

# 불포화 풍화토 사면의 모관흡수력 분포에 대한 지반조건과 강우강도의 영향

김용민\* · 이광우\*\* · 김정환\*\*\*

Kim, Yong Min\*, Lee, Kwang Woo\*\*, Kim, Jung Hwan\*\*\*

## Influence of Soil Characteristic and Rainfall Intensity on Matric Suction of Unsaturated Weathered Soil Slope

### ABSTRACT

The monolithically coupled finite element analysis for a deformable unsaturated soil slope is performed to investigate matric suction distribution on a soil slope subjected to rainfall infiltration, which can consider the hydraulic-mechanical characteristics for the analysis. The soil-water characteristic curves (SWCC) are experimentally determined to estimate three types of hydraulic properties of domestic areas. Based on the physical properties, the distribution of matric suction is investigated by considering the major factors, such as soil conditions, rainfall intensities, and slope angles. It is found from the results of this study that the matric suction rapidly decreases with an increase in rainfall intensity, regardless a slope angle. The slope surface is more easily saturated when its saturated hydraulic conductivity is smaller than rainfall intensity, and for the case of multi-layered soil slope, hydraulic characteristics of slope surface has a significant influence on matric suction distribution.

**Key words** : Unsaturated soil, Seepage analysis, Slope failure, Soil-water characteristic curve, Matric suction, Finite element analysis

### 초 록

본 연구에서는 강우 침투에 의한 사면의 모관흡수력 분포특성을 분석하기 위하여 수리학적·역학적 특성을 고려한 동시연계해석을 수행하였다. 이를 위해, 국내 3가지 지역에서 채취한 풍화토를 대상으로 함수특성곡선(SWCC)을 산정하였으며, 이를 토대로 지반조건, 강우특성, 사면경사에 따른 모관흡수력의 변화를 관측하였다. 그 결과, 강우강도가 증가함에 따라 사면내의 모관흡수력은 급격히 감소하는 경향이 나타났으며, 사면 경사에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 강우강도보다 포화투수계수가 작은 지반은 표층에서 포화가 쉽게 일어나는 것을 확인하였으며, 다층으로 존재하는 경우에도 사면표층 지반의 수리학적 특성이 모관흡수력 분포에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

**검색어** : 불포화토, 침투해석, 사면파괴, 함수특성곡선, 모관흡수력, 유한요소해석

## 1. 서론

최근 전세계적으로 기후변화에 의한 폭우, 폭설, 슈퍼태풍 등과 같은 예상하지 못한 이상기후 현상이 나타나고 있으며, 집중강우의 발생빈도가 증가되면서 사면파괴가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 우리나라의 경우에는 국토면적의 약 70%가 산지로 구성되어 있고, 우기에 발생하는 사면파괴는 강우침투로 인한 얇은 파괴가 대부분이기 때문에 산사태와 토석류의 주요한 원인이 되고 있다(조성은과 이승래, 2000; 김재홍 등, 2002; Jeong et al., 2008; Kim et al., 2012).

\* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Corresponding Author · Yonsei University · kimkimym@yonsei.ac.kr)

\*\* 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (geokwoo@yonsei.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (geo92@yonsei.ac.kr)

Received June 6 2012, Revised July 11 2012, Accepted April 1 2013

건조한 지반상태에서 강우가 일정 기간 동안 계속 지속되면 지반의 포화도 및 함수비가 증가하게 되고 사면 내 모관흡수력(matric suction)이 현저히 감소하여 사면의 불안정이 증가하게 된다(Lambe, 1996; Ng and Shi, 1998). 또한 불포화 사면에서는 선행강우에 의해 지반의 초기 강도가 좌우되기 때문에 안정성에 큰 영향을 미친다(Rahardjo et al., 2009). 따라서 사면파괴를 예상하고 이에 적절하게 대응하기 위해서는 불포화 지반의 모관흡수력과 강우특성과의 관계를 명확히 규명할 수 있어야 한다.

기존의 강우 시 사면안정 해석은 지하수위를 기준으로 저면부는 포화상태로, 지하수위상부는 건조 상태로 가정 한 후 주로 한계평형법을 이용하였으나, 이러한 해석은 불포화 사면 파괴의 주요한 원인이 되는 영향인자들을 적절히 고려할 수 없기 때문에 침투로 인한 불포화 사면의 거동 변화를 합리적으로 고려하기가 어렵다. 따라서 불포화토의 침투거동을 해석적으로 접근하려는 연구가 진행되어 왔다(Lam et al., 1987). 최근에는 강우침투에 의한 지표면 포화 깊이를 예측하고 사면의 안정성을 평가할 수 있는 상용 프로그램(GEO-SLOPE, 2012; FEFLOW, 2012)이 등장함에 따라 이를 활용한 사면안정해석 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim et al., 2004; 정상섭 등, 2009; Rahardjo et al., 2010).

