한 상태일수록 감소하는 비율은 더욱더 빨라진다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 강우에 의한 사면의 변형과 파괴

선행강우로 인한 지반의 초기 포화도 조건을 36, 51, 77% 3가지로 구분하여 사면표층의 상단과 하단의 위치에서 수직 및 수평변위

를 유한요소해석 프로그램을 이용하여 계산하였다. 사면표층 상단(A element)과 하단(B element)은 강우로 인해 지반이 거동하는 위치를 파악할 수 있으며 표층파괴를 예상할 수 있는 곳이다. 각 요소의 9개의 gauss points 중에서 중앙에 위치한 gauss point 결과값들을 이용하여 평균적인 변위를 나타내었다. A요소의 수직변위(y-direction)와 B요소의 수직 및 수평변위(x-direction)를 측정하여 초기 포화도 조건에 따른 거동의 차이점을 확인하였다. Figure 10은 A요소의 수직변위와 B요소의 수평변위를 보여준다. 사면 상단의 수직변위와 하단의 수평변위는 각각 좌표축의 ‘-’방향인 아래와 왼쪽방향으로 거동한다. 지반의 초기 함수량이 많을수록 각 위치에서 발생하는 변위는 커지고 있음을 알 수 있다. 반면에 B요소에서 수직변위는 강우시작과 동시에 단위중량의 상승으로 사면의 윗방향인 ‘+’방향으로 거동한 후에 점차적으로 침투수의

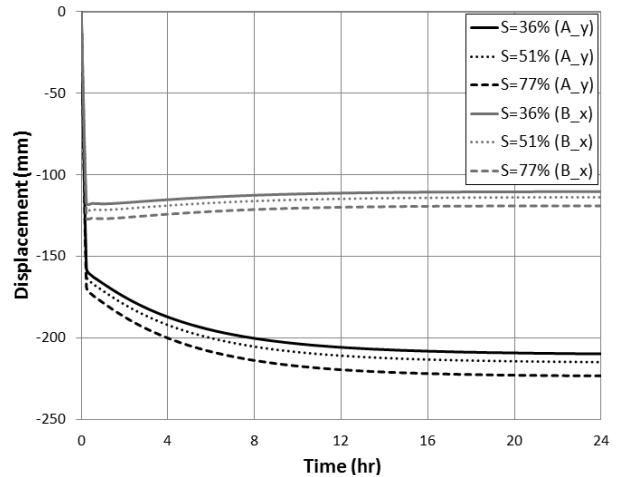


Fig. 10. Vertical displacement at A element and horizontal displacement at B element

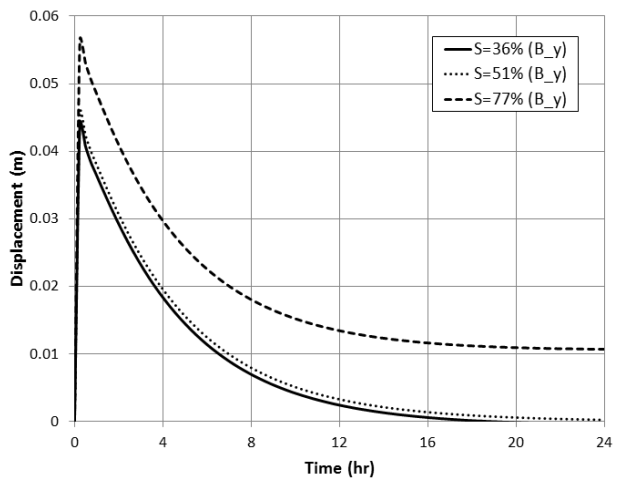


Fig. 11. Vertical displacement at B element

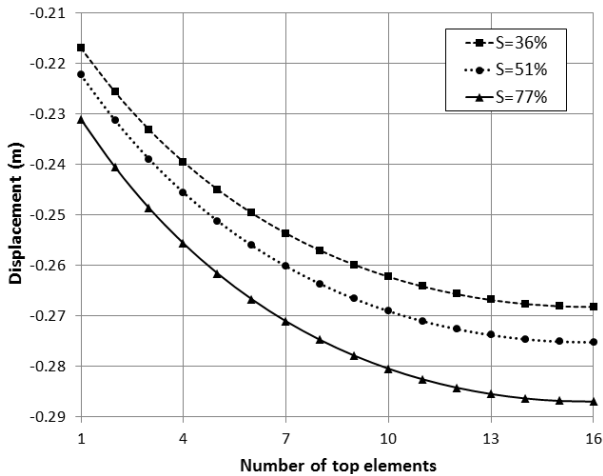


Fig. 12. Vertical displacement at the top elements of soil slope

진행으로 위위치로 되돌아온다. 그러나, 포화도가 제일 큰 77%의 초기 지반상태에서는 B요소에서 발생하는 수직변위가 원상태로 회복되지 않고 약간 뒷방향으로 거동되어 있는 것이 확인된다. 초기 함수비가 작은 조건보다 수직변위에 대하여 확인한 차이점을 보이고 있었다.

