

# 정상침투조건에서 흡입응력을 고려한 불포화 무한사면의 안정해석

## Stability Analysis of the Unsaturated Infinite Slope Considering Suction Stress under Steady Infiltration Condition

송 영 석<sup>1</sup> Song, Young-Suk

### Abstract

In this paper, the unsaturated slope stability analysis considering suction stress (Lu and Godt, 2008) was introduced and the results applied for a certain sand slope were analyzed. The unsaturated slope stability analysis considering suction stress can analyze both conditions of steady infiltration and no infiltration, and it can estimate the safety factor of slope as a function of soil depth. Also, the influence of weathering phenomenon at a certain depth from the ground surface can be considered. The stability analysis considering suction stress was applied to the unsaturated infinite slope composed of sand with the relative density of 60%. The suction stress under no infiltration condition was affected by ground water table until a certain influencing depth. However, the suction stress under steady infiltration condition was affected by seepage throughout the soils. Especially, the maximum suction stress was displayed around ground surface. The factor of safety in the infinite slope under no infiltration condition rapidly increased and decreased within the influence zone of ground water table. As a result of slope stability analysis, the factor of safety is less than 1 at the depth of 2.4 m below the ground surface. It means that the probability of slope failure is too high within the range of depths. The factor of safety under steady infiltration condition is greater than that under no infiltration condition due to the change of suction stress induced by seepage. As the steady infiltration rate of precipitation was getting closer to the saturated hydraulic conductivity, the factor of safety decreased. In case of the steady infiltration rate of precipitation with  $-1.8 \times 10^{-3}$  cm/s, the factor of safety is less than 1 at the depths between 0.2 m and 3 m below the ground surface. It means that the probability of slope failure is too high within the range of depths, and type of slope failure is likely to be shallow landslides.

### 요 지

본 연구에서는 흡입응력을 고려한 불포화 사면의 안정해석기법(Lu and Godt, 2008)을 제시하고, 모래로 구성된 특정 사면에 대하여 적용한 결과를 분석하였다. 흡입응력을 고려한 불포화 사면의 안정해석기법은 강우의 침투 및 비침투에 따른 해석이 가능하고, 토층내 깊이에 따른 사면안전율을 산정할 수 있다. 또한 지표면으로부터 일정깊이까지의 풍화작용에 의한 영향을 고려할 수 있다. 이를 위하여 상대밀도 60%의 주문진 표준사로 구성된 불포화 무한사면에 대하여 흡입응력을 고려한 안정해석기법을 적용하였다. 강우의 비침투 조건에서 흡입응력은 지하수위로부터 상부의 일정깊이 까지만 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 강우의 정상침투 조건에서 흡입응력은 토층내 전체적으로 영향을 미치며, 지표면 부근에서 흡입응력이 가장 크게 발현됨을 알 수 있다. 강우의 비침투 조건에서 무한사면의 안전율은 지하수위에 의한 흡입응력의 영향범위 내에서 급격하게 증가 및 감소하였다. 사면안정해석결과 지표면으로부터 2.4m사이에서 사면안전율이 1이하 이므로 해당깊이에서 사면파괴가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 강우의 정상침투가 발생되

<sup>1</sup> 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3035, Fax: +82-42-868-3414, yssong@kigam.re.kr)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 조건에서 무한사면의 안전율은 침투로 인한 토층내 흡입응력의 영향으로 비침투 조건에 비해 증가함을 알 수 있다. 그러나 강우의 정상침투율이 포화투수계수에 가까워짐에 따라 사면안전율은 감소하는 경향이 나타났다. 강우의 정상 침투율이  $-1.8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 인 경우 무한사면의 안정해석결과 지표면으로부터 0.2m에서 3m 사이에서 사면안전율이 1 이하이므로 해당깊이에서 사면파괴가 발생할 가능성이 높으며, 이는 얇은 산사태의 발생형태임을 알 수 있다.

**Keywords :** Infinite slope stability analysis, Suction stress, Steady infiltration condition, Factor of safety, Unsaturated soil

## 1. 서론

대부분의 산사태는 우기에 집중적으로 발생되므로 산사태의 발생요인 중 가장 큰 요인은 강우임을 예측할 수 있다. 즉, 연평균 강우량의 대부분이 6월에서 9월 사이에 편중되어 있어 이 기간에 집중호우로 인한 산사태의 발생이 빈번하게 발생되고 있으며, 이로 인한 피해도 매년 급증하고 있는 실정이다(Park et al., 2008).

우리나라에서 발생하는 산사태의 발생유형을 살펴보면 대부분 발생 깊이가 2m 이내로서 얇은 평면파괴 형태이다(Kim et al., 2007). 일반적으로 강우에 의한 산사태는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 간극수압이 증가하여 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 자연사면의 경우 지하수위의 상승에 의한 영향보다는 강우의 침투로 발생하는 침윤전선의 하강에 의한 영향으로 얇은파괴가 주로 발생되고 있다(Kim et al., 2004; Lu and Godt, 2008; Song et al., 2012b). 강우의 침투로 인하여 지하수위 상부의 위치하는 불포화 지반의 포화도가 증가하게 되며, 음의 간극수압은 감소하게 된다. 이로 인하여 불포화 지반내 흡입응력(suction stress)의 변화로 인한 유효응력의 감소가 발생되며, 이는 불포화 사면의 안정성에 영향을 미치게 된다(Ng and Shi, 1998; Lu and Godt, 2008).

지난 20여년 동안 토질역학적인 문제를 해결을 위하여 지반에 대한 포화도의 가정은 많은 결함을 나타냈으며, 이에 대한 주의가 요구되어 왔다. 기존에 수행된 많은 사면안정해석에서 지하수위 상부의 부 간극수압을 산정하려는 노력이 있었다. 그러나 최근까지 대부분의 사면안정해석은 Terzaghi에 의한 포화도의 침투이론을 기초로 하고 있다. 그러나 우리나라의 일반적인 자연사면의 경우 배수가 용이하므로 강우침투로 인한 얇은 깊이의 무한사면파괴가 주로 발생하고 있다. 따라서 강우시 지하수위 상부에 위치하고 있는 토층내에서 함수비

변화로 인하여 사면파괴가 발생되므로 지하수위 상부에 위치한 토층의 깊이별 유효응력을 반드시 고려하여야 한다(Wolle and Hachich, 1989; de Campos et al., 1991; Godt et al., 2006).