한편, 기존의 상용 프로그램들과 수행되어 온 연구들은 침투해석과 사면의 역학적 거동을 분리하여 해석하는 단계해석(staggered analysis)을 주로 사용하였다(Duncan, 1996). 그러나 실제 현상에서는 지표면에 강우가 침투하면서 지반의 간극비를 변화시키고 그로 인하여 흙의 변형이 생기면서 불포화 투수계수가 달라지게 된다. 이러한 거동이 반복되면 지반의 침투능(infiltration rate)이 달라지게 되고 지표면으로부터 일정한 포화대(wetting band)가 형성되어 사면의 얇은 파괴를 유발하는 원인이 될 수 있다(김재홍 등, 2002; Kim et al., 2004; Jeong et al., 2008). 또한 유효응력은 침투에 따른 변형과 모관흡수력의 크기에 따라 변화하므로 침투해석과 사면의 변형 및 거동 해석이 분리되어 수행되면 정확한 사면내의 흙의 강도해석을 수행 할 수 없게 된다. Alonso 등(1988)은 불포화토의 흐름-변형이 연관된 해석방법을 제안하여 이를 사면 강우 침투해석에 적용하였으며, Cho and Lee(2001)는 이러한 연계해석을 통해 강우에 의한 사면의 불안정 메커니즘을 연구하였고, 응력장(stress field)으로부터 사면의 파괴면과 안전율을 산정하여 사면 안정성 평가 시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 침투와 흙의 거동 해석을 동시에 수행하고 간극수압과 변형이 연계된 유한요소해석을 수행하였으며, 불포화토의 수리학적 특성을 대표하는 함수특성곡선 실험을 통해 국내 주요산지에 분포되어 있는 불포화 풍화토의 특성범위를 결정하였다. 이를 바탕으로 강우조건, 지반조건, 사면경사에 따른 불포화 풍화토 사면의 침투해석을 수행하여 지반 내 모관흡수력의 변화를 관측하고자 한다.

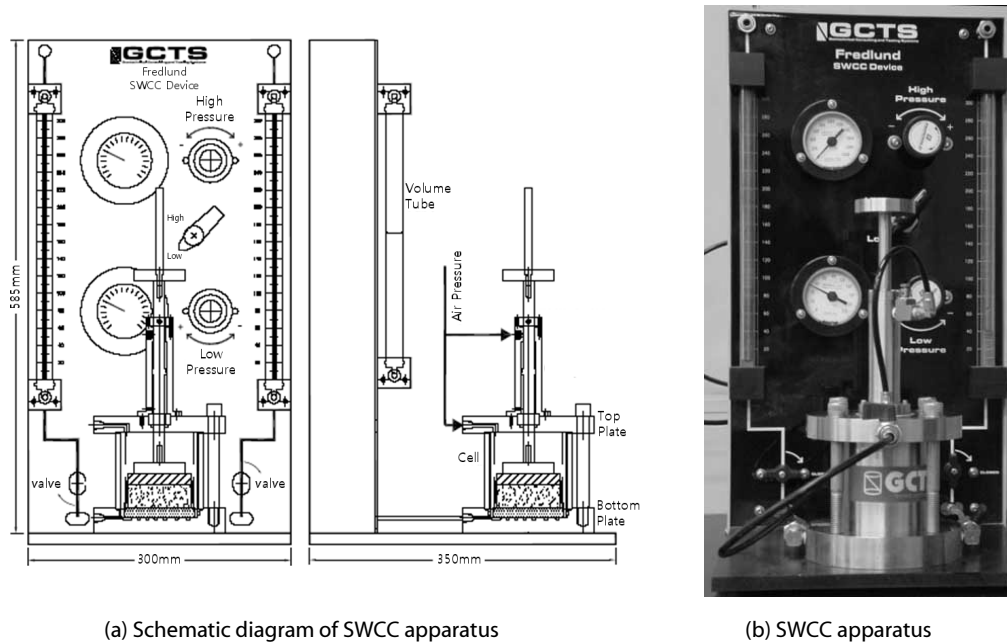
## 2. 불포화 풍화토 지반의 함수특성곡선

함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 불포화 지반의 고유한 특성이며, 지반의 수리학적 특성과 역학적 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 일반적으로 함수특성곡선은 지반이 갖고 있는 물의 양과 모관흡수력(matric suction)과의 관계로 정의 된다. 지반 속 물의 양은 중량함수비(gravimetric water content), 체적함수비(volumetric water content) 그리고 포화도(degree of saturation)로 표현할 수 있으나 침투해석을 위해서는 불포화 지반의 구성요소인 흙 입자, 물, 공기의 세 가지 구성성분으로 고려되어야 한다. 이러한 특징 때문에 포화지반 해석에서 사용되는 중량함수비( $W_w / W_s$ )보다는 간극공기를 고려하는 체적함수비( $V_w / V$ ) 개념으로 표현하는 것이 바람직하다. 그러므로 불포화 지반의 함수특성곡선은 체적함수비와 모관흡수력 관계의 곡선으로 표현한다. 따라서 본 절에서는 우리나라의 산지의 대부분을 차지하고 있는 화강풍화토 지반의 함수특성곡선을 산정하기 위해 서울, 김해, 여주지역의 풍화토를 대상으로 실험을 수행하였으며, 실험장치와 실험방법은 다음과 같다.

### 2.1 실험장치 및 시료

함수특성곡선 산정을 위하여 시료의 모관흡수력을 조절할 수 있는 GCTS SWC-150 장비(Pham and Fredlund, 2004)를 이용하였으며, Fig. 1과 같이 압력조절장치(pressure panel), 하중재하장치>Loading shaft), 부피측정장치(Volume tube), 압력셀(pressure chamber), 세라믹디스크(HAVE disks)등으로 구성되어 있다. Pressure chamber는 실험장치 안에 세라믹디스크를 이용하여 높은 압력과 장시간 실험을 통해 함수특성곡선을 측정할 수 있도록 한다. 세라믹디스크는 모관흡수력에 따라 견딜 수 있는 정도가 다르기 때문에 시료의 종류에 따라 각기 다른 압력의 세라믹 디스크를 사용해야 한다(모래: 100~300kPa, 실트질모래: 300~500kPa, 점토: 1500kPa). 실험기의 적용 가능한 모관흡수력의 범위는 0.1~1500kPa이며, pressure cell 밑 부분에 2개의 뷰렛으로 연결되어 있어 시료의 함수비 변화를 측정 할 수 있다. 함수특성곡선은 풍화토 시료의 상대밀도에 따라 매우 민감하게 변하기 때문에(이규현 등, 2007) 본 실험에서는 시료의 최소단위증량( $\gamma_{min}$ )과 최대단위증량( $\gamma_{max}$ )을 산정하고 50% 상대밀도에 해당하는 시료량을 결정하였다. 또한 균등한 다짐을 위해 3단 다짐법을 이용하였으며, 상향침투를 이용하여 시료를 포화시켰다.

