

불포화토 사면 안정해석에서 선행강우의 영향에 관한 연구

이영생* · 윤승현**

Lee, Yeongsaeng*, Yoon, Seunghyun**

Influence of Antecedent Rainfall in Stability Analysis of Unsaturated Soil Slope

ABSTRACT

The behavior of the unsaturated soil slope can be influenced by the various factors such as the hydraulic characteristics, the mechanical characteristics, the coefficient of conductivity, the stratifications, the rainfall conditions i.e. the rainfall intensity, the rainfall pattern, the duration time of the rainfall and the antecedent rainfall etc. It is known that the slope failure is influenced greatly by the antecedent rainfall rather than the rainfall condition at the failure time, so the antecedent rainfall is supposed to be a very important factor in slope stability analysis among these factors. To predict and to prevent the slope failure by the rainfall, the distribution of the matric suction by the antecedent rainfall must be considered first of all and the slope stability analysis should be carried out by considering the successive rainfall characteristics. In this research, 3 samples with different quantity (5%, 10%, 20%) of silts were prepared and the SWCC (Soil-water characteristic curve) tests were carried out and the associated parameters were analyzed. After analyzing the distribution of the matric suction and the change of the mechanical characteristics such as the stress and the strength when applying the antecedent rainfall for one month and the successive intensive rainfall for 12 hours, the slope stability analyses were carried out numerically. And the influence of the antecedent rainfall for one month and the SWCC on the stability of a slope were compared and analyzed.

Key words : Antecedent rainfall, Soil-water characteristic curve, Saturated coefficient of permeability, Matric suction, Slope stability

초 록

불포화토 사면 거동은 불포화토의 수리학적 특성 및 역학적 특성, 지반 투수계수, 지반 내 지층 구조, 강우조건 즉 강우강도, 강우패턴, 강우 지속 시간, 선행강우 등의 영향을 받는다. 이와 같은 여러 요소 중 산사태는 사면 파괴 당시 강우조건보다 그 이전에 발생했던 선행강우의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있어 선행강우의 영향은 사면 안정성 해석에서 중요한 요소로 작용할 것으로 예상된다. 따라서 강우에 의한 산사태 발생을 예측하고 대책을 마련하기 위하여 선행강우에 따른 사면 내 모관흡수력 분포를 반드시 고려하여야 하며 이후에 발생한 강우특성을 반영하여 사면 안정성 검토를 수행하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 경우 실트질 흙 함량 구성을 5%, 10%, 20%로 달리한 3가지 시료를 조성한 후 각각의 시료에 대하여 흡수수특성곡선 시험을 수행하여 관련 매개변수들을 분석하였다. 한 달 동안의 선행강우 적용과 집중호우에 해당하는 12시간 동안의 강우가 지속적으로 내릴 때 불포화토 내 모관흡수력 분포 및 응력, 강도와 같은 역학적 특성 변화 등을 분석하고 사면안정 수치해석을 수행한 후 선행강우와 흡수수특성곡선이 사면의 안정에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

검색어 : 선행강우, 흡수수특성곡선, 포화투수계수, 모관흡수력, 사면안정

* 정회원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Kyonggi University · yslee@kyonggi.ac.kr)

** (주)이산 토질부, 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 졸업 (Isan corporation · ssieki41@gmail.com)

Received August 5, 2015/ revised August 17, 2015/ accepted August 17, 2015

1. 서론

근래에 들어 집중호우에 의한 사면 파괴가 빈번하게 발생하면서 강우로 인한 사면의 불안정성을 적절하게 평가하는 것은 재해 방지 측면에서 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 우기에 발생하는 사면파괴의 대부분은 강우의 지반 침투로 인하여 발생하게 되는데, 흙의 간극수압이 존재하는 불포화토 사면 안정해석의 경우 모관흡수력이 전단강도에 미치는 영향을 고려해야 한다. 강우의 침투로 인하여 모관흡수력이 감소하는 경우 전단강도가 감소하게 되어 파괴가 발생하게 된다. 불포화토 사면 거동은 불포화토의 수리학적 특성(Hydraulic characteristics) 및 역학적 특성(Mechanical characteristics), 지반 투수계수, 지반 내 지층 구조와 강우조건 즉 강우강도, 강우패턴, 강우 지속시간, 선행강우 등과 같은 여러 가지 변수의 영향을 받는다 (Cho and Lee, 2001; Rahardjo et al., 2001). 이러한 각각의 요소는 안정해석 결과에 중대한 영향을 미칠 수도 있기 때문에 각각의 영향에 대하여 여러 연구자(Cho and Lee, 2001; Rahardjo et al., 2001; Cai and Ugai, 2004; Lee et al., 2009; Oh and Vanapalli, 2010; Kim et al., 2012)가 연구한 바 있다. Cho and Lee(2001)는 불포화 사면 안정해석을 위하여 침투-변형 연계 방법에 순응력 개념을 도입하였고, Cai and Ugai (2004)는 지반의 수리학적 특성이 불포화-포화 사면의 일시적 흐름과 사면안정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Jeong et al. (2009)은 국내 풍화토 사면에 대하여 지반조건을 달리하여 강우 지속시간에 따른 포화깊이, 안전율 변화 등을 분석하였다. Kim et al. (2013)은 지반조건, 강우강도, 사면경사 등에 따른 지반 내 모관흡수력의 변화를 분석하였는데 사면표층 지반의 수리학적 특성이 모관흡수력 분포에 큰 영향을 준다고 밝힌 바 있다. 이러한 사면안정해석 시 지표면을 통한 강우 침투율은 지반의 물리학적 특성, 강우강도 등의 영향을 받는다. 일반적으로 사면안정해석 시 예상되는 파괴면은 대부분이 지하수면 아래에 위치하며 지하수면 위의 흙의 간극수압은 사면의 안정성에 도움이 되지 않을 것으로 가정하여 무시된다. 그러나 지하수위가 깊은 곳에 위치하거나 얕은 깊이의 표면파괴가 예상될 경우에는 불포화된 부분의 흙의 간극수압으로 인한 모관흡수력이 사면의 안정성에 미치는 영향을 더 이상 무시할 수 없다. 기존의 연구 결과(Fredlund et al. 1995)에 따르면 높은 강도의 강우가 지속될 경우에도 지하수면의 높이는 대부분 수미터의 범위에서만 상승하므로 지표면하 깊은 곳에 위치한 지하수위의 상승은 얕은 사면파괴가 발생하는 경우에는 큰 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. 또한 강우 침투에 의한 산사태는 사면 파괴 당시의 강우조건도 중요하지만 그 이전에 발생했던 선행강우의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있는데(Rahardjo et al., 2001; L'Heureux et al., 2006) 이러한 선행강우의 영향은 사면 안정성 해석에서 중요한

요소로 작용할 것으로 예상된다. 건조한 상태의 불포화 사면은 평상시 강우에 의해 함수비 및 불포화 투수계수가 증가하고 그 결과 강우 침투속도가 빨라지게 되며 이로 인하여 초기 모관흡수력은 점점 감소하게 된다. 따라서 강우에 의한 산사태 발생을 예측하고 대책을 마련하기 위해서 선행강우에 따른 비탈면의 간극수압 분포를 반드시 고려하여야 하고 이후에 발생한 강우특성을 반영하여 비탈면 안정성 검토를 수행하여야 한다.