불포화토의 특성을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소 중의 하나가 흙-함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)을 산정하는 것이다. 흙-함수특성곡선은 모관흡수력과 포화도 혹은 체적함수비 사이의 관계로 정의할 수 있다. 이는 불포화토 고유의 물성을 나타내며, 비선형적인 관계를 갖는다. 그리고 모관흡수력과 포화도의 상관관계를 토대로 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 흡입응력(suction stress)을 산정할 수 있다(Lu and Likos, 2004; Song et al., 2012c). 흡입응력은 불포화 지반에서 흙이 물을 보유할 때 발생하는 구조적 및 물리화학적 응력을 모두 고려한 개념이다(Karube and Kato, 1994; Gallipoli et al., 2003; Lu and Likos, 2004). 따라서 정확한 흙-함수특성곡선(SWCC)에 대한 측정 및 예측 없이 불포화토의 특성을 파악하는 것은 불가능하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Lu and Godt(2008)에 의해 제한된 불포화 무한사면의 안정해석법을 활용하여 주문진 표준사로 구성된 불포화 무한사면에 대한 안정해석을 수행하였다. 먼저, 상대밀도 60%의 주문진 표준사를 대상으로 건조 및 습윤과정의 모관흡수력과 체적함수비를 측정하여 흙-함수특성곡선(SWCC)을 산정한다. 그리고 흙-함수특성곡선(SWCC)을 토대로 흡입응력을 계산하고, 흡입응력과 유효포화도의 상관관계를 나타내는 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curves, SSCC)을 산정한다. 대상 주문진 표준사에 대한 불포화 고유 특성곡선을 바탕으로 풍화작용 및 지하수위, 그리고 깊이에 따른 내부마찰각의 변화량을 가정하여 불포화 사면의 안정해석을 실시한다. 그리고 강우 침투 및 비침투 조건에서 깊이에 따른 불포화 사면의 안전율을

산정하고자 한다.

## 2. 시험방법 및 재료

### 2.1 대상시료

본 연구에서는 사용된 시료는 국내 대표적인 사질토

Table 1. Physical properties of standard sand

description	symbol	value
specific gravity	$G_s$	2.621
max. void ratio	$e_{max}$	0.919
min. void ratio	$e_{min}$	0.625
max. dry density	$\gamma_{dmax}$	(kN/m <sup>3</sup> ) 15.824
min. dry density	$\gamma_{dmin}$	
effective particle size	$D_{10}$	(mm) 0.421
particle size of $D_{30}$	$D_{30}$	
particle size of $D_{60}$	$D_{60}$	
uniformity coefficient	$C_u$	1.499
coefficient of curvature	$C_c$	0.987

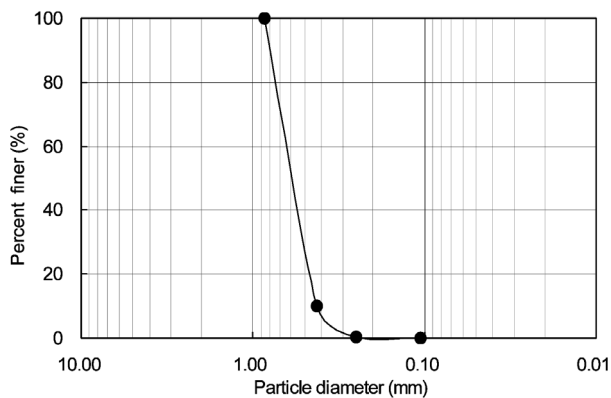


Fig. 1. Grain size distribution curve of standard sand

인 주문진 표준사를 이용하였다. 먼저 ASTM D 4253-83 및 ASTM D 4254-83 시험기준에 의거하여 시료에 대한 최대 및 최소건조단위중량을 측정하고 상대밀도 60%의 조건으로 시료를 성형하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 사질토(주문진 표준사)의 기본적인 물리적 특성을 측정된 결과이며, Fig. 1은 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

### 2.2 시험장치 및 시료성형

본 연구에서는 대상 시료인 주문진 표준사의 흡-함수 특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수 특성곡선 시험장치를 활용하였다(Wayllace and Lu, 2012; Song et al., 2012c). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 흡-함수 특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 2는 자동 흡-함수 특성곡선 시험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하여 압력을 0-300kPa 범위까지 적용할 수 있다. 본 시험장치에 대한 자세한 내용은 기 발표된 논문을 참조하기 바란다(Song et al., 2010).

본 시험에서는 먼저 시료를 포화시킨 후 공기압을 가하여 간극수를 배출하는 건조과정을 실시하게 된다. 먼저 플라스틱 몰드(직경 5.05cm, 높이 3.89cm)와 플라스틱 봉을 이용하여 3층 다짐을 실시하여 상대밀도 60%의 시료를 성형하였다. 그리고 시료 상하부에 다공석을 두어 포화시 시료내부에 물이 원활하게 흐를 수 있도록 하였다. 시료를 포화시키기 위하여 데시케이터와 진공

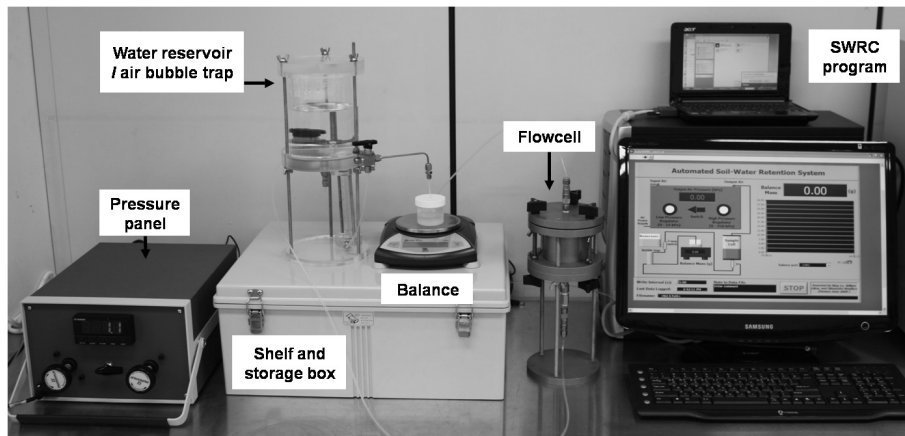


Fig. 2. Automated SWCC apparatus (Song et al., 2012c)

펌프를 활용하였다. 즉 데시케이터 내에 정제된 증류수를 채우고, 성형된 시료를 약 2/3 정도 물에 잠기도록 한 다음 진공펌프를 이용하여 데시케이터 내부를 진공상태로 만든다. 이때 시료는 높은 배압을 받게 되며, 물이 시료의 하부로부터 포화되면서 상부로 흘러가기 때문에 간극내 남아 있는 공기를 제거하면서 포화가 진행된다. 모래의 경우 약 1시간 이상을 두면 시료가 포화된다 (Song et al., 2010).