함수특성곡선은 포화된 시료에 공기압을 가하여 불포화상태로 만들어 배출된 간극수의 부피를 통해 체적함수비를 산정하는 건조과정(drying process)과 배출된 간극수가 내부로 흡수되는 습윤과정(wetting process)을 통해 산정할 수 있다. 습윤과정을 통해



(a) Schematic diagram of SWCC apparatus

(b) SWCC apparatus

Fig. 1. GCTS pressure plate apparatus

Table 1. Physical properties of soils

Property	Seoul	Yeosu	Gimhae
Specific gravity ( $G_s$ )	2.64	2.65	2.68
Max. dry unit weight ( $\gamma_{d \max}$ , kN/m <sup>3</sup> )	17.5	16.5	15.8
Min. dry unit weight ( $\gamma_{d \min}$ , kN/m <sup>3</sup> )	13.5	13.3	12.2
Uniformity coefficient ( $C_u$ )	9.3	3.6	2.3
Coefficient of gradation ( $C_c$ )	0.77	1.11	0.3
USCS	SP	SW	SW

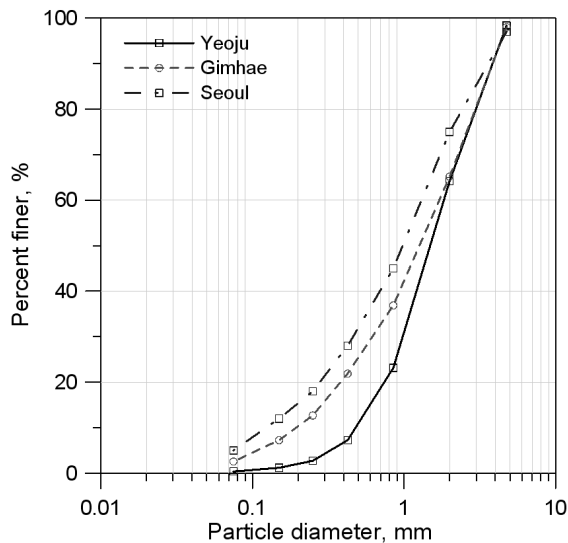


Fig. 2. Grain-size distribution curves

함수특성곡선을 산정하는 것이 실제 지반공학적인 문제와 유사한 방법이지만 건조과정 이후에 습윤과정을 모사해야 하기 때문에 상당한 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 건조과정을 통해 함수특성곡선을 산정하였다. 이력현상을 갖는 함수특성곡선은 약 2kPa 정도의 모관흡수력 차이를 보이며(Huang et al., 2011), 포화 체적함수비가 다르게 나타나 공기함입치나 불포화 투수계수에 영향을 미친다(김재홍 등, 2012).

본 연구에서는 우리나라 산악지역에 분포하는 화강풍화토를 대상으로 김해, 서울, 여주지역에서 채취한 3가지 흙 시료들에 대해 함수특성곡선 실험을 수행하였다. 실험 시료는 통일분류법상 SP, SW 계열로 확인되었으며 모든 시료에서 4번 체 통과율이 90% 이상, 200번체 통과율이 1% 미만으로 나타났다. 각 시료의 기본적인 물리적 특성들은 Table 1에 정리하였으며, Fig. 2에 3가지 시료에 대한 입도분포곡선을 도시하였다.

### 2.2 불포화 풍화토 지반의 함수특성곡선 산정

함수특성곡선은 토립자의 입경과 입도분포, 구성성분 그리고 간극비 등과 같이 흙의 종류에 따라 다른 형태를 보인다. 이 곡선의 형태를 결정짓는 중요한 요소는 공기 함입치(air-entry value)와 잔류체적함수비(residual volumetric water content)로 나눌 수 있다. 불포화 풍화토의 특성을 산정하기 위하여 다양한 입도분포, 다짐함수비, 간극비를 가진 시료를 서울, 여주, 김해 지역에서 채취하여 실험하였으며, 입도분포와 간극비를 인위적으로 조성하여 추가 실험을 수행하여 함수특성곡선을 표현하였다. Fig. 3은 흙에 대한 모관흡수력에 따라 배출되는 간극수의 양을 측정한 결과를 모관흡수력과 체적함수비의 관계로 표현한 함수특성곡선을 나타낸 것이다.

토립자의 입경이 비교적 크고 균등한 사질토질의 여주풍화토는 작은 모관흡수력의 변화에도 큰 체적함수비의 변화를 보이고, 사질토질에 비해 입경이 작은 실트질이나 점토질을 포함하는 서울 시료는 동일한 모관흡수력의 변화에 따른 체적함수비의 변화가 적고 사질토질에 비하여 큰 잔류함수비를 갖는다. 실험데이터는 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선 식을 이용하여 통일분류법 상 SP에 해당하는 서울지역(Type A)과 SW에 해당하는 여주, 김해 지역(Type B)의 함수특성곡선으로 구분하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 함수특성곡선의 공기 함입치는 Type A지반이

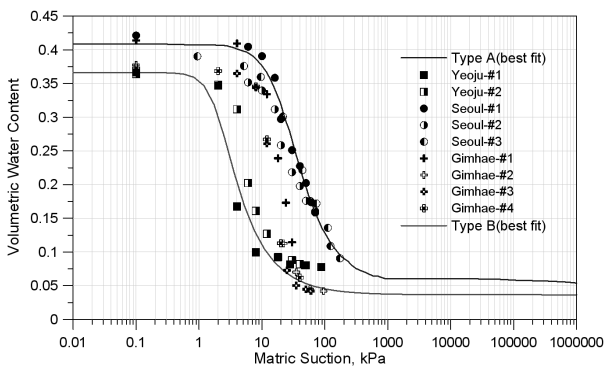


Fig. 3. SWCC for the three soils: experimental data and fitted curves

Table 2. Curve-fitting parameters for the SWCC and saturated permeability of the soils