본 연구의 경우 수원시 광교산 부근에서 시료를 채취하여 실험실 실험 흙 함량 구성을 5%, 10%, 20%로 달리한 3가지 시료를 조성한 후 각각의 시료에 대하여 흙함수특성곡선(Soil-water characteristic curve) 시험을 수행하여 관련 매개변수들을 분석하였다. 이러한 흙함수특성곡선을 토대로 기존에 van Genuchten (1980)이 제안한 식에 의해 투수계수를 산정하였으며 이와 같은 불포화토 사면에서 선행강우 적용에 따른 불포화토 내의 수리학적 특성 및 역학적 특성 변화와 그에 따른 지반 내 간극수압, 응력, 강도 변화 등을 분석함으로써 사면 안정성에 대하여 검토하였다. 이를 위하여 사면 안정해석의 경우 우리나라에서 일반적으로 나타나는, 지표면으로부터 일정한 깊이까지 표토층이 분포하고 그로부터 일정한 깊이 아래 기반암층, 그 아래 일정한 깊이에 지하수위면이 존재하는 임의 사면을 가정하였는데 채취한 시료가 임의 사면의 표토층을 구성하는 것으로 가정하였다. 집중호우 작용 전후 수일 내지 수주 동안의 강우가 사면안정성에 직접적 영향을 미치는 것으로 나타났으며 그에 따른 사면안정성에 미치는 영향 및 그 변화를 분석하여 보았다. 이를 위하여 수원지역의 경우 2000년도 이후 최대 월 누적강우량을 기록한 2011년 7월 강우량을 선행강우로 적용하여 침투거동과 그에 따른 지반 내 수리학적 및 역학적 거동을 범용 수치해석 프로그램인 MIDAS GTS와 GEO-SLOPE (2007)를 이용하여 분석하였다. 선행강우 적용에 따른 침투거동을 분석한 데이터를 기반으로 집중호우에 해당하는 강우가 지속적으로 내릴 때의 침투거동을 분석하고 사면안정 수치해석을 수행한 후 선행강우와 흙함수특성곡선이 사면의 안정에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

2. 불포화토 특성

2.1 흙함수특성곡선

흙함수특성곡선은 흙 내부로 물이 흡입되는 습윤과정(Wetting process)과 간극 공기압의 증가에 의해 흙 외부로 물이 배출되는 건조과정(Drying process)을 통하여 산정할 수 있으며(Fig. 1 참조), 습윤과정이 강우침투에 의한 사면 파괴과정과 유사하지만 과정이 복잡하여 시간이 많이 소요되고 실험값의 차이가 크지 않기 때문에 실험이 쉬운 건조곡선(Desorption curve)을 많이 사용하고

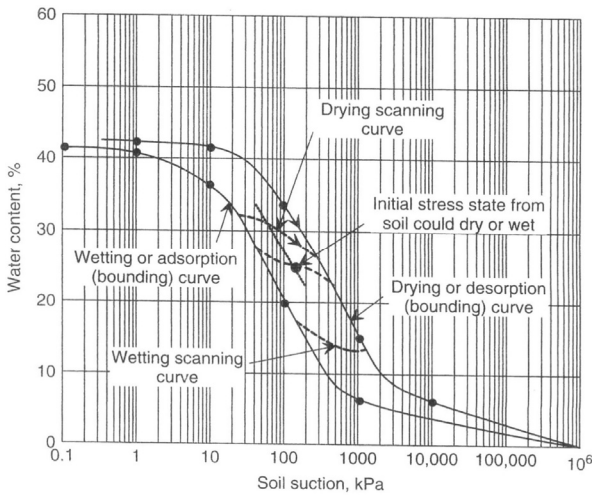


Fig. 1. Relationship of Initial Stress State to Hysteresis Loops of SWCC (Fredlund et al., 2012)

있다(Lee, 2004; Lee et al., 2009).

강우침투에 따른 사면안정해석은 강우 침투에 따른 침투해석이 선행되어야 하며 그에 따른 응력 검토가 수반되어야 한다. 불포화토에서 발생하는 침투거동은 수두의 크기가 시간에 따라 달라지는 즉 체적함수비가 시간에 따라 변하게 되는 부정류 흐름이고 이와 같은 부정류 흐름에 대한 지배 미분방정식은 다음 Eq. (1)과 같은 Richards 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = m_w^2 \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, m_w^2 은 모관흡수력 변화에 따른 물체적변화계수, k_x, k_y 는 각각 x, y 방향의 투수계수, q 는 영역 내 유량이다. 이와 같은 불포화토에 대한 침투거동 해석에서는 흡수특성곡선과 불포화 투수계수의 산정이 중요하다. 불포화토의 흡수특성곡선과 투수계수 산정식은 여러 연구자에 의해 다양한 모델이 제시되었다(Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994; Fredlund et al., 1994; Leong and Rahardjo, 1997a). van Genuchten은 세 가지 변수를 사용하여 흡수특성곡선과 투수계수 산정식을 다음 Eq. (2) 및 Eq. (3)과 같이 제안하였는데 기존의 제안식과 비교하여 뛰어난 적용성이 있는 것으로 나타났다(Leong and Rahardjo, 1997b).

$$\theta_n = \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m \quad (2)$$

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\psi)^{n-1} (1 + (a\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (a\psi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

여기서, $\theta_n (= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r})$ 은 정규화된 체적함수비이고(θ_s =포화 체적함수비, θ_r =잔류 체적함수비), a, n, m 은 흙의 특성을 나타내는 매개변수로서 a 는 흡수특성곡선의 변곡점에 해당하는 모관흡수력과, n 은 곡선의 경사와, m 은 곡선 맞춤과 관계있는 매개변수이다. $\psi (= u_a - u_w)$ 는 모관흡수력, k_s 는 포화투수계수이다. 본 연구에서도 van Genuchten식을 적용하여 흡수특성곡선 및 불포화토 투수계수를 산정하였다.