### 2.3 측정결과

Fig. 3은 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 대상 시료인 주문진 표준사의 모관흡수력 재하 및 제하시 시간에 따른 간극수의 측정량을 나타낸 것이다. 즉, 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과, 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 간극수의 유출량은 증가하고, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 간극수의 유입량이 증가하는 것으로 나타났다. 단계별 모관흡수력을 조절하기 위하여 일정단계 모관흡수력 수준에서 간극수 유출 및 유입량이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 재하 혹은 제하였다. 한편, 습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다. 이러한 원인은 습윤과정을 거치는 동안 흡입자 사이의 간극이 밀폐되어 간극 내 공기가 갇히게 되며, 갇힌 공기의 영향으로 인하여 건조 및 습윤과정에서의 시험시간이 다르게 발생되는 것이다.

Fig. 4는 위의 측정결과를 이용하여 체적함수비와 모

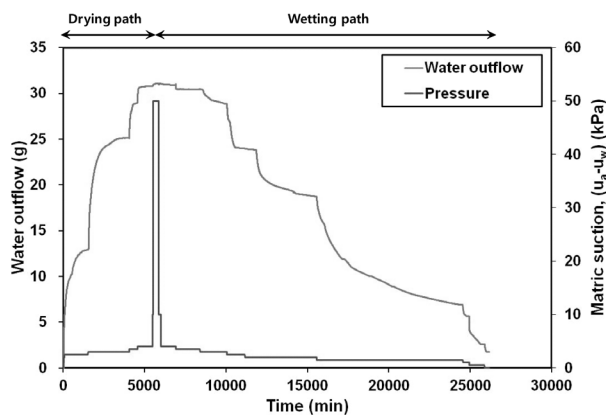


Fig. 3. Mass of outflow for various suction stages

관흡수력의 상관관계를 도식한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대상 시료내 체적함수비 혹은 유효포화도가 감소함에 따라 모관흡수력은 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 공기함입치 이후에는 작은 모관흡수력에 의해서도 체적함수비가 크게 변화하며, 동일한 체적함수비에서 건조과정의 모관흡수력은 습윤과정의 모관흡수력보다 크게 나타났다.

## 3. 불포화토의 특성곡선 산정

### 3.1 흡-함수특성곡선 산정

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. van Genuchten(1980)은 Mualem(1976)의 제안식을 토대로 유효포화도( $S_e$ )와 모관흡수력( $u_a - u_w$ )의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 식 (1)은 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right]^m \quad (1)$$

여기서,  $\theta_s$ 는 포화함수비이며,  $\theta_r$ 은 잔류함수비를 의미한다.

Table 2는 건조 및 습윤과정에 대한 불포화 계수를 산정한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수  $\alpha$ 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점

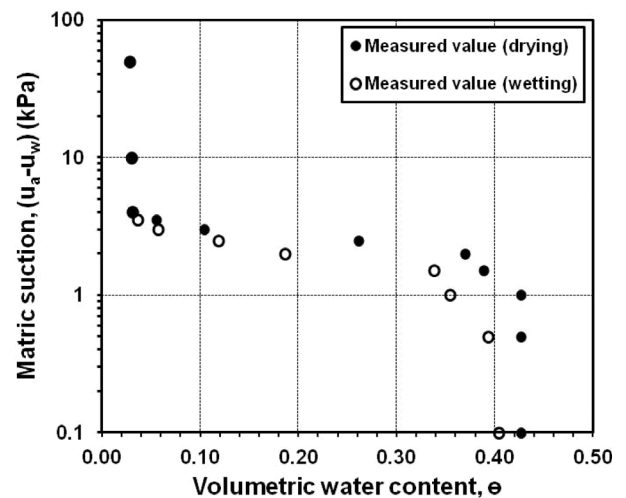


Fig. 4. Relationship between matric suction and volumetric water content

Table 2. The values of fitting parameters

condition	$a$ (kPa <sup>-1</sup> )	$n$	$m$	$\theta_s$	$\theta_r$	AEV (kPa)
drying	0.399	8.586	0.884	0.43	0.03	2.01
wetting	0.548	5.625	0.822	0.40	0.03	

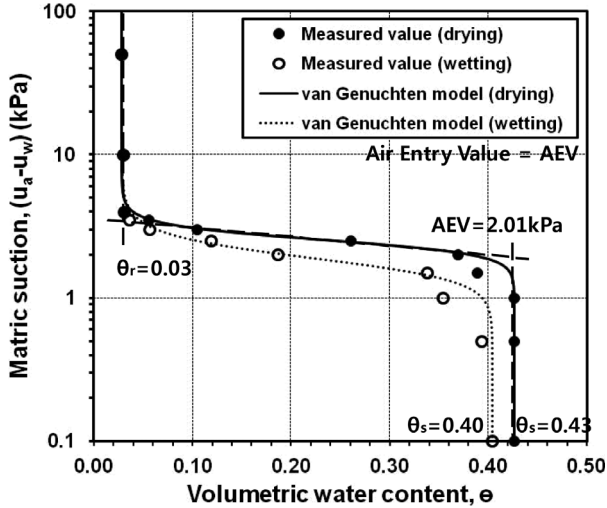


Fig. 5. SWCCs of standard sand

의 경사에 관련된 계수  $n$ 과 잔류함수비에 관계된 계수  $m$ 은 건조과정에서 더 큰 값을 가진다. 그리고 Lu 등 (2010)에 의해 제시된 흡의 종류에 따른 불포화도 관련 계수의 범위와 일치하는 것으로 나타났다. 표에 나타난 불포화 계수를 이용하여 대상 시료에 대한 흡-함수특성 곡선(SWCC)을 도출할 수 있다.

Fig. 5는 대상 시료인 주문진 표준사에 대한 건조과정과 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)은 S자 모양의 비선형적인 관계를 나타내고, 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력보다 상대적으로 큰 값이 나타났으며 곡선의 기울기도 차이를 보이고 있다. 그리고 건조과정과 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)이 일치하지 않는 이력현상(hysteresis)이 발생되었다.

이와 같은 이력현상의 원인으로는 잉크병 효과(Ink-bottle effect), 모세관 응축(Capillary condensation), 갇힌 공기(Entrapped air), 팽창 및 수축(Swelling and Shrinkage), 접촉각 이력현상(Contact angle hysteresis)을 들 수 있다. 이 가운데 이력현상의 주요원인으로는 잉크병 효과와 접촉각 이력현상을 들 수 있다(Lu and Likos, 2004, Song and Choi, 2012; Song et al., 2012a).