Type	Type A	Type B
$\alpha$	0.0423 /kPa	0.27 /kPa
$n$	2.06	3.1
Saturated volumetric water content ( $\theta_s$ )	0.41	0.36
Residual volumetric water content ( $\theta_r$ )	0.054	0.037
Saturated permeability ( $k_s$ )	$4.67 \times 10^{-6}$ m/sec	$5.12 \times 10^{-5}$ m/sec

Type B지반보다 약 6.4배 크게 나타났으며, 함수특성곡선의 기울기를 결정 짓는  $n$ 값과 잔류 체적함수비는 각각 1.5배 차이를 나타내었다.

### 3. 침투해석

#### 3.1 지배방정식

자연상태의 흙은 토립자( $n^s$ ), 물( $n^w$ ), 공기( $n^a$ )로 구성되어 있으며, 체적비( $1 = n^s + n^w + n^a$ )에 따라 각 요소들을 구분하는 mixture theory(Coussy, 2010)가 불포화토 지배방정식의 근간을 이루고 있다. 불포화토의 미지수는 토립자의 변위( $u$ )와 토립자 내부에서 발생하는 간극수압( $P_w$ )이며, 이를 계산하기 위해서는 두 개의 지배방정식이 필요하다. 지배방정식은 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. 불포화 지반의 유한요소해석을 위하여 침투에 의한 지반의 거동과 수리학적-역학적(hydro-mechanical) 특성을 동시에 고려하여 해석할 수 있는 수치해석 코드를 구성하였으며 지배방정식은 다음과 같다(Kim, 2010).

첫째로 불포화토 내 물의 이동은 흙 입자의 움직임에 종속되기 때문에 흙 입자에 대한 평형방정식(balance of linear momentum)으로부터 변위를 계산할 수 있다. 둘째로 불포화토 내 물의 흐름을 파악하여 간극수압을 계산할 수 있는 물에 대한 평형방정식(balance of mass of the water)으로부터 간극수압을 계산할 수 있다. 각각의 평형 방정식들은 다음 Eqs. (1) and (2)와 같다(Borja, 2004).

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

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

여기서 DIV(divergence)는  $\nabla$ 를 의미하며,  $\sigma$ 는 전응력,  $\rho$ 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.

#### 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 적용

하였다. 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. (3)과 같은 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$C(D)\dot{D} + F^{INT}(D) = F^{EXT}(D) \quad (3)$$

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 내재적방법(fully-implicit time integration)을 통해 위 Eq. (3)과 같은 행렬방정식을 Newton-Raphson 방법을 사용하여 미지수인 지반의 변위와 내부 간극수압을 계산할 수 있으며, Eqs. (4) and (5)로 다시 표현된다.

$$C(D_{n+1})\dot{D}_{n+1} + F^{INT}(D_{n+1}) = F^{EXT}(D_{n+1}) \quad (4)$$

$$C(D_{n+1})\dot{D}_{n+1} + K(D_{n+1})D_{n+1} = F^{EXT}(D_{n+1}) \quad (5)$$

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 수리학적-역학적 흙의 거동을 비선형 접근 방법인 반 내재적 방법(semi-implicit time integration)으로 결과를 도출하였다(Kim, 2010).

#### 4. 강우특성에 따른 불포화 풍화토 사면의 수치해석 결과

지반조건, 강우특성, 사면경사에 따른 불포화 풍화토 사면의 모관흡수력 분포변화를 분석하기 위해서 3장에서 제시한 동시해석 프로그램을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 지반조건은 2장에서 언급한 바와 같이 국내 3가지 지역에서 채취한 풍화토를 대상으로 함수특성곡선 실험을 통해 Type A와 Type B로 지반을 구분하였다.

강우특성은 강우강도와 지속시간으로 나눌 수 있는데, 강우강도는 일상에서 자주 발생되는 10mm/h와 얇은 사면파괴를 유발할 가능성이 큰 30mm/h, 50mm/h를 사용하였다(정상섭 등, 2009). 강우 지속시간의 경우에는 강우강도에 의해 사면 표층부가 완전 포화되는 시간만큼 해석을 수행하였으며 그 범위는 12시간~72시간이다. 또한 본 해석에서는 Fig. 4와 같이 사면높이가 10m로 일정하며, 사면의 경사는 30°, 45°, 60°로 변화시켜가면서 모관흡수력에 미치는 영향을 분석하였다. 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 연직방향의 변위를 구속하였다. 초기 지하수위는 건기 시를 가정하여 사면 바닥에서 3m 높이에서부터 7°경사를 가지고 선형적으로 증가하는 것으로 설정하였으며, 지하수위 상부인 불포화토 영역에서 높이에 따라 최대 모관흡수력을 -75kPa로 가정하였다(Rahardjo et al., 2007; Rahardjo et al., 2010). Table 3은 해석의 종류를 나타내고 있으며, Table 4는 해석에 사용된 지반의 강도정수를 정리하였다.