2.2 불포화토 전단강도특성

불포화토의 전단강도와 관련하여 많은 연구가 진행되었는데 (Fredlund et al., 1978; Fredlund et al., 1995; Wheeler and Sivakumar, 1995; Vanapalli et al., 1996; Vanapalli and Fredlund, 1999) Fredlund et al. (1978)은 $(\sigma - u_a)$ 와 $(u_a - u_w)$ 를 서로 독립적인 상태변수로 사용하여 새로운 전단강도식을 제안하였다. 즉 불포화토의 전단강도를 유효점착력(c' , effective cohesion), 순 수직응력($\sigma - u_a$, net normal stress) 및 모관흡수력($u_a - u_w$, matric suction)의 세 가지 상태변수로 표현하였다. 여기서 순 수직응력의 영향은 유효내부마찰각 ϕ' 으로 표현되고, 모관흡수력의 영향은 겉보기 마찰각 ϕ^b 로 표현된다. 즉 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 수정하여 다음과 같은 Eq. (4)와 같이 나타내었다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (4)$$

여기서, τ_{ff} 는 흙의 전단강도, $(\sigma - u_a)_f$ 는 파괴시 파괴면 상의 순 수직응력, $(u_a - u_w)_f$ 는 파괴시 파괴면 상의 모관흡수력이다.

사면의 활동 파괴에 대한 안정해석은 한계평형법(Limit equilibrium method)을 이용하여 구할 수 있고 다음 Eq. (5)와 같이 활동면 상 임의의 한 점에서 발휘되는 전단응력의 합에 대한 전단강도 합의 비로 나타낼 수 있다.

$$FS = \frac{\int s dA}{\int \tau dA} \quad (5)$$

여기서, τ 는 활동면 상 임의의 한 점에서 흙의 전단응력이다.

3. 실내시험 및 강우조건

3.1 기본물성시험

본 연구에서는 불포화토의 흡습수특성 변화를 분석하기 위하여 경기도 수원시 광고산 부근에서 시료를 채취하였는데 이 경우 실트질 함량은 5%이었다. 채취 시료 중 실트분을 원 시료에 혼합하여 실트질 함량이 각각 10%, 20% 되게끔 시료 조성을 한 후 기본 물성시험, SWCC (흡습수특성곡선) 시험 및 변수의 투수계수 시험을 수행하였다. 흡습수특성곡선을 도출하기 위하여 포화된 시료에 0~1000kPa의 공기압을 가하여 건조가 진행되는 과정을 거치는 압력판(pressure plate) 실험장치를 사용하였다. Table 1에 각 시료에 대한 기본 물성시험 결과를 나타내었고, Fig. 2에 입도분포곡선을 나타내었다. 통일분류법 결과 sample 1과 sample 2는 SM, sample 3는 SC로 분류되었다.

3.2 SWCC곡선 및 투수계수곡선

Table 1의 각 시료에 대하여 입력관 시험을 수행한 후 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과를 토대로 Eq. (2)로 표현되는 van Genuchten모형을 적용함으로써 SWCC곡선을 구할 수 있으며 이 경우 각 시료에 대한 매개변수 값을 산정하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 3에서 보면 세립토의 함량이 많아질수록 포화 체적함수비

(θ_s)와 잔류 체적함수비(θ_r)는 증가함을 알 수 있다. 또한 곡선의 경사는 더 완만해지는 것을 볼 수 있다. 모관흡수력 크기에 따라 변하는 불포화 투수계수 값은 van Genuchten의 Eq. (3)을 적용함으로써 구할 수 있고 이를 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 강우조건

우리나라의 경우 7월~9월에 내리는 집중호우로 인하여 사면 붕괴가 빈번히 발생하는 것을 감안하여 본 연구에서는 수원지역에

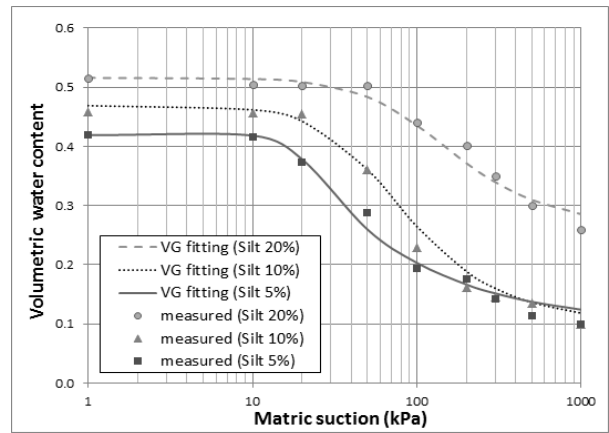


Fig. 3. SWCC Curve for the 3 Samples

Table 1. Material Properties

Classification	USCS	G_s	LL	PI	k_s (m/s)	Percent finer than #200 sieve(%)
Sample 1	SM	2.62	31.4	3.2	4.98×10^{-7}	5
Sample 2	SM	2.69	32.5	3.8	4.31×10^{-7}	10
Sample 3	SC	2.74	36.0	4.5	3.93×10^{-7}	20

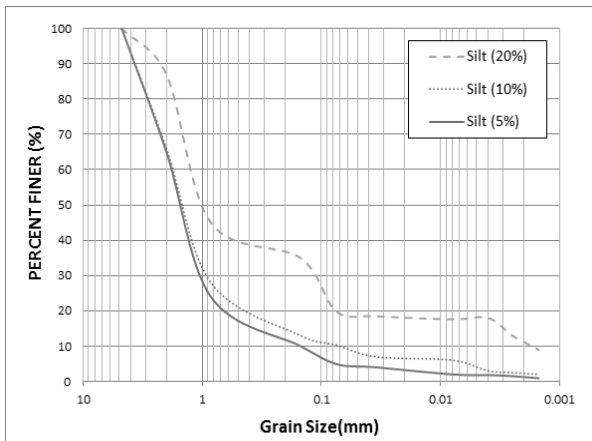


Fig. 2. Gradation Curve for the 3 Samples

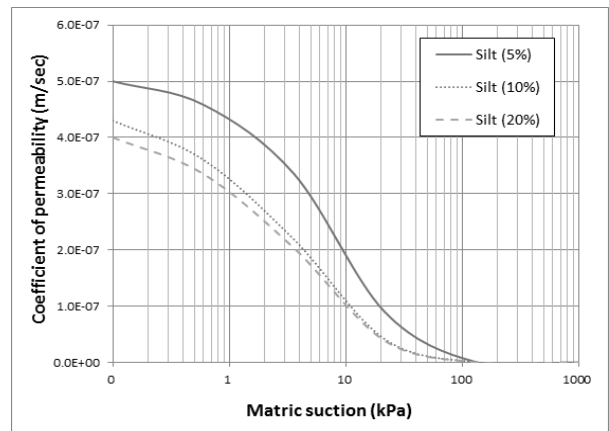


Fig. 4. Variation of Coefficient of Permeability with Matric Suction for the 3 Samples