### 3.2 흡입응력특성곡선 산정

Lu and Likos(2006)는 Terzaghi(1943) 및 Bishop(1959)의 유효응력 공식을 확장하여 식 (2)와 같이 불포화토의 응력상태를 표현할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 식은 불포화토 내부에서 일어나는 다양한 현상을 고려하여 불포화토의 유효응력을 산정하였으므로 비교적 정확한 흡입응력을 구할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그리고 흡입응력은 모관흡수력 또는 포화도와 밀접한 관계를 가지기 때문에 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 지표로 사용될 수 있다. van Genuchten(1980)에 의해 제안된 식 (1)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같이 흡입응력 산정식을 구할 수 있다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w)S_e \quad (2)$$

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (3a)$$

$$\sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w > 0 \quad (3b)$$

여기서,  $S_e$ 는 유효포화도를 나타낸다.

한편, 흡입응력은 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(SSCC)이라고 한다(Lu and Likos, 2006; Lu et al., 2010). 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있다. 그리고 불포화토의 응력상태를 평가하는 중요한 지표로 사용할 수 있으며, 함수량에 따른 지반의 강도를 예측 및 평가할 수 있다.

Fig. 6은 유효포화도와 흡입응력의 상관관계로부터 흡입응력특성곡선(SSCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유효포화도가 증가함에 따라 흡입응력은 증가하다가 완전하게 포화되기 직전에 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 즉 대상 시료의 경우 포화되면서 흙내부에 작용하는 흡입응력의 크기는 증가하다가 완전하게 포화되기 직전에 흡입응력을 모두 잃어버리게 된다. 그리고 불포화상태에서의 동일한 유효포화도

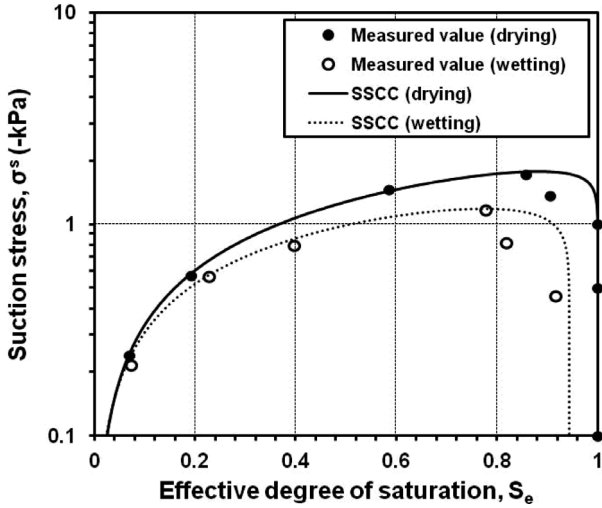


Fig. 6. SSCCs of standard sand

에서는 건조과정의 흡입응력이 더 크게 발생된다.

#### 4. 흡입응력을 고려한 불포화 사면의 안정해석법

##### 4.1 불포화 무한사면의 안정해석법

우리나라에서 발생하는 자연사면에서의 산사태 발생 유형을 살펴보면 얇은 깊이에서 무한사면 파괴형태의 산사태임을 알 수 있다. 일반적으로 강우에 의한 산사태는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 간극수압이 증가하여 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 자연사면의 경우 지하수위의 상승에 의한 영향보다는 강우의 침투로 발생하는 침윤전선의 하강에 의한 영향으로 얇은 깊이의 무한사면 파괴가 주로 발생되고 있다(Lu and Godt, 2008; Song et al., 2012b).

최근 Lu and Godt(2008)는 이와 같은 강우로 인한 얇은 깊이의 무한사면파괴를 해석하기 위하여 포화토 및 불포화토 상태에서의 일반적인 유효응력의 개념을 통합하였다. 이를 설명하기 위하여 Fig. 7과 같이 일반적인 무한사면에 대한 단면을 가정하였다. 여기서,  $z$ 는 지하수위로부터의 거리,  $z_w$ 는 풍화영역,  $\beta$ 는 사면경사이다.

이를 토대로 일반적인 무한사면의 안전율은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\gamma H_{ss} \sin \beta \cos \beta} \quad (4)$$

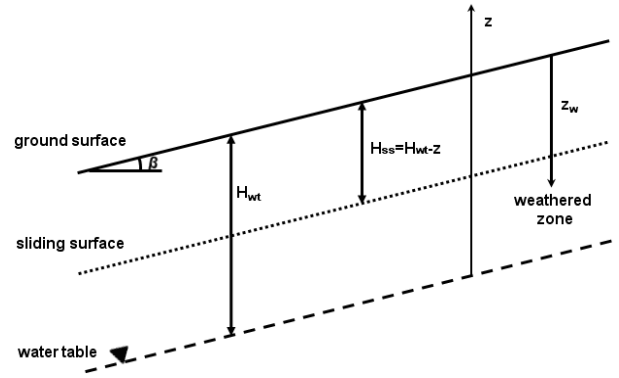


Fig. 7. Typical infinite slope

위 식에 전술한 흡입응력을 고려한 유효응력을 나타내는 식 (2)를 대입하여 정리하면 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{c' + [\gamma H_{ss} \cos^2 \beta - \sigma^s] \tan \phi'}{\gamma H_{ss} \sin \beta \cos \beta} \\ = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{2c'}{\gamma H_{ss} \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H_{ss}} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \phi' \quad (5)$$

일반적인 사면안정해석에서는 흙의 종류가 일정하면 깊이에 상관없이 내부마찰각  $\phi'$ 는 일정하다고 가정한다. 그러나 여러 연구자들의 실험적 근거를 토대로 실제 사면에서는 깊이에 따라 간극률  $n$ 의 차이가 있으며, 이는 내부마찰각  $\phi'$ 에 영향을 미친다는 사실이 밝혀졌다(Marachi et al., 1969; Cornforth, 1973; Cornforth, 2005). 그 예로 실제 사면에서는 지표면으로 부터 일정한 깊이까지 풍화작용에 영향을 받아 상대적으로 큰 간극률을 가지며, 지표면으로부터 깊이가 깊어질수록 자중의 영향으로 간극률이 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 즉, 내부마찰각  $\phi'$ 은 간극률에 따라 반비례함을 알 수 있으며, 이는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \phi_o + \frac{\Delta \phi}{\Delta n} (n_o - n) \quad (6)$$