Fig. 5는 Type A( $k_s = 4.67 \times 10^{-6}$  m/sec)지반의 45°경사를 갖는 사면에서 시간에 따른 모관흡수력 변화 분포도이며, 각각의 요소는 9개 절점으로 구성되어 있기 때문에 4개의 모서리 절점에서 얻어진 모관흡수력의 평균값으로 나타내었다. Fig. 5에서와 같이 강우강도가 클수록 사면 표층 및 내부지반이 포화되는 시간이

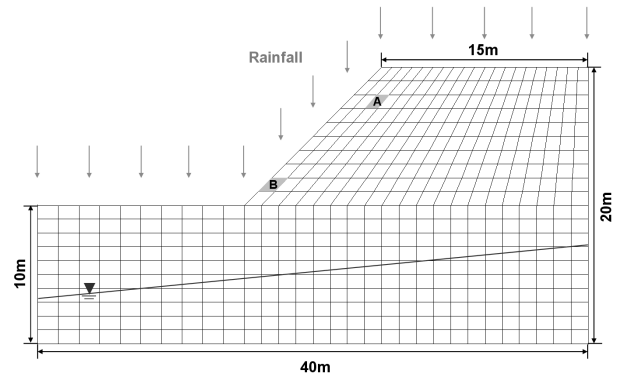


Fig. 4. Soil slope mesh used for seepage analysis and ground water level

Table 3. Analysis cases

Soil type	Slope angle	Slope height	Rainfall intensity	Rainfall duration	Water table
Type A	30°	10m	10mm/h	24~72hr	Dry condition
Type B	45°		30 mm/h		
-	60°		50 mm/h		

Table 4. Properties of soils used in numerical analysis

Type	Type A	Type B
Lame parameter ( $\lambda, \mu$ )	$29 \times 10^6, 7 \times 10^6$ Pa	
Solid real density ( $\rho^{sr}$ )	2700 kg/m <sup>3</sup>	
Water real density ( $\rho^{wr}$ )	1000 kg/m <sup>3</sup>	
Air real density ( $\rho^{ar}$ )	1.2 kg/m <sup>3</sup>	
Viscosity of water ( $\eta_w$ )	$10^{-3}$ Pa·s	
Initial porosity ( $n = n^w + n^a$ )	0.41 (=0.2+0.21)	0.38 (=0.18+0.2)
Saturated permeability ( $k_s$ )	$4.67 \times 10^{-6}$ m/sec	$5.12 \times 10^{-5}$ m/sec
Residual degree of saturation ( $S_r$ )	0.131	0.08

짧아지고 모관흡수력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 특히, 사면 내부(element A)보다 사면 표층에서(element B) 모관흡수력이 빨리 감소하여 포화상태에 도달한다. 이는 Fig. 5(a)에서와 같이 사면 표층에서 내부로 물이 침투되는 과정에서 모관흡수력이 감소 되는 시간이 지연되기 때문이다.

Fig. 6은 사면경사가 모관흡수력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Type A 지반에서 의 결과를 비교 도시하였다. 강우강도가 10mm/h의 경우에는 지반의 포화투수계수보다 작은 양의 비가 내렸기 때문에 포화가 발생한 곳은 없었으나(Fig. 6a), Fig. 6(b)에서와 같이 강우강도가 10mm/h이상의 경우에는 대부분 표층지반

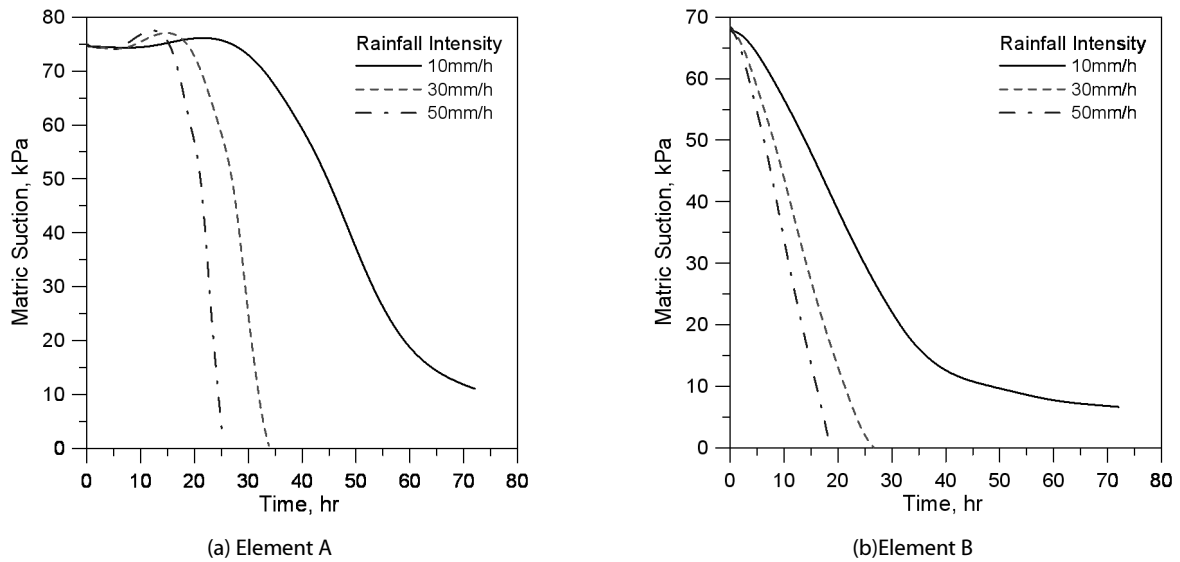


Fig. 5. Variation of matric suction with slope angle 45°(Type A)