Table 2. Parameters of SWCC by van Genuchten model

Classification	Sample 1	Sample 2	Sample 3
a (1/kPa)	0.06	0.02	0.01
n	7.1	2.003	1.83
m	0.0887	0.501	0.546448
θ_s	0.42	0.47	0.52
θ_r	0.10	0.10	0.26

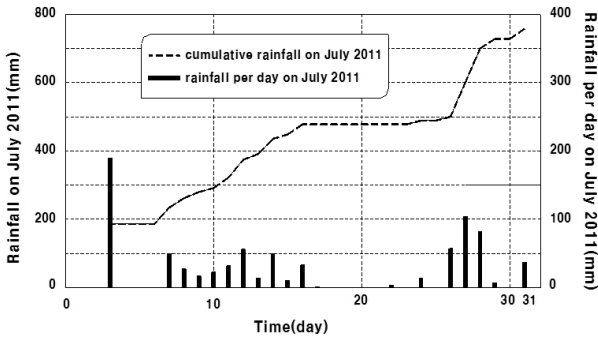


Fig. 5. Rainfall Records (2011.7.1.~2011.7.31.) in Suwon area (Web page, WAMIS)

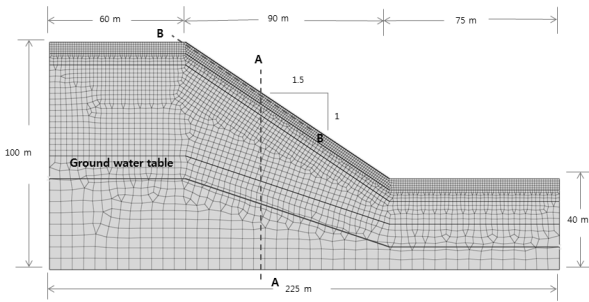


Fig. 6. Slope Configuration

서 2000년도 이후 월 누적강우량으로는 최대값을 기록한 2011년 7월 강우량 자료를 선행강우로 선정하여 해석에 적용하였는데(Fig. 5 참조), 월 강우량의 크기가 다른 지역의 경우에도 본 연구 적용과 방법론적으로 동일할 것으로 판단된다. 이와 같이 선행강우가 적용된 상태에서 집중호우에 해당하는 36 mm/hr(= 20 k_s)의 강우가 12시간 동안 내리는 것으로 가정하였을 때 지반 내 간극수압, 응력, 강도 등의 변화를 분석하고 이를 토대로 사면안정해석을 수행하였다.

4. 해석 대상사면에 대한 분석

본 연구에서 분석한 해석 대상사면은 우리나라에서 일반적으로 나타나는, 지표면으로부터 일정한 깊이까지 표토층이 분포하고 그로부터 일정한 깊이 아래 기반암층, 지표면 아래 일정한 깊이에 지하수위면이 존재하는 임의의 사면을 가정하였는데 이를 Fig. 6에 나타내었다. 사면의 경사는 1.5:1(경사각 33.7도)이고, 지표면으로부터 그 아래 10m 깊이까지 sample 1 흙이, 그 아래 지반은 기반암이 분포하는 것으로 가정하였다. 직접전단시험 및 투수시험을 통하여 sample 1의 강도정수 값 및 투수계수 값을 구하였고 기반암의 강도정수 값은 가정하였는데(GEO-SLOPE 2007) 이를 정리하면 Table 3과 같다. 지하수위면은 사면 정상측은 지표면 하 60m,

Table 3. Shear Strength Parameters and Saturated Coefficient of Permeability

Classification	$c(kPa)$	$\phi(^{\circ})$	$\gamma_t(kN/m^3)$	$k_s(m/sec)$ (saturated coefficient of permeability)
sample 1	9	30	19.62	4.98×10^{-7}
bed rock	500	36	23	4.3×10^{-9}

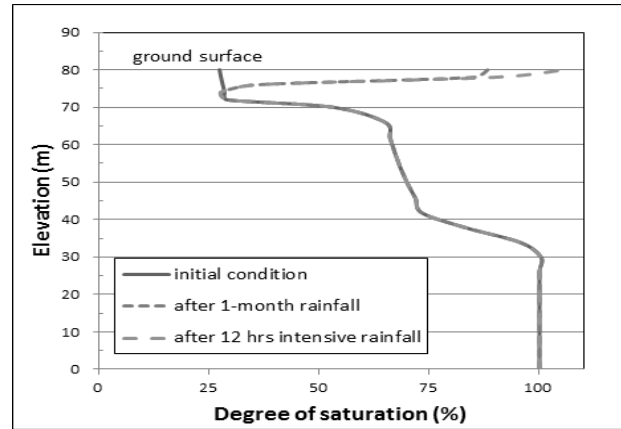


Fig. 7. The Distribution of Degree of Saturation Along the A-A Section in Fig. 6

사면 하단측은 지표면 하 30m에 위치하는 것으로 가정하였다. 사면 정상부에서 수평방향으로 30m 떨어진 위치에서 수직방향인 단면 A-A와, 본 연구의 해석 결과 표면을 따른 평면파괴 가능성이 큰 것으로 나타난, 경사가 시작되는 사면 상단부 지표면 하 깊이 2.7m인 단면 B-B를 선정하여 사면 내 포화도 변화 및 그에 따른 각종 응력 변화 분석을 시도하고 안정해석을 수행하였다. 우리나라에서 발생하는 산지 사면 파괴의 경우 일반적으로 얇은 표면파괴 형태를 많이 띠고 있고 안정해석 결과 단면 B-B에서 평면 파괴 형태로 파괴가 발생하는 것으로 나타났다(4.1절, 4.2절 참조).