여기서,  $\phi_o$ =지표면에서의 내부마찰각

$n_o$ =지표면에서의 간극률

$\Delta \phi$ =풍화영역깊이( $z_w$ )에서의 내부마찰각 변화량

$\Delta n$ =풍화영역깊이( $z_w$ )에서의 간극률 변화량

또한 깊이에 따라 지반의 자중 또는 외부하중으로 인

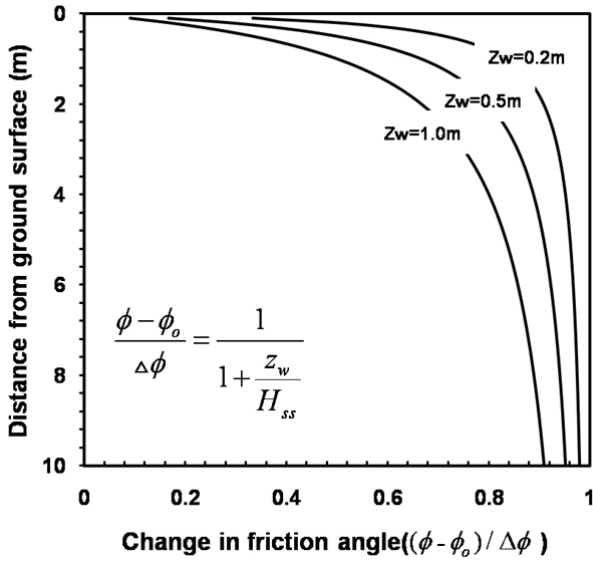


Fig. 8. The relative change in friction angle as a function of depth for various thickness of the weathered zone

해 감소되는 간극률은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = n_o - \frac{\Delta n}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (7)$$

다시 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같이 사면깊이에 따라 변화되는 내부마찰각을 산정할 수 있다. Fig. 8은 다른 풍화영역에 따른 토층깊이의 함수로서 내부마찰각( $(\phi - \phi_o) / \Delta\phi$ )의 상대적인 변화를 도시한 것이다.

$$\phi = \phi_o + \frac{\Delta\phi}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (8)$$

따라서, 흡입응력을 고려한 유효응력과 풍화영역을 고려한 깊이별 내부마찰각을 적용하여 정리하면 포화 및 불포화 무한사면의 안전율은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이 식에서 첫 번째 항은 내부마찰각에 대한 항, 두 번째는 점착력에 대한 항, 그리고 마지막 항은 흡입응력에 대한 항을 나타낸다. 이때 마지막 항은 부(-)의 값을 나타내므로 불포화조건에서의 사면안전율을 증가시키는 역할을 한다.

$$F_s(z) = \frac{\tan\phi'(z)}{\tan\beta} + \frac{2c'}{\gamma(H_{wt} - z)\sin 2\beta} - r_u(\tan\beta + \cot\beta)\tan\phi'(z)$$

$$r_u = \frac{\sigma^s}{\gamma(H_{wt} - z)}, \quad \phi(z)' = \phi_o + \frac{\Delta\phi}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (9)$$

일반적으로 사면 내에서 모관흡수력 또는 흡입응력은 흙의 종류, 지하수위, 사면의 배열, 침투조건에 따라 변화한다. 1차원 정상상태흐름의 모관흡수력 이론을 토대로, 이와 같은 조건들을 고려한 모관흡수력은 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다(Lu and Griffiths, 2004).

$$u_a - u_w = -\frac{1}{\alpha} \ln[(1 + q/k_s)e^{-\gamma_w \alpha z} - q/k_s] \quad (10)$$

여기서,  $q$ =정상침투율 (-) 또는 정상증발율 (+),  $k_s$ =포화투수계수,  $\gamma_w$ =물의 단위중량,  $z$ =지하수위로 부터의 거리

식 (1)과 식 (10)을 식 (2)에 대입함으로써 정상침투를 고려한 흡입응력을 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (11)을 식 (9)에 적용할 경우 정상 침투시 불포화 조건에서 흡입응력을 고려한 무한사면 안정해석이 가능함을 알 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (11a)$$

$$\sigma^s = \frac{1}{\alpha} \frac{\ln[(1 + q/k_s)e^{-\gamma_w \alpha z} - q/k_s]}{\left(1 + \left\{-\ln[(1 + q/k_s)e^{-\gamma_w \alpha z} - q/k_s]\right\}^n\right)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w > 0 \quad (11b)$$

## 4.2 불포화 무한사면의 안정성 평가

흡입응력을 고려한 불포화 무한사면의 안정성을 평가하기 위하여 Fig. 9와 같은 무한사면을 가정하였다. 그리고 무한사면을 이루고 있는 토층은 대상 시료인 상대밀도 60%의 주문진표준사로 각각 이루어진 것으로 가정하였다.

Table 3은 흡입응력을 고려한 불포화 무한사면의 안정성 평가를 위한 해석단면의 토층에 대한 토질조건과 사면조건을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 풍화영역은 지표면으로부터 0.5m, 토층 내에서의 내부마찰각 변화는 6°라 가정하였다(Lu and Godt, 2008). 불포화 무한사면 안정해석에 필요한 계수  $\alpha$ 와  $n$ 은 van Genuchten의 방법으로 산정된 흡-함수특성곡선으로부터 구할 수

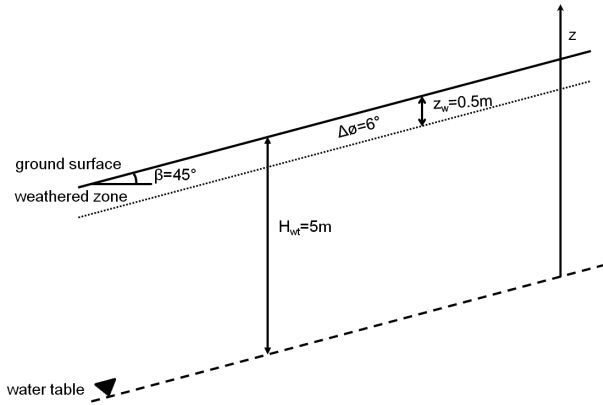


Fig. 9. Hypothetical infinite slope for stability analysis

Table 3. Soil and slope condition for hypothetical case study

soil condition	$\phi_o$	39.98°
slope condition	$\Delta\phi$	6°
	$\beta$	45°
	$H_{wt}$	5 m
	$z_w$	0.5 m

있으며(Table 2 참조), 상대밀도 60%인 주문진 표준사의 내부마찰각은 직접전단시험을 실시하여 산정하였다. 그리고 지하수위는 지표면으로부터 5m 아래에 존재하는 것으로 가정하였다.