Figure 12는 사면 상단에 위치한 16개의 요소에서 발생한 수직변위를 나타내었다. 사면의 왼쪽과 오른쪽의 경계조건으로 x축의 변위가 발생하지 않도록 고정시켰으나 y축의 수직변위를 관찰한 결과, 사면 상단 안쪽으로 이동할수록 물의 하중과 침투가 많아지므로 수직변위가 증가한다. 이는 탄성에서 소성 거동으로 빠르게 진행되는 원인이기도 하다(Figures 13-15).

4.3 Drucker-Prager (1952) 모델을 이용한 사면파괴 분석

사면의 파괴상태를 확인하기 위하여 Drucker-Prager (DP) 소성 모델을 적용하여 파괴에 접근하였는지 평가할 수 있다. 지반은 동질한(isotropic) 재료로 가정하여 선형탄성해석(linear elasticity)으로 이루어졌지만, 응력경로를 추적하기 위해서 Eq. (12)과 같은 DP 모델을 사용하여 항복 여부를 파악하였다.

$$f(\sigma', c', \phi') = \|s\| - (A\phi' - B\phi' p') \leq 0 \quad (12)$$

$$\|s\| = \sqrt{s:s}, \quad s = \text{dev } \sigma', \quad p' = \text{tr } \sigma' / 3$$

$$A\phi' = \frac{2\sqrt{6} c' \cos \phi'}{3 + \beta \sin \phi'}, \quad B\phi' = \frac{2\sqrt{6} \sin \phi'}{3 + \beta \sin \phi'}, \quad -1 \leq \beta \leq 1$$

여기에서 s 는 축차응력(deviatoric stress), p' 는 평균유효응력(mean effective stress), c' 는 유효 점착력, ϕ' 는 유효내부마찰각, $\beta = -1$ 은 DP모델을 Mohr-Coulomb 삼축압축강도(TC)를 나타내는 항복경계면을 의미하며, $\beta = 1$ 은 Mohr-Coulomb 삼축인장강도