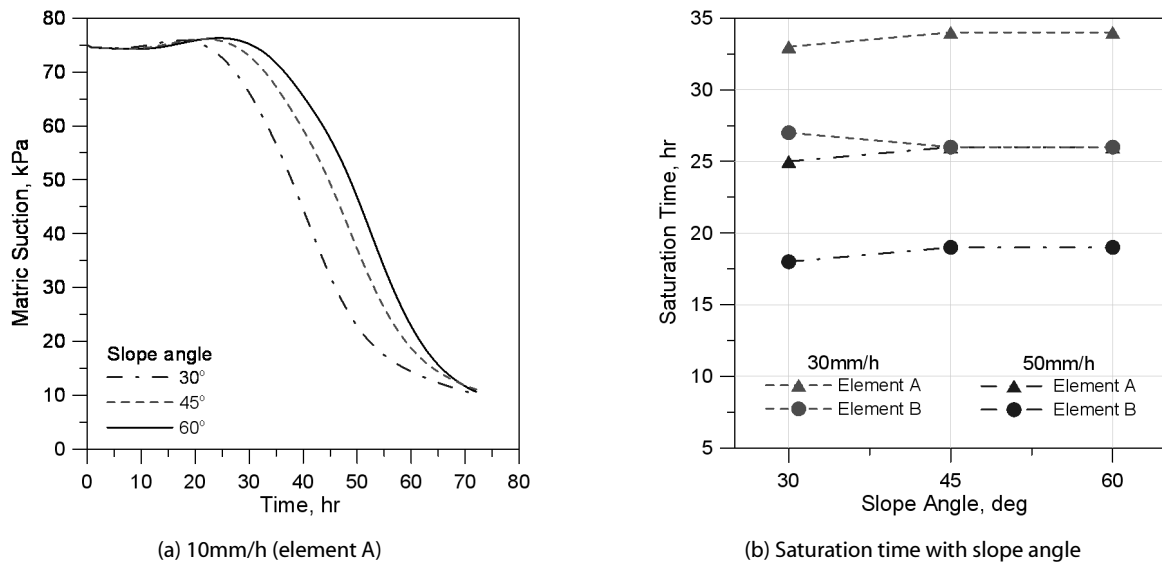


Fig. 6. Effect of slope angle for matric suction (Type A)

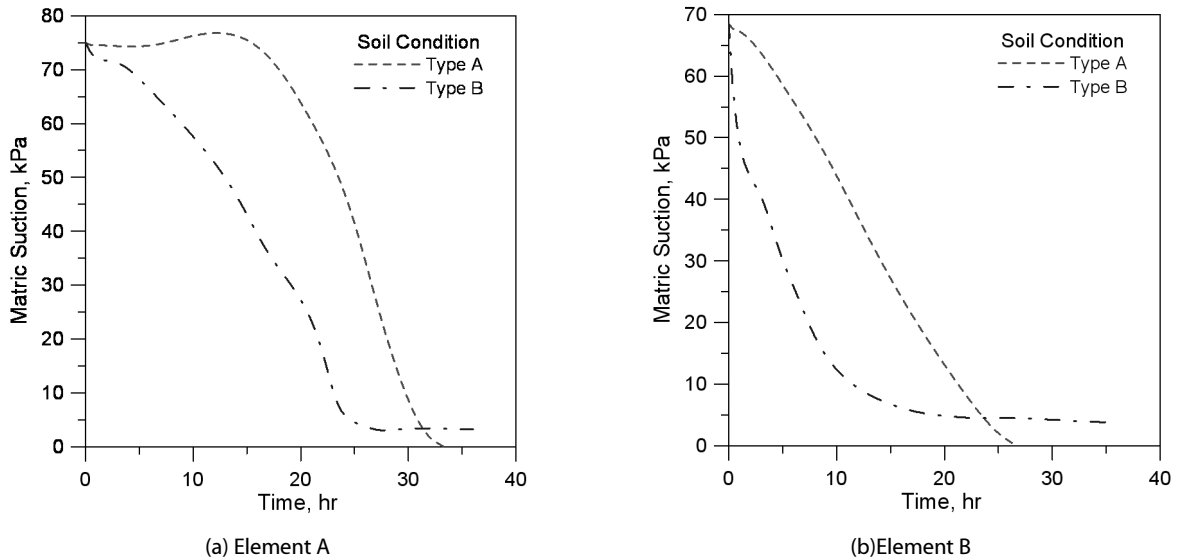


Fig. 7. Variation of matric suction in two types of soil (30mm/h)

이 포화되었으며, 사면경사에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 강우지속시간이 증가함에 따라 모관흡수력이 감소하는 정도는 다소 차이가 있으나, 최종적으로 포화되는 시점이 거의 동일하기 때문에 사면경사는 모관흡수력 감소에 큰 영향을 주지 않는다. 즉, 경사에 따른 사면의 안전을 증감은 역학적 관계에 의해 사면활동력 변화 등에 크게 좌우되고, 모관흡수력은 경사에 의한 영향보다 지반조건이나 강우강도에 큰 영향을 받아 사면의 안정성을 감소시키게 된다. Chen and Young(2006)은 사면의 경사에 따라 침투깊이(infiltration depth)의 차이가 크지 않음을 보고한 바 있다.

Fig. 7은 사면경사 30°에서의 지반조건에 따른 모관흡수력의 분포도를 도시하였다. Fig. 7(a)에서와 같이 사면 내부(element A)에서의 모관흡수력은 투수계수가 강우강도보다 큰 Type B ( $k_s = 5.12 \times 10^{-5}$  m/sec)지반에서 빠르게 감소하였으며, Type A ( $k_s = 4.67 \times 10^{-6}$  m/sec)지반에서는 강우가 시작된 18시간 이후에 모관흡수력이 감소하기 시작하였다. 최종적으로는 투수계수가 강우강도보다 작은 Type A지반에서 먼저 포화가 발생하였다. 그리고 Fig. 7(b)에 도시한 바와 같이 Type B지반에서 초기 모관흡수력은 Type A지반에 비해 빠르게 감소하는 경향을 보이지만 Type A지반 표층에서 먼저 포화되었으며, 시간지연형상은 나타나지 않았다. Cho and Lee(2001)의 연구결과에서는 포화투수계수가 강우강도보다 작을 때 사면 표층에서의 모관흡수력이 급격히 감소하여 먼저 포화가 발생한다고 보고하고 있다. 그렇지만 본 연구결과에서는 초기 모관흡수력(0~24시간)이 투수계수가 큰 Type B 지반에서 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 모관흡수력의 변화는 지반조건에 따라 다르게 나타나며, 불포화 지반의 투수계수와 함수특성곡선의 공기함입치, 잔류체적함수비, 포화체적함수비에 크게