#### 4.2.1 비침투 조건시 불포화 무한사면의 안정해석결과

침투가 발생되지 않는 무한사면에서 지하수위 영향에 따른 흡입응력은 식 (3)으로 계산하여 구할 수 있다. Fig. 10은 침투가 발생되지 않는 조건에서 깊이에 따른 체적함수비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체적함수비는 지하수위로부터 멀어짐에 따라 급격하게 감소하며 약 0.5m 이상의 거리에서는 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 한편 Fig. 11은 침투가 발생되지 않는 조건에서 깊이에 따른 흡입응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입응력은 지하수위의 영향으로 인하여 지하수위로부터 약 0.2m까지 급격하게 증가하였다가 이후 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

이와 같이 산정된 흡입응력을 토대로 식 (9)를 이용하여 깊이에 따른 무한사면의 안전율을 계산할 수 있다. Fig. 12는 침투가 발생되지 않는 조건에서 흡입응력을 고려한 무한사면의 안정해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최소사면안전율은 0.85이며, 지표면에서 나타났으며, 건조과정과 습윤과정에서 동일한 값을 갖는다. 그러나 최대사면안전율은 건조과정의 경

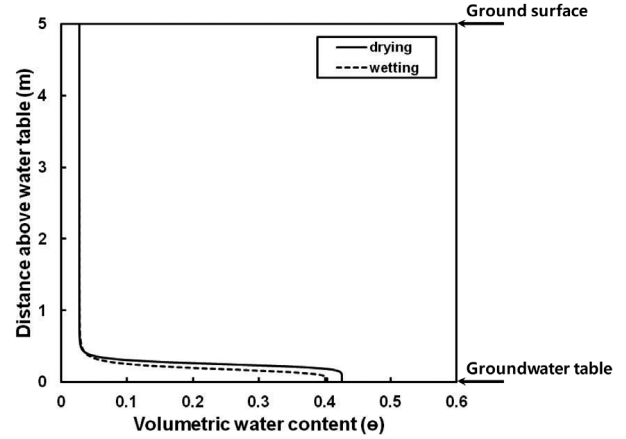


Fig. 10. Profiles of volumetric water content with depth under non infiltration condition

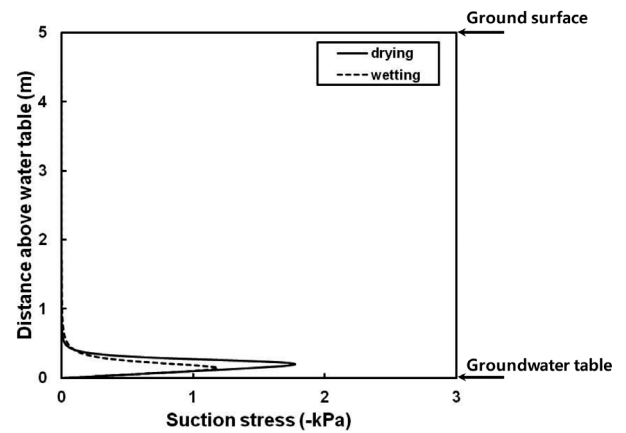


Fig. 11. Profiles of suction stress with depth under non infiltration condition

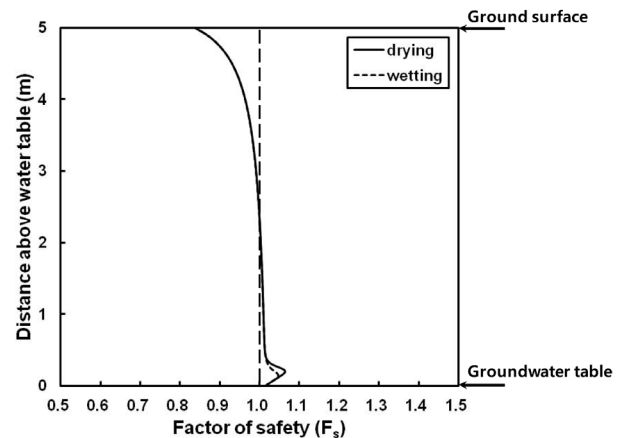


Fig. 12. Profiles of factor of safety in the infinite slope under non infiltration condition

우 1.06, 습윤과정의 경우 1.05이며, 지하수위에 의한 흡입응력의 영향으로 지하수위로부터 약 0.2m 위치에서 나타났다. 한편, 대상사면의 경우 지표면으로부터 2.4m 깊이에서 사면안전율이 1이하인 것으로 나타났다. 따라



서 비침투조건시 지표면으로부터 2.4m 사이에서 무한 사면 파괴가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다.

침투가 발생되지 않는 조건에서 흡입응력을 고려한 무한사면의 안전율은 크게 3개의 구간으로 구분할 수 있다. 먼저 지하수위로부터 0.4m까지로 일시적으로 사면안전율이 증가하는 구간, 0.4m에서 4.5m까지 사면안전율이 완만하게 감소하는 구간, 그리고 4.5m에서 5.0m 즉 지표면까지 사면안전율이 급격하게 감소하는 구간으로 구분된다. 여기서 지하수로부터 0.4m까지 일시적으로 사면안전율이 증가하는 구간은 지하수면위의 모관흡수력으로 인한 흡입응력의 영향에 의한 것이다. 그리고 지표면으로부터 0.5m 깊이까지 급격하게 사면안전율이 감소하는 구간은 풍화작용으로 인한 내부마찰각의 저하에 의한 것이다.

#### 4.2.2 침투 조건시 불포화 무한사면의 안정해석결과

강우로 인한 정상침투가 발생하는 무한사면에서 지하수위 영향에 따른 흡입응력은 식 (11)로 계산하여 구할 수 있다. 정상침투시 포화투수계수는 투수시험을 통하여 산정하였으며, 상대밀도 60%인 주문진 표준사의 포화투수계수  $k_s$ 는  $1.998 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 측정되었다.

한편, 본 연구에서는 강우발생시 토층으로 침투되는 강우의 정상침투율을  $-1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $-1.5 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  및  $-1.8 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 가정하였다. 식 (11)에서 정상침투율은 (-)의 값으로 입력해야 하며, 이 값이 지반의 포화투수계수를 초과할 경우 식 (10)의 수학적 개념을 만족하지 못하게 되므로 이를 고려하여 정상침투율을 가정하였다.