4.1 선행강우 적용시 사면 내 특성변화 분석

평상시 강우에 따른 지반의 부분 포화 상태를 전혀 고려하지 않고 지하수위면만 존재한다고 가정하는 초기조건에 대하여 Fig. 5에 나타난 강우분포를 선행강우로 적용하게 되면 Fig. 6의 A-A 단면을 따른 포화도의 분포는 Fig. 7과 같이 나타내는데 지표면으로부터 약 5m 정도 깊이(즉 표토층 두께의 1/2)에서 포화도가 50%에 도달하는 정도의 속도로 습윤전선(wetting front)이 진행된 것으로 나타나고 있다. 물론 이는 비현실적일 수도 있으나 집중호우시 주로 표면파괴가 발생하는 현장 실례로부터, 강우 작용 후 지하 깊은 곳보다는 지표면 부근의 변화가 안정성 분석에서 더 중요할 것으로 판단된다. 사면 상단부에서 간극수압의 분포를 Fig. 8에

나타내었는데 사면 상단부 수평면과 경사면으로부터 서서히 일정한 깊이까지 강우침투가 진행되어 지표면으로부터 간극수압이 증가하게 되지만 지하 깊은 곳에 위치하는 지하수위면에는 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타나고 있다. Fig. 8의 간극수압 변화 결과에 따르면 상단부 부근 지표면으로부터 약 2.7m 깊이까지 간극수압이 서서히 증가하는 것으로 나타나고 있다.

전단강도의 경우 Fredlund et al. (1978)이 제안한 불포화토 강도 산정식 Eq. (4)를 이용하여 계산할 수 있는데, 불포화토에 대한 여러 연구자들(Fredlund et al., 1978; Gan et al., 1988)의 전단강도 실험 결과 모관흡수력의 넓은 범위에서 ϕ^b 값은 비선형성을 나타낸다고 지적하였는데, 일반적으로 ϕ^b 값은 ϕ' 값보다 작거나 같지만, ϕ^b 값이 ϕ' 값보다 클 수도 있다고 하였다. 또한 Morris et al. (1992)의 경우 ϕ^b 값은 유효응력 내부마찰각 ϕ' 의 1/2과 같다고 가정하였다. 본 연구의 경우 ϕ^b 값으로 $30^\circ (= \phi')$, $15^\circ (= 1/2 \phi')$ 값을 적용함으로써 발생 가능한 다양한 조건에 대하여 검토해보고자 하였다. 평면파괴 가능성이 가장 클 것으로 분석된 지표면 아래 약 2.7m 깊이인 단면 B-B를 따라 작용하는 응력 분포를

분석하였는데, ϕ^b 값으로 30° , 15° 값 각각에 대하여, Fig. 5와 같은 선행강우가 적용된 후 전단응력과 전단강도 값의 분포를 Fig. 9에 나타내었다. ϕ^b 값의 크기에 따른 전단강도 차이는 많이 나지 않는 것으로 나타났는데, 이는 불포화 상태에서는 모관흡수력의 영향으로 인하여 겉보기 마찰력의 차이가 크겠지만 지표면으로부터 강우가 침투하게 되어 간극수압이 증가하게 되면 겉보기 마찰력의 영향이 감소하기 때문일 것으로 판단된다. L'Heureux et al. (2006)은 불포화토의 전단강도에 기여하는 여러 요소 즉 점착력, 마찰강도(Frictional strength) 그리고 흡수력 강도(Suction strength) 각각의 분포를 파괴면을 따라 분석한 후 마찰강도의 감소는 주로 파괴면의 하단부에서 양의 간극수압의 증가 때문이고, 흡수력 강도의 감소는 사면 상단부에서 음의 간극수압의 소실에 따른 결과라고 지적한 바 있다. 본 연구의 경우에도 사면 상단부에서 음의 간극수압의 감소(Fig. 8의 간극수압 변화 참조)에 따라 전단강도가 감소한 것으로 판단된다. Eq. (5)를 이용하여 안전율을 계산한 결과 ϕ^b 값이 30° 일 때 3.99에서 1.44로, ϕ^b 값이 15° 값일 때 2.62에서 1.39로 계산되어 초기조건에 비하여 사면 안정성이 크게 감소한 것을 알 수 있다.

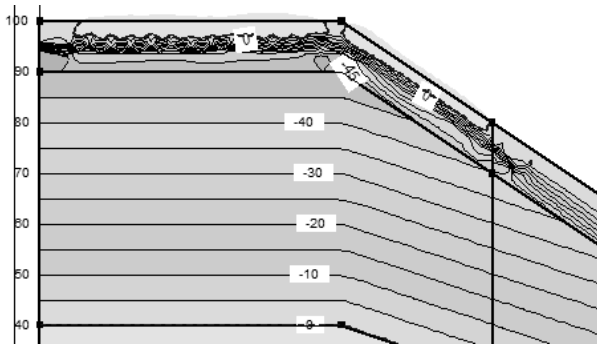


Fig. 8. The Distribution of Pore Water Pressure Around Upper Part after 1-Month Rainfall

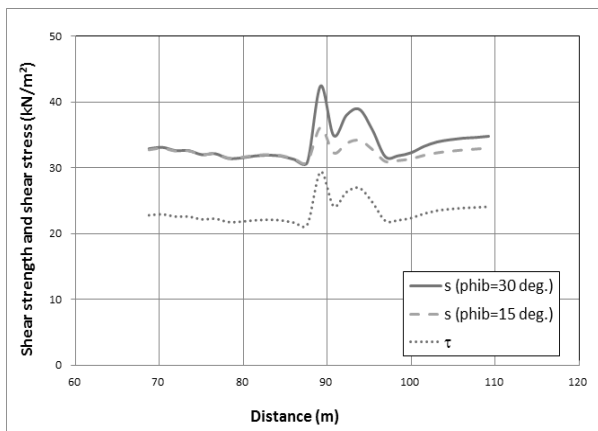


Fig. 9. The Distribution of Shear Strength and Shear Stress Along the B-B Section in Fig. 6 after 1-Month Rainfall

4.2 집중강우 적용에 따른 사면 내 특성변화 분석

7월 한 달 동안의 선행강우 적용 후 집중강우에 해당하는 $36 \text{ mm/hr} (= 20 k_s)$ 의 집중강우가 12시간 동안 내리는 것으로 가정하고 사면 내 수리적 특성, 포화도, 응력 및 강도 변화 등에 대하여 검토하였다. 12시간 동안의 집중강우 후 A-A 단면을 따른 포화도의 분포는 Fig. 7에 나타내었는데 선행강우 적용 직후 상태보다 지표면 부근에서 포화도가 약간 증가한 것으로 나타나고 있다. 사면 상단부에서 간극수압의 분포를 Fig. 10에 나타내었는데 선행강우 적용 직후보다 12시간 동안의 집중강우 후에 지표면 부근에서 간극수압이 약간 더 증가하였고 습윤전선 또한 약간 더 밑으로 진행한 것으로 나타나고 있지만 지하 깊은 곳에 위치하는 지하수위면에는 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타나고 있다. 12시간 동안의