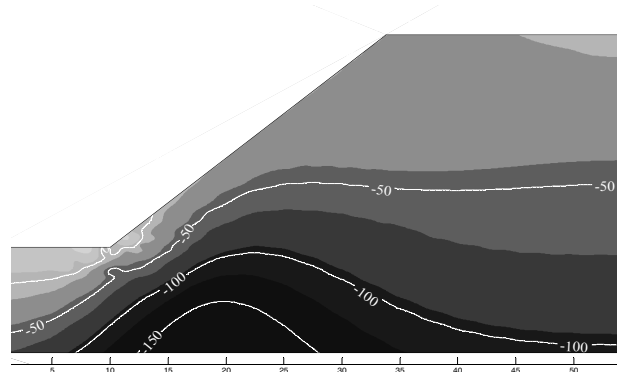


Fig. 13. Distribution of trial failure criterion using DP model in S=36%

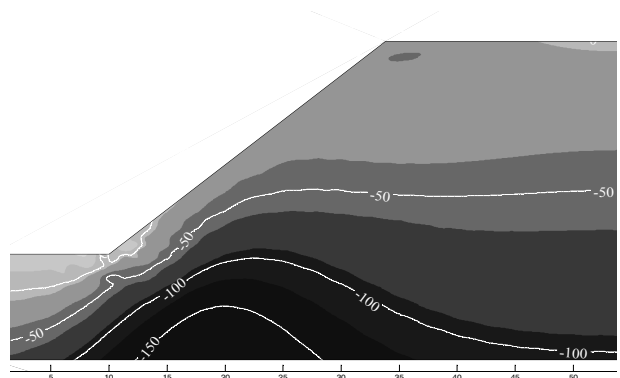


Fig. 14. Distribution of trial failure criterion using DP model in S=51%

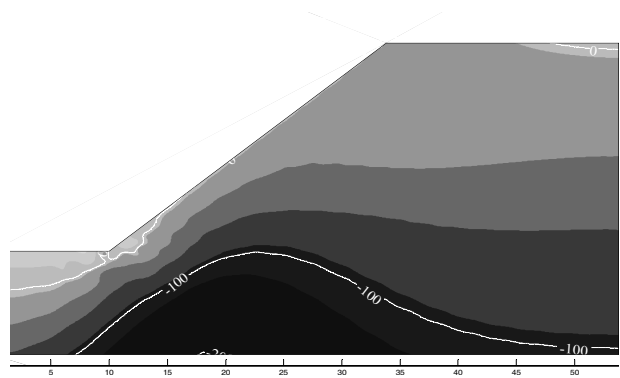


Fig. 15. Distribution of trial failure criterion using DP model in S=77%

(TE)를 나타내는 항복경계면에 해당한다. 항복식(f , yield function) 계산에 따라 $f < 0$ 는 탄성거동을 의미하며, $f \geq 0$ 는 소성거동을 의미한다. Eq. (3)과 같이 유효응력은 모관흡수력 함수로 구성되어 있기 때문에 불포화토의 탄성거동을 해석 할 수 있다. DP모델은 수치해석 상에서 소성변형을 진행시키지 못하고, 단지 파괴평가에 대한 기준으로 사용되었다. 그래서, 토립자를 연속체로 가정하는

유한요소해석에서 $f'' \geq 0$ (trial failure function) 의미는 소성거동이 시작하는 순간으로 가정할 수 있다. 수치해석 결과로써, Figures 13~15는 3가지 포화도에 따라 발생할 수 있는 사면의 파괴가 진행되는 과정을 확인할 수 있다.

수치해석 결과에서 알 수 있듯이, 불포화 토사사면의 모관흡수력이 작아질수록, 또는 포화도가 클수록 사면의 불안정성은 커진다 (contour의 색깔로 정도의 차이가 구분). 포화도가 증가하면서 항복경계 분포도는 사면의 상단과 표층부위에 소성영역으로 변해가고 있음을 확인할 수 있다. 포화도 77%에 해당하는 Figure 15에서는 사면표층 중간부근에서 사면 파괴 가능성이 확인되는 소성영역으로 $f'' = 0$ 임을 확인 할 수 있었다. Figure 10과 Figure 11에서처럼 수직과 수평변위에서 알 수 있듯이 지반의 36%와 51%의 초기 포화도 조건보다는 77%의 포화도 조건에서 사면의 불안정성을 분명하게 확인하였고, 항복경계면에 접근하는 사면내의 contour에서도 확인할 수 있었다. 사면 상단(Figure 15)에서도 Figure 12와 같이 변위가 가장 크게 일어나는 지점에서 파괴영역($f'' \geq 0$)을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 서울지역에서 채취한 3종류의 화강풍화토를 대상으로 불포화도 특성을 결정하고, 선행강우에 대한 불포화 풍화도 사면에 침투하는 강우에 대하여 지반내의 모관흡수력 변화와 사면의 위치에 따른 변형 특성, Drucker-Prager 소성모델을 이용하여 항복경계에 도달하는 지반의 파괴위치를 파악하였다. 유한요소해석 프로그램을 이용하여 강우 시 사면의 불안정성에 대한 연구결과를 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- (1) 선행강우로 인한 사면 초기조건을 포화도 크기로 가정하여 개발한 유한요소해석 프로그램을 사용하여 해석한 결과, 강우로 인한 사면 표층의 모관흡수력은 습윤상태(높은 포화도)일 때 느리게 감소하지만, 건조한 조건(낮은 포화도) 일수록 모관흡수력은 강우 침투에 의해 급격하게 감소함을 알 수 있었다.
- (2) 사면 상부와 하부위치에서 수직 및 수평변위를 측정한 결과, 지반의 초기 포화도가 클수록 변위가 점차적으로 크게 증가함을 알 수 있었고, 특히 사면표층 하부(B element)의 수직변위에서는 포화도가 클 때(선행강우로 많이 습윤한 상태, S=77%), 강우 시 단위중량의 상승으로 큰 수직거동이 발생한 후, 시간 경과에도 그 거동은 원상태로 회복되지 않고 불안정성을 보였다.
- (3) 강우 침투로 인한 사면의 불안정성을 판단하기 위하여 Drucker-Prager 소성모델을 이용한 항복경계 값들을 해석한 결과, 사면 상단과 표층에서 소성거동으로 변해가는 모습을 확인할 수 있었으며, 초기 포화도가 가장 큰 사면(S=77%)에서