Fig. 13은 정상침투가 발생하는 조건에서 깊이에 따른 체적함수비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는

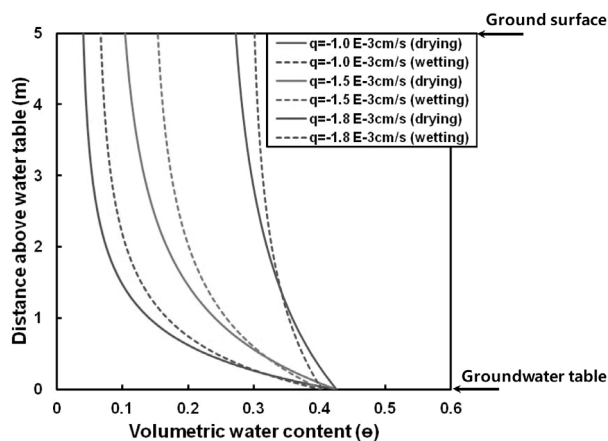


Fig. 13. Profiles of volumetric water content with depth under steady infiltration condition

바와 같이 체적함수비는 지하수위로부터 멀어짐에 따라 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 정상 침투율이 증가함에 따라 깊이에 따른 체적함수비의 변화는 작게 발생되며, 정상침투율이 클수록 동일한 깊이에서의 체적함수비는 크게 발생됨을 알 수 있다. 또한 동일한 깊이에서 체적함수비는 건조과정보다 습윤과정에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 비침투 조건에서 깊이에 따른 체적함수비의 변화와 매우 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 정상침투가 발생하는 조건에서 깊이에 따른 흡입응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡입응력은 지하수위로 멀어짐에 따라 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다. 비침투 조건시 토층내 흡입응력은 지하수위로부터 일정깊이까지만 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 침투가 발생하는 경우 흡입응력은 토층내 전체적으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 지표면 부근에서 흡입응력이 가장 크게 발현됨을 알 수 있다. 한편 정상침투율이 증가함에 따라 깊이에 따른 흡입응력의 변화는 작게 발생되며, 동일한 깊이에서 흡입응력은 건조과정이 습윤과정에서 보다 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 15는 정상침투가 발생하는 조건에서 흡입응력을 고려한 무한사면의 안정해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 정상침투율이 가장 큰  $-1.8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 인 경우 지표면으로부터 0.2m에서 3m까지 사면안전율이 1이하인 것으로 나타났다. 그러나 정상침투율이  $-1.5 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  및  $-1.8 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 인 경우 사면안전율은 모두 1 이상인 것으로 나타났다. 깊이에 따른 사면안전율은 습윤과정의 경우가 건조과정의 경우보다 더 작

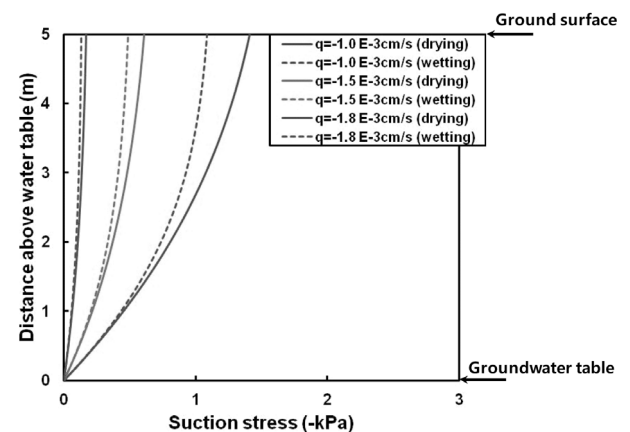


Fig. 14. Profiles of suction stress with depth under steady infiltration condition

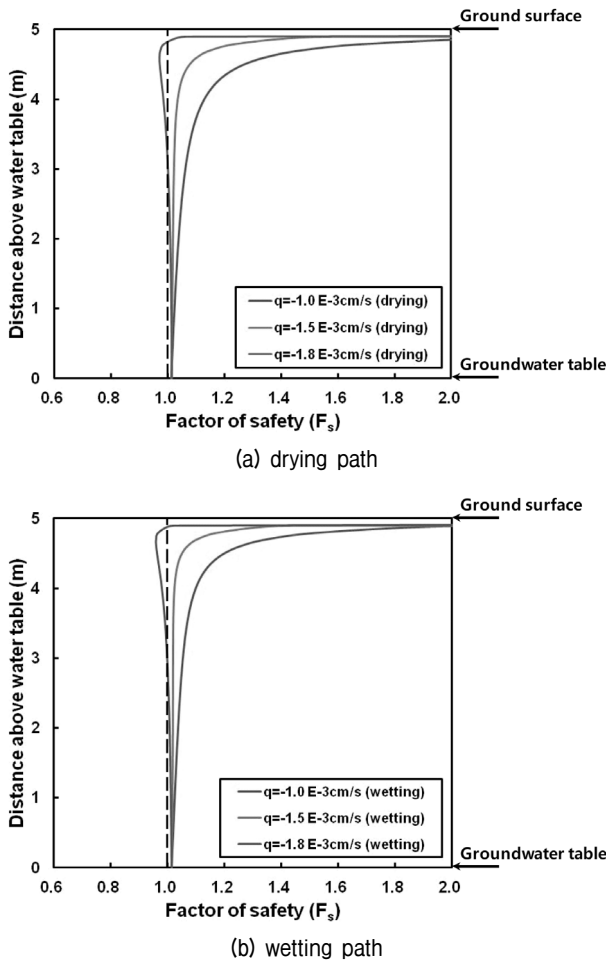


Fig. 15. Profiles of factor of safety in the infinite slope under steady infiltration condition

은 값을 나타내고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 정상침투율이  $-1.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 인 경우 지표면으로부터 0.2m에서 3m 사이에서 무한사면 파괴가 발생할 가능성이 높으며, 이는 얇은 산사태의 발생형태임을 알 수 있다.