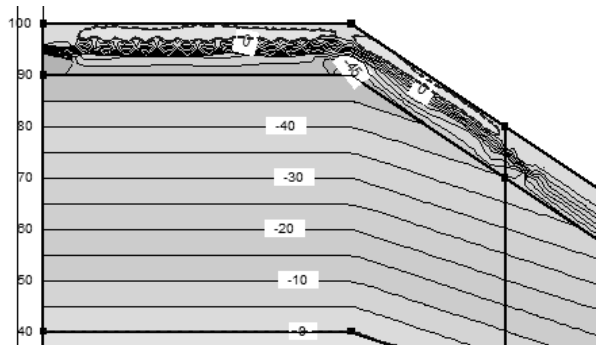


Fig. 10. The Distribution of Pore Water Pressure Around Upper Part after 12 hours Intensive Rainfall

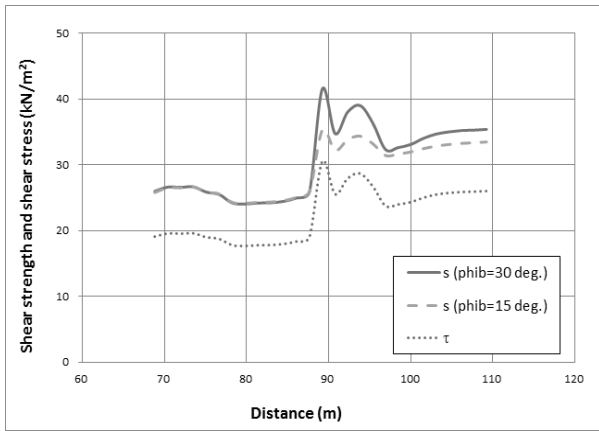


Fig. 11. The Distribution of Shear Strength and Shear Stress Along the B-B Section in Fig. 6 after 12 hours Intensive Rainfall

Table 4. Factor of Safety with the Value of ϕ^b for the Various Rainfall Conditions

	ϕ^b	cases		
		Initial condition	After 1-month rainfall	After 12 hrs intensive rainfall
FS	30	3.99	1.44	1.35
	15	2.62	1.39	1.29

집중강우에도 불구하고 지표면 부근의 변화가 크지 않은 것은 지반의 투수계수 값 크기보다 훨씬 큰 강우량이 작용할 때 많은 양의 강우량이 지층 속으로 침투하지 못하고 지표면을 따라 유출되기 때문일 것으로 판단된다.

12시간 동안의 집중강우(36 mm/hr) 후 Fig. 6의 B-B 단면상에 작용하는 전단응력과 전단강도 값의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 12시간 동안의 집중강우로 인하여 B-B 단면에서 전단강도는 선행강우 적용 직후 상태(Fig. 9 참조)와 비교하여 경사면 상부에서 약간 더 감소하였고, 전단응력 또한 경사면 상부에서 약간 더 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 전단응력 및 전단강도 분포를 근거로 Eq. (5)를 이용하여 안전율을 계산하면 선행강우 적용 직후 조건일 때 1.44로부터 1.35로 사면 안정성이 약간 더 감소하는 것으로 나타났으나 강우강도의 크기에 비하면 크게 감소한 것으로 보이지는 않는다. 이것은 Zhang et al. (2004)이 강우 침투량의 감소가 사면안정에 효과적이고 따라서 표토층에 대한 덮개나 표토층 다짐이 사면안정에 효과적이라고 지적한 바와 같이, 본 연구의 분석에서도 사면안정은 강우크기에 어느 정도 상관은 있겠지만 그보다는 강우 중 사면 내로 침투하는 침투량의 크기에 좌우되기 때문인 것으로 판단된다. 사면 내 특성 변화에 따른 사면 안정성 해석 결과를 정리해 보면 Table 4와 같고 이를 다시 Fig. 13에 나타내었

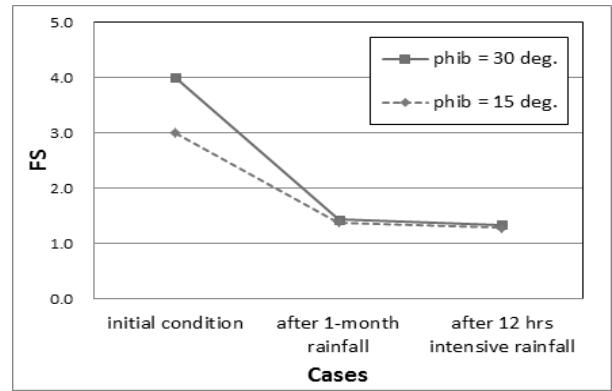


Fig. 12. Variation of Factor of Safety with the Value of ϕ^b for the Various Rainfall Conditions

다. 여기서 볼 수 있듯이 집중강우에 비하여 선행강우가 사면의 안정에 훨씬 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉 집중강우 적용 이전에 이미 선행강우 적용에 따라 사면안정성이 많이 훼손된 것으로 나타나고 있다.

4.3 겉보기 마찰각에 따른 분석

불포화토의 강도는 모관흡수력의 영향을 받게 되는데 이를 고려하는 여러 관련식 및 이론적 개념들이 제안된 바 있다(Fredlund et al., 1978; Fredlund et al., 1995; Vanapalli et al., 1996; Vanapalli and Fredlund, 1999). 본 연구의 경우 모관흡수력의 영향을 받는 불포화토의 강도 변화를 고려하기 위하여 제안된 여러 관련 식 중 Fredlund et al. (1978)이 제안한 전단강도 산정식 Eq. (4)를 적용하였다. Eq. (4)에서 모관흡수력의 영향을 나타내는 겉보기 마찰각 ϕ^b 값이 제안되었는데 내부마찰각($=\phi$)의 경우 직접전단시험으로부터 구한 30° 를 적용하여 응력 분석과 안정 검토를 수행하였다. 그러나 ϕ^b 값의 크기에 따라 전단강도 값은 달라질 수 있고 그에 따라 사면 안정성 해석 결과도 달라진다. ϕ^b 값 변화에 따른 강도 변화와 사면안정성을 분석하기 위하여 ϕ^b 값으로 30° , $15^\circ (=1/2 \phi')$ 값을 적용하여 분석하였는데 안전율 계산 결과를 정리하여 Table 4와 Fig. 13에 나타내었다. ϕ^b 값의 크기를 작게 평가할수록 전단강도 크기는 작게 산정됨으로써 강우 조건별로 사면 안정성은 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 경우에도 선행강우를 고려하게 되는 경우가 후속 집중강우가 작용하게 되는 경우에 비하여 안전율의 감소율이 크게 나타나는 바 사면 파괴시 집중강우보다는 선행강우가 사면안정에 미치는 영향이 훨씬 클 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 불포화토의 강도 및 응력의 경우 모관흡수력의 영향을 많이 받아 그 평가가 쉽지 않으며, 평가를 위한 여러 가지 이론이 제시되어 있는 전단강도에 대하여 다양한 불포화 강도실험이 필요할 것으로 판단된다.