표층의 포화가 제일 빨리 시작되고 사면 파괴의 가능성($f'' \geq 0$) 또한 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030842)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Kim, J. H., Park, S. W., Jeong, S. S. and Yoo, J. H. (2002). "A study of stability analysis on unsaturated weathered slopes based on rainfall-induced wetting." *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol. 18, No. 2, pp. 123-136 (in Korean).
- Kim, J. H., Hwang, W. K., Song, Y. S. and Kim, T. H. (2012). "Effect on matric suction in soils due to hysteretic soil water characteristic curves." *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol. 28, No. 4, pp. 91-100 (in Korean).
- Lee, K. H., Jeong, S. S. and Kim, T. H. (2007). "The effect of fines on stability of unsaturated soil slope." *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol. 23, No. 3, pp. 101-109 (in Korean).
- Jeong, S. S., Choi, J. Y. and Lee, J. H. (2009). "Stability analysis of unsaturated weathered soil slopes considering rainfall duration." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*. Vol. 29, No. 1, pp. 1-9 (in Korean).
- Brand, E. W. (1984). "Landslides in Southeast Asia: A State-of-the-Art Report." *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Canadian Geotechnical Society, Toronto, Vol. 1, pp. 17-59.
- Chatterjea, K. (1989). *Observation on the fluvial and slope processes in Singapore and their impact on the urban environment*, Ph.D. Thesis, National Univ. of Singapore, Singapore.
- Coussy, O. (2010). *Poromechanics*, John Wiley and Sons, New York.
- Drucker, D. C. and Prager, W. (1952). "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design." *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 10, No. 2, pp.157-165.
- Hughes, T. J. R. (1987). *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 1-51, 57-75.
- Jeong, S. S., Kim, J. H. and Lee, K. H. (2008). "Effect of clay content on well-graded sands due to infiltration." *Engineering Geology*, Vol. 102, No. 1-2, pp. 74-81.
- Kim, J., Jeong, S. and Richard, A. R. (2012). "Instability of partially saturated soil slopes due to alternation of rainfall pattern." *Engineering Geology*, Vol. 147-148, pp. 28-36.
- Kim, J. (2010). *Plasticity modeling and coupled finite element analysis for partially-saturated soils*. Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder, US.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S. and Sharma, J. (2004). "Influence of

- rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils." *Engineering Geology*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 251-262.
- Morgenstern, N. R. (1992). "The evaluation of slope stability-A 25 Year perspective." *Proceedings on Stability and Performance of Slopes and Embankments-II*, Berkeley, California, Vol. 1, pp. 1-26.
- Ng, C. W. W. and Shi, Q. (1998). "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage." *Computers and geotechnics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-28.
- Pham, H. Q. and Fredlund, D. G. (2004). "New apparatus for the measurement of the soil-water characteristic curves." *Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference*, Quebec, Quebec City, Canada.
- Pitts, J. (1985). *An investigation of slope stability on the NTI campus*, Applied Research Project Report-RPI/83, Nanyang Technological Institute, Singapore.
- Rahardjo, H., Li, X. E., Toll, D. G. and Leong, E. C. (2001). "The effect of antecedent rainfall on slope stability." *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 19, pp. 371-399.
- Rahardjo, H., Rezaur, R. and Leong, E. (2009). "Mechanism of rainfall-induced slope failures in tropical regions." *1st Italian Workshop on Landslides*, Vol. 1.
- RETIC version 6.02 (2009). *Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils by van Genuchten, M., Simunek, J., Leij, F. and Sejna, M.*
- Tan, S. B., Tan, S. L., Lim, T. L. and Yang, K. S. (1987). "Landslide problems and their control in Singapore." *Proceedings of the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Bangkok, Thailand, Vol. 1, pp. 25-36.
- Van Genuchten, M. (1980). "Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 35-53.
- Wei, J., Heng, Y. S., Chow, W. C. and Chong, M. K. (1991). "Landslide at Bukit Batok sports complex." *Proceedings of the 9th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Rotterdam, Bangkok, Thailand. Vol. 1, pp. 445-448.