이상의 결과에 의하면 침투가 발생되지 않는 경우 흡입응력의 영향범위 내에서만 사면안전율의 증가가 나타나지만, 침투가 발생되는 경우 토층내 전체 깊이에서 흡입응력의 영향으로 인하여 사면안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 정상침투율이 포화투수계수에 가까워짐에 따라 전체적인 사면안전율의 증가정도는 감소하지만 침투가 발생되지 않는 경우에 비하여 사면안전율은 높은 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 흡입응력을 고려한 불포화 무한사면

의 안정해석기법을 제시하고, 특정 사면을 대상으로 적용한 결과를 분석하였다. 이를 위하여 상대밀도 60%의 주문진 표준사로 구성된 불포화 무한사면에 대하여 흡입응력을 고려한 안정해석기법을 적용하였다. 먼저 상대밀도 60%의 주문진 표준사를 대상으로 건조 및 습윤 과정의 모관흡수력과 체적함수비를 측정하여 흡입수 특성곡선(SWCC)을 산정하고, 흡입응력과 유효포화도의 상관관계를 나타내는 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curves, SSCC)을 산정하였다. 이와 같이 산정된 불포화도의 특성곡선을 토대로 흡입응력을 고려한 불포화 사면의 안정해석기법을 적용하여 강우 침투조건에 따른 토층내 사면안전율 변화를 살펴보고, 사면파괴 발생여부와 사면파괴형태를 예상하였다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 흡입응력을 고려한 불포화 사면의 안정해석기법은 강우의 정상침투 및 비침투에 따른 해석이 가능하고, 토층내 깊이에 따른 사면안전율을 산정할 수 있다. 또한 지표면으로부터 일정깊이까지의 풍화작용에 의한 영향을 고려할 수 있다.
- (2) 상대밀도 60%의 주문진 표준사에 대한 흡입응력특성곡선(SSCC) 산정결과 흡입응력은 유효포화도가 증가함에 따라 증가하다가 완전 포화 직전에 급격하게 감소한다. 즉 불포화상태에서는 흡입응력이 존재하지만 건조 및 포화상태에서는 흡입응력을 모두 잃게 된다.
- (3) 강우의 비침투 조건에서 흡입응력은 지하수위로부터 상부의 일정깊이까지만 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 강우의 정상침투 조건에서 흡입응력은 토층내 전체적으로 영향을 미치며, 지표면 부근에서 흡입응력이 가장 크게 발현됨을 알 수 있다.
- (4) 강우의 비침투 조건에서 무한사면의 안전율은 지하수위에 의한 흡입응력의 영향범위 내에서 급격하게 증가 및 감소하였다. 사면안정해석결과 지표면으로부터 2.4m 사이에서 사면안전율이 1 이하이므로 해당깊이에서 사면파괴가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다.
- (5) 강우의 정상침투가 발생되는 조건에서 무한사면의 안전율은 침투로 인한 토층내 흡입응력의 영향으로 비침투 조건에 비해 증가함을 알 수 있다. 그러나 강우의 정상침투율이 포화투수계수에 가까워짐에 따라 사면안전율은 감소하는 경향이 나타났다.

(6) 강우의 정상침투율이  $-1.8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 인 경우 무한사면의 안정해석결과 지표면으로부터 0.2m에서 3m사이에서 사면안전율이 1 이하이므로 해당깊이에서 사면파괴가 발생할 가능성이 높으며, 이는 얇은 산사태의 발생형태임을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Bishop, A.W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
- Cornforth, D.H. (1973), "Prediction of drained strength of sands from relative density measurement", *ASTM STP 523*, pp.281-303.
- Cornforth, D.H. (2005), *Landslides in Practice; Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*, John Wiley and Sons, 569p.
- de Campos, T.M.P., Andrade, M.H.N., and Vargas, E.A., Jr. (1991), "Unsaturated colluvium over rock slide in a forested site in Rio de Janeiro, Brazil", *Proc. 6th Int. Symp. on landslides*, Christchurch, New Zealand, Vol.2, pp.1357-1364.
- Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R., and Vaunat, J. (2003), "An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour", *Geotechnique*, Vol.53, No.1, pp.123-135.
- Godt, J.W., Baum, R.L., and Chleborad, A.F. (2006), "Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.31, No.1, pp.97-110.
- Hilf, J.W. (1956), *An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils*, Technical Memorandum No.654, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado.
- Karube, D. and Kato, S. (1994), "An ideal unsaturated soil and the Bishop's soil", *Proc. 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol.1, pp.43-46.
- Kim, J.H., Jeong, S.S., Park, S.W., and Sharma, J. (2004), "Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils", *Engineering Geology*, Vol.75, pp.251-262.
- Kim, K.S., Song, Y.S., Chae, B.G., Cho, Y.C., and Lee, C.O. (2007), "Geometric characteristics of landslides on natural terrain according to the geological condition", *Journal of Engineering Geology*, Vol.17, No.1, pp.75-87. (in Korean)
- Lu, N. and Godt, J. (2008), "Infinite-Slope Stability under Steady Unsaturated Seepage Conditions", *Water Resources Research*, W11404, Vol.44, pp.1-13.
- Lu, N. and Griffiths, D.V. (2004), "Suction stress profiles in unsaturated soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.130, No.10, pp.1063-1076.
- Lu, N. and Likos, W.J. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York. 556p.
- Lu, N. and Likos, W.J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
- Lu, N., Godt, J.W., and Wu, D.T. (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, Vol.46, W05515.
- Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., and Duncan, J.M. (1969), *Strength and deformation characteristics of rockfill materials*, University of California, Report TE-69-5, Berkeley, California.
- Mualem, Y. (1976), "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
- 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.
- Park, D.K., Oh, J.R., Son, Y.J., Park, J.H., and Lee, M.S. (2008), "Steep slope management system in Korea", *Proc. the 2nd East Asia Landslides Symposium*, Seoul, pp.7-11.
- Song, Y.S. and Choi, J.S. (2012), "Hysteresis of the suction stress in unsaturated weathered mudstone soils", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.3, pp.91-100. (in Korean)
- Song, Y.S., Choi, J.S., and Kim, G.W. (2012a), "Experimental study on the hysteresis of suction stress in unsaturated sand" *Journal of Engineering Geology*, Vol.22, No.2, pp.145-155. (in Korean)
- Song, Y.S., Hong, W.P., and Woo, K.S. (2012b), "Behavior and analysis of stabilizing piles installed in a cut slope during heavy rainfall", *Engineering Geology*, Vol.129-130, pp.56-67.
- Song, Y.S., Hwang, W.K., Jung, S.J., and Kim, T.H. (2012c), "A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions", *Engineering Geology*, Vol.124, pp.90-97.
- Song, Y.S., Lee, N.W., Hwang, W.K., and Kim, T.H. (2010), "Construction and application of an automated apparatus for calculating the Soil-Water Characteristic Curve", *Journal of Engineering Geology*, Vol.20, No.3, pp.281-295. (in Korean)
- Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- 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.
- Wayllace, A. and Lu, N. (2012), "A transient water release and imbibitions method for rapidly measuring wetting and drying soil water retention and hydraulic conductivity functions", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.35, GTJ103596.
- Wolle, C.M. and Hachich, W. (1989), "Rain-induced landslides in southeastern Brazil", *Proc. of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, pp. 1639-1644.

(접수일자 2013. 1. 2, 수정일 2013. 4. 23, 심사완료일 2013. 8. 21)