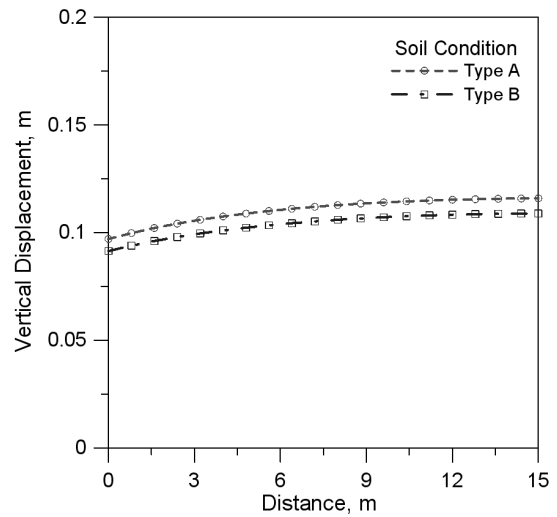


Fig. 8. Vertical displacement on the top surface of slope

의존하기 때문에 침투해석 시 사용된 함수특성곡선의 차이로 인해 모관흡수력의 감소경향이 상이하게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 8은 사면 상부지반의 각 요소에서 발생한 최종 수직변위를 도시한 것이다. Type A지반의 변위가 Type B지반보다 최대 8mm 크게 발생하였으며, 사면 표층에서 멀어질수록 변위가 증가하는 경향을 나타냈다. 변위는 강우에 의해 침투가 발생하면서 초기 간극률이 변하게 되고 간극률의 변화는 지반의 함수특성곡선과 불포화투수계수 등을 변화시키며, 요소(element)의 강성행렬(stiffness matrix)계산에 영향을 미치기 때문에 지반조건에 따라 변위 발생 정도가 다르게 나타났다. 이와 같이 강우침투에 의해 토립자들간에 압축이 발생하고 자중에 의한 연직방향 변형이 발생

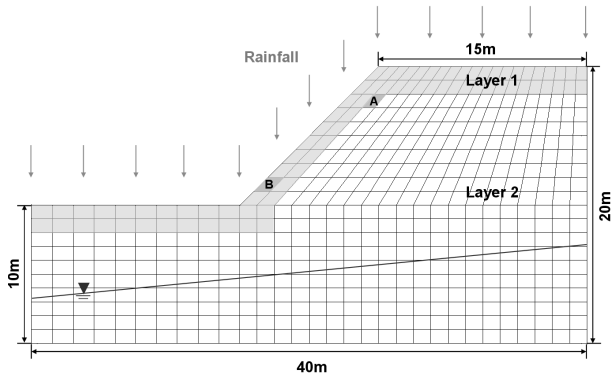


Fig. 9. Non-homogeneous soil slope mesh with two layers

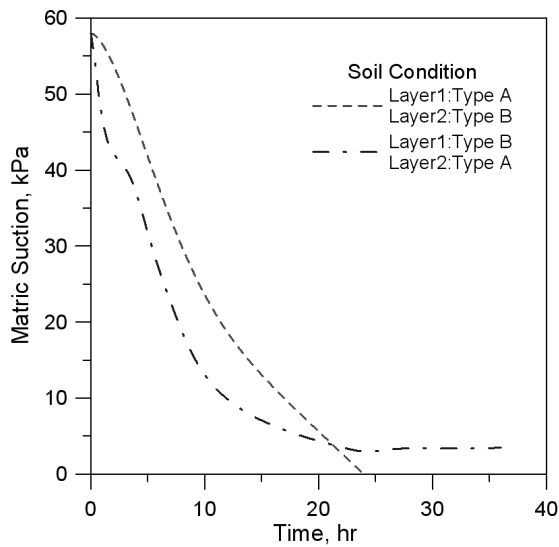
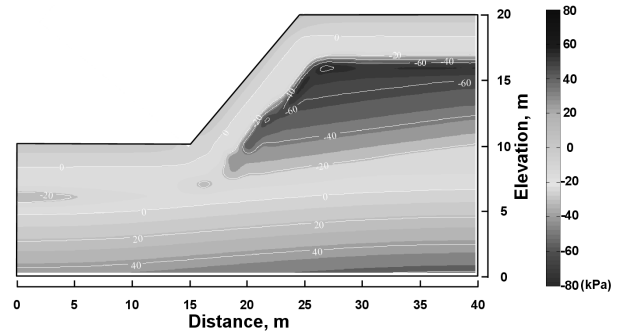


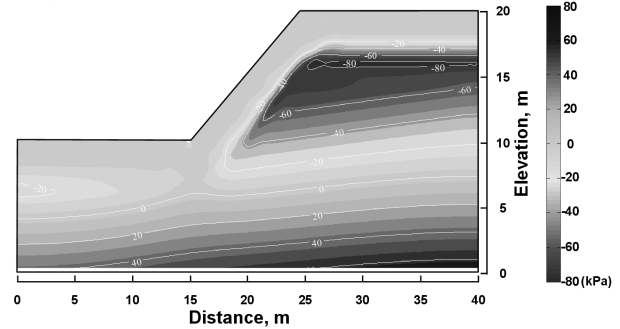
Fig. 10. Variation of matric suction at A element (45°, 30mm/h)

함에 따라 지반 간극률이 감소하여 사면 내부에서 발생하는 모관흡수력은 초기에 증가하다가 감소하는 경향을 보인다.