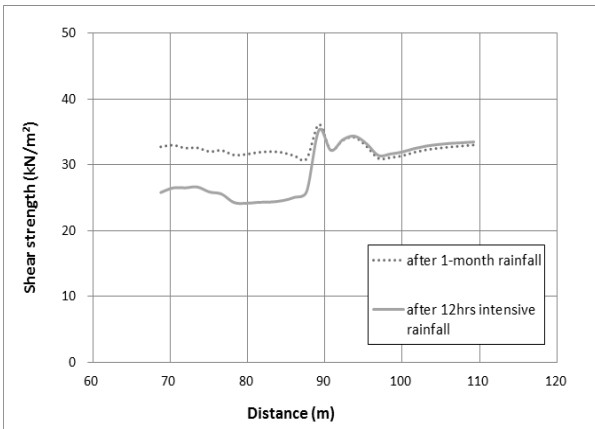


Fig. 13. The Change of Shear Strength for the Various Rainfall Conditions ($\phi^b=15\circ$)

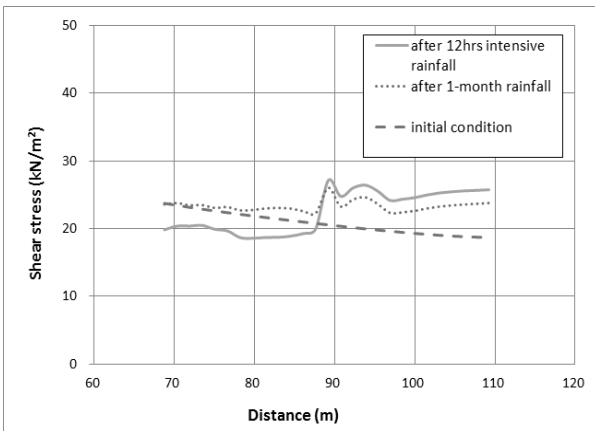


Fig. 14. The Change of Shear Stress for the Various Rainfall Conditions ($\phi^b=15\circ$)

겉보기 마찰각 ϕ^b 를 15° 로 가정한 경우에 여러 가지 강우조건에 따라 B-B 단면을 따라 작용하는 전단강도 및 전단응력의 변화를 Figs. 13 and 14에 나타내었다. 전단강도의 경우 선행강우 적용 직후에 비하여 12시간 집중강우시에 사면 상단부에서 약간 감소하는 것으로 나타나고 있다. 전단응력의 경우 초기상태에 비하여 선행강우 적용 직후 전단면에서 약간 증가한 것을 볼 수 있으며, 그 후 12시간 집중강우에는 단면 전체에 걸쳐 다시 약간 감소하는 것으로 나타나고 있다.

4.4 검토 및 토의

불포화토의 사면 거동은 여러 가지 변수에 크게 영향을 받는다. Tsaparas et al. (2002)은 투수계수 값이 $1.0 \times 10^{-4} m/sec$ 로 투수성이 아주 큰 흙에서는 작은 양의 선행강우에 거의 영향을 받지 않고, 투수계수 값이 $1.0 \times 10^{-5} m/sec$ 로 투수성이 중간 정도의 흙에서는 주 강우 동안 침투과정이 선행강우에 영향 받을

수 있다고 하였다. 또한 투수계수 값이 $1.0 \times 10^{-6} m/sec \sim 1.0 \times 10^{-7} m/sec$ 로 투수성이 아주 작은 흙에서는 강우 동안 간극수압이 크게 변하지 않는다고 하였다. 본 연구의 경우 사면 지표면에서 10m 깊이까지 지층을 구성하는 sample 1의 경우 포화 투수계수는 $4.98 \times 10^{-7} m/sec$ 로서 투수성이 아주 작은 흙으로 분류할 수 있지만 선행강우 적용시 및 집중강우 작용시에 지표면 가까이에서 간극수압의 변화가 나타나고 있다(Fig. 8 참조). Cai and Ugai (2004)는 지반의 수리적 특성이 불포화-포화 사면의 일시적 흐름과 사면안정에 미치는 영향에 대하여 연구하였는데 투수성이 크면 강우강도가 클 때 더 쉽게 파괴되고, 투수성이 작으면 강우기간이 길 때 더 쉽게 파괴된다고 하였다. 그러나 본 연구의 결과를 보면 사면의 안정성은 강우강도의 크기에 일반적으로 의존하기보다는 강우강도와 지반을 구성하는 지반의 투수계수 값의 상대적인 크기에 따라 달라지는 것으로 판단된다. 이때 지반의 불포화 투수계수 값은 지반 내 모관흡수력의 크기에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에 선행강우 적용 전 지반 내 모관흡수력의 분포, 즉 평상시 지반 조건의 파악이 상당히 중요할 것으로 판단된다. Zhan and Ng (2004)은 불포화토에 대한 강우 침투 메카니즘 분석에서 간극수압 분포에 미치는 영향은 선행강우강도의 크기가 후속 강우강도보다 훨씬 큰 것으로 분석하였다. 본 연구의 경우 강우 적용에 따른 압력수두의 분포가 Fig. 8, Fig. 10에 나타나 있는데 선행강우 작용시 후속 집중강우 작용시에 비하여 간극수압에 미치는 영향이 훨씬 큰 것으로 나타나고 있어 선행강우의 영향이 사면안정에 미치는 영향은 클 것으로 예상된다. 다만 본 연구의 경우 선행강우 적용 전 지반 초기 불포화 상태에 대한 실제적인 모사가 부족함으로써 선행강우에 미치게 될 영향에 대한 분석이 미흡한데 추후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 불포화토 사면의 안정성에 영향을 미치는 제반 요소에 대하여 검토하였다. 세립분의 함량에 따른 불포화토의 흡수수특성을 분석하기 위하여 세립분의 함량을 다르게 조성한 시료에 대하여 SWCC 곡선 시험을 실시하여 각 경우에 대한 매개변수를 분석하였는데 그 결과 van Genuchten의 제안식은 실험결과를 비교적 잘 규정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한 강우조건에 따른 사면안정성 분석을 위하여 여러 가지 강우조건에 대하여 사면안정성 분석을 실시하였는데, 특히 선행강우의 적용에 따른 불포화토의 거동에 대하여 분석하였다. 불포화 상태를 고려하지 않는 초기조건에 비하여 선행강우가 적용된 자연 지반 상태 즉 사면 내 함수비의 분포가 일정하지 않은 불포화 상태에서 집중강우가 작용하게 되면 불포화토는 건조 상태 흡과는

전혀 다른 거동을 보이게 된다. 따라서 불포화 상태를 전혀 고려하지 않는 초기조건 지반상태 보다는 선행강우 적용 후 불포화 상태에서 집중강우의 적용에 따른 사면 안정해석이 더 합리적인 것으로 판단된다. 이 경우 선행강우 적용에 따른 사면 내 간극수압의 변화가 후속 집중강우의 적용에 따른 변화에 비하여 사면 내 간극수압에 미치는 영향이 큰 것으로 나타나고 있어 사면안정해석에서 선행강우에 대한 고려는 간과할 수 없는 중대한 변수일 것으로 판단된다. 또한 사면의 안정성은 강우강도의 크기에 일반적으로 의존하기보다는 강우강도와 지반을 구성하는 지반의 투수계수 값의 상대적인 크기에 따라 달라지는 것으로 판단된다.

모관흡수력의 영향을 받는 겉보기 마찰각(ϕ^b)의 적용에 따른 불포화도 강도 변화와 그에 따른 사면 안전율의 변화에 대하여 분석하였는데 그 결과 겉보기 마찰각은 강도 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 추후 불포화도에 대한 강도 실험 및 해석을 통한 추가적인 연구, 검토가 요망된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2012R1A1A2044593).

References

- Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964). "Hydraulic properties of porous medium." *Hydrology Paper*, No. 3, p. 27.
- Cho, S. E. and Lee, S. R. (2000). "Slope stability analysis of unsaturated soil slopes due to rainfall infiltration." *Jr. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 16, No. 1, pp. 51-64 (in Korean).
- Cho, S. E. and Lee, S. R. (2001). "Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration." *Computers and Geotechnics*, Vol. 28, pp. 185-208.
- Fei, C. and Keizo, U. (2004). "Numerical analysis of rainfall effects on slope stability." *International Journal of Geomechanics*, Vol. 4, No. 2, pp. 69-78.
- Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 521-532.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). "Shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.
- Fredlund, D. G., Vanapalli, S. K., Xing, A. and Pufahl, D. E. (1995). "Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Unsaturated Soils*, Alonso and Delage (eds), Balkema, pp. 63-69.
- Fredlund, D. G., Xing, A. and Shangyan, H. (1994). "Predicting the permeability for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 533-546.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons.
- Gan, J., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988). "Determination of the shear strength parameters of a saturated soil using the direct shear test." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 3, pp. 277-283.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2007). "Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis." *User's guide*.
- GTS NX Online Manual (2014). MIDAS Information Technology Co. Ltd., Available at: <http://manual.midasuser.com/KR/GTS%20NX/150/GTX.htm> (Accessed: January 10, 2015).
- Jeong, S. S., Choi, J. Y. and Lee, J. H. (2009). "Stability analysis of unsaturated weathered soil slopes considering rainfall duration." *Jr. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-9 (in Korean).
- Kim, J. H., Jeong, S. S., Kim, Y. M. and Lee, K. W. (2013). "Proposal of design method for landslides considering antecedent rainfall and in-situ matric suction." *Jr. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 12, pp. 11-24 (in Korean).
- Kim, J., Jeong, S. and Regueiro, R. A. (2012). "Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern." *Engineering Geology*, October, Vol. 147-148, pp. 28-36.
- Kim, Y. M., Lee, K. W. and Kim, J. H. (2013). "Influence of soil characteristic and rainfall intensity on matric suction of unsaturated weathered soil slope." *Jr. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 1017-1025 (in Korean).
- L'Heureux, J. S., Høeg, K. and Hoydal, Ø. A. (2006). "Numerical analyses and field case study of slope subjected to rainfall." *Unsaturated Soils*, GSP No. 147, ASCE, pp. 2279-2290.
- Lee, S. J. (2004). *Estimation of Unsaturated Shear Strength and Soil Water Characteristic Curve for Weathered Granite Soil*, Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- Lee, S. R., Oh, T. K., Kim, Y. K. and Kim, H. C. (2009). "Influence of rainfall intensity and saturated permeability on slope stability during rainfall infiltration." *Jr. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 1, pp. 65-76 (in Korean).
- Leong, E. C. and Rahardjo, H. (1997a). "Review of soil-water characteristic curve equations." *Jr. of Geot. and Geoenv. Eng.*, Vol. 123, No. 12, ASCE, pp. 1106-1117.
- Leong, E. C. and Rahardjo, H. (1997b). "Permeability functions for unsaturated soils." *Jr. of Geot. and Geoenv. Eng.*, Vol. 123, No. 12, ASCE, pp. 1118-1126.
- Morris, P. H., Graham, J. and Williams, D. J. (1992). "Cracking in drying soils." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, pp. 263-277.
- Rahardjo, H., Li, X. W., Toll, D. G. and Leong, E. C. (2001). "The effect of antecedent rainfall on slope stability." *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 19, No. 3/4, pp. 371-399.
- Tsaras, I., Rahardjo, H., Toll, D. G. and Leong, E. C. (2002).

- “Controlling parameters for rainfall-induced landslides.” *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, pp. 1-27.
- van Genuchten, M. T. (1980). “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.
- Vanapalli, S. K. and Fredlund, D. G. (1999). “Empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils.” *Proc. of the 11th Asian Regional Conf. on SMFE*, Seoul, Korea, pp. 93-96.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996). “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction.” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 379-392.
- Wheeler, S. J. and Sivakumar, V. (1995). “An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil.” *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 35-53.
- Won, T. O. and Sai, K. V. (2010). “Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes.” *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 649-657.
- Zhan, T. L. T. and Ng, W. W. (2004). “Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils.” *Int. Jr. of Geomechanics*, Vol. 4, No. 4, pp. 273-284.
- 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, pp. 569-582.