지금까지는 균질한 단일 층에 대해 침투해석을 수행하였으나, 실제 현상에서는 성토나 자연퇴적에 의해 다층으로 지반이 구성되어 있는 경우가 흔하다. 따라서 본 연구에서도 사면표층을 따라 약 2m두께만큼 지반의 종류를 구분하여 침투해석을 수행하였다 (Fig. 9). 사면 내부(element A)에서의 시간에 따른 모관흡수력의 변화는 Fig. 10에 나타내었으며, 2개의 층으로 존재하는 지반 내의 모관흡수력 변화는 사면 내부의 원지반보다 표층지반의 수리학적 특성에 따라 크게 좌우되어 표층에 분포하는 지반의 투수계수가 원지반보다 작을 경우 쉽게 포화되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 11). Fig. 11(a)에서 보이는 바와 같이, 사면표층부에서 양의 간극수압이 발생하는 것은 표층이 포화된 후(간극수압=0) 각 nodal point 에 지속적으로 강우강도가 적용되고 있기 때문으로 판단된다.



(a) Surface layer: Type A and subsurface layer: Type B



(b) Surface layer: Type B and subsurface layer: Type A

Fig. 11. Distribution of matric suction in two layered soil slope (30mm/h)

## 5. 결론

본 연구에서는 불포화 풍화토 사면에 침투하는 강우에 대하여 지반특성, 강우특성 그리고 사면경사를 고려한 사면의 침투거동 특성을 분석하였다. 이에 국내의 3가지 지역에서 채취한 풍화토를 대상으로 함수특성곡선을 결정하고, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 사면 내 모관흡수력의 변화 분포를 관측하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 강우 시, 사면내부의 모관흡수력은 강우강도가 증가함에 따라 감소하는 비율이 증가하여 빠른 시간에 사면 표층지반을 포화시키며, 사면을 구성하는 불포화 지반의 수리학적 특성에 따라 사면 내부를 포화시키는 시간을 지연시킬 수 있었다.
- (2) 강우강도가 지반의 포화투수계수보다 큰 경우, 사면의 경사에 따른 모관흡수력의 변화는 미미하며, 모관흡수력은 경사에 의한 영향보다는 지반의 수리학적 특성과 강우강도가 흡의 강도에 큰 영향을 미친다.
- (3) 지반의 포화투수계수가 강우강도보다 큰 경우에는 모관흡수력이 감소하는 시간은 빠르나, 포화투수계수가 강우강도보다 작은 경우에는 표층지반의 포화가 먼저 발생한다. 결과적으로,



투수계수가 작은 지반에서 포화가 쉽게 일어나는 것을 의미하며, 다층지반에서도 모관흡수력의 변화는 원지반의 특성보다는 사면표층 지반 특성에 따라 크게 좌우된다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0030842).

## 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 of 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).
- Kim, J. H. and Hwang, Y. C. (2011). "Finite element analysis of partially saturated soil considering pore-air pressure." *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol. 27, No. 3, pp. 95-102 (in Korean).
- Lee, K. H., Jeong, S. S. and Kim, T. H. (2007). "Effect of fines on the stability of unsaturated soil slopes." *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 Civil Engineers Society*. Vol. 29, No. 1, pp. 1-9 (in Korean).
- Cho, S. E. and Lee, S. R. (2000). "Slope stability analysis of unsaturated soil slopes due to rainfall infiltration." *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol. 16, No. 1, pp. 51-64 (in Korean).
- Alonso, E. E., Batlle, F., Gens, A. and Lloret, A. (1988). "Consolidation analysis of partially saturated soils-Application to earthdam construction." *Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, pp. 1303-1308.
- Borja, R.I. (2004). "Cam-clay plasticity. Part V : A Mathematical Framework for Three-phase Deformation and Strain Localization Analyses of Partially Saturated Porous Media." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, pp. 5301-5338.
- Chen, L. and Young, M. H. (2006). "Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces." *Water Resources Research*, Vol. 42, pp. 1-9.
- 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.
- Coussy, O. (2010). *Poromechanics*, John Wiley and Sons, New York.
- Duncan, J. M. (1996). "State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes." *Journal of Geotechnical engineering*, Vol. 122, No. 7, pp. 577-596.
- Hughes, T. J. R. (1987). *The finite element method*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 1-51, 57-75.
- Geo-slope International. (2012). *Seep/w for finite element seepage analysis, user's guide*, Calgary, Alta., Canada.
- FEFLOW (2012). *FEFLOW for fluid flow analysis, user's guide*, DHI-WASY, GmbH, Germany.
- 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. (2010). *Plasticity modeling and coupled finite element analysis for partially-saturated soils*, Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder, US.
- 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., 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.
- Laloui, L., Klubertanz, G. and Vulliet, L. (2003). "Solid-liquid-air coupling in multiphase porous media." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 27, No. 3, pp. 183-206.
- Lam, L., Fredlund, D. G. and Barbour, S. L. (1987). "Transient seepage model for saturated - unsaturated soil systems : A Geotechnical Engineering Approach." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 565-580.
- Lambe, P. C. (1996). *Residual soils*, In: special report 247. Landslides: Investigation and Mitigation, Washington DC: TRB, National Research Council, pp. 507-524.
- 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.
- Rahardjo, H. and Leong, E.C. (1997). "Soil-water characteristic curves and flux boundary problems." *Unsaturated Soil Engineering : Practice-Geotechnical Special Publication*, Vol. 68, pp. 88-112.
- Rahardjo, H., Nio, A. S., Leong, E. C. and Song, N. Y. (2010). "Effect of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 11, pp. 1555-1564.
- Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B. and Leong, E. C. (2007). "Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 33, No. 12, pp. 1532-1543.
- Rahardjo, H., Rezaur, R. and Leong, E. (2009). Mechanism of rainfall-induced slope failures in tropical regions, *1st Italian Workshop on Landslides*, Vol. 1.
- 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.