

강우침투시 불포화 무한사면의 안정성 평가

Stability of unsaturated infinite slope under rainfall-induced infiltration

송영석¹⁾, Young-Suk Song, 황웅기²⁾, Woong-Ki Hwang, 이남우³⁾, Nam-Woo Lee,
김태형⁴⁾, Tae-Hyung Kim

- 1) 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
- 2) 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University
- 3) 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 연구생, 현 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University
- 4) 한국해양대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University

SYNOPSIS : The stability analysis of unsaturated infinite slope under rainfall-induced infiltration condition was performed using the generalized effective stress that unifies both saturated and unsaturated condition recently proposed by Lu and Likos(2004, 2006). The Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) of the sand with the relative density of 75% was first measured for both drying and wetting processes. The Hydraulic Conductivity Function (HCF) and Suction Stress Characteristic Curve (SSCC) were subsequently estimated. Also, under the rainfall-induced infiltration condition transient seepage analysis of unsaturated infinite slope was performed using the finite element program, SEEP/W. Based on these results, the stability of unsaturated infinite slope under rainfall-induced infiltration condition was examined considering the suction stress. According to the results, the negative pore water pressure and water content within the soil changed with time due to the infiltration. Also, the variation of those caused the variation of suction stress and then the factor of safety of slope changed consequently during the rainfall period.

Keywords : Matric suction, Infiltration, Soil-Water Characteristic Curve, Suction Stress Characteristic Curve, Factor of safety

1. 서론

우리나라의 경우 대부분의 산사태는 우기에 집중적으로 발생되므로 우리나라 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 대부분의 산사태는 발생 깊이가 2m 이내로서 얇은 평면파괴형태로 발생된다(최경, 1986; 김경수 등, 2007). 즉, 우리나라의 산사태는 대부분 강우의 침투로 인하여 발생하며, 이때 파괴면은 주로 얇은 깊이에서 형성된다. 강우의 침투로 인하여 지하수위 상부의 위치하는 불포화 지반

의 포화도가 증가하게 되며, 모관흡수력은 감소하게 된다. 이로 인하여 불포화 지반내 흡입응력(suction stress)은 변화하게 되며, 이는 불포화 사면의 안정성에 영향을 미치게 된다.

따라서 본 논문에서는 강우시 침투로 인한 흡입응력의 변화가 불포화토 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 먼저 주문진 표준사의 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성시험을 수행하여 그 결과를 바탕으로 수리특성곡선들(함수특성곡선, 불포화투수계수함수, 흡입응력특성곡선)을 산정하였다. 또한, 유한요소 프로그램을 이용하여 강우시 시간에 따른 지반내 모관흡수력의 변화를 산정한 후, 그에 따른 흡입응력의 변화 및 사면의 안정성을 분석하였다.

2. 불포화토의 수리 특성

2.1 함수특성곡선

모관흡수력은 불포화토와 관련된 흐름특성, 강도특성 및 변형특성을 명확히 이해하기위해서 반드시 고려되어야하는 중요한 요소이고(Fredlund와 Xing, 1994; Vanapalli 등, 1996), 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)은 일반적으로 불포화토에 대한 모관흡수력(matric suction)과 체적함수비(volumetric water content)의 관계로 정의된다. 따라서 함수특성곡선은 불포화토와 관련된 지하수의 흐름, 사면의 안정성 등을 규명하기 위해서 반드시 고려해야 할 지반특성이다.

불포화토의 함수특성곡선을 수학적으로 표현하기 위한 다양한 모델들이 여러 연구자들에 의해 제안되었으며, 그 중 Brooks and Corey (1964), van Genuchten (1980), Fredlund and Xing (1994)이 제안한 모델이 지반공학 분야에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 van Genuchten (1980)이 제안한 아래와 같은 함수특성곡선 모델을 사용하였다.

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

여기서, Θ = 정규함수비, S_e = 유효포화도, S = 포화도, S_r = 잔류포화도, θ = 체적함수비, θ_r = 잔류체적함수비, θ_s = 포화체적함수비, ψ = 모관흡수력(= $u_a - u_w$), α = 공기함입치와 관련된 계수, n = 함수특성곡선의 기울기와 관련된 계수, m = 잔류함수비와 관련된 계수를 나타낸다.

2.2 불포화 투수계수함수

불포화 투수계수를 실험을 통해 직접적으로 측정하기에는 실험상의 어려움으로 인해 함수특성곡선으로부터 간접적으로 추정하는 방법이 이용되고 있다. 불포화 투수계수함수를 추정하기 위한 모델은 식(2)와 같이 van Genuchten (1980)이 Burdine (1953)과 Mualem (1978)이 제안한 통계적 투수계수 모델에 식 (1)을 대입함으로써 제안한 상대투수계수함수 모델을 적용하였다. 이 모델은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선으로부터 직접적으로 추정할 수 있으며, 포화투수계수를 곱함으로써 투수계수함수를 추정할 수 있다.

$$k_r = \Theta^{0.5} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (2)$$

2.2 흡입응력특성곡선

일반적으로 불포화토의 전단강도를 결정하는 방법으로는 전단강도를 하나의 응력상태변수로 정의한 Bishop(1959)의 유효응력 접근법과 순연직응력과 모관흡수력을 독립적인 응력변수로 정의한 Fredlund and Morgenstern(1978)의 독립상태변수(independent state variable) 접근법으로 구분 할 수 있다. 식 (3)은 Bishop(1959)의 이론을 나타낸 것이며, 모관흡수력이 독립적인 응력변수로 정의될 수 없음을 나타낸다. 식 (4)는 Fredlund and Morgenstern(1978)의 이론을 나타낸 것이며, 모관흡수력 증가에 따라 전단강도가 선형적으로 증가하는 것으로 나타낸다.

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi' \quad (3)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (4)$$

Lu and Likos(2004, 2006)에 의하면 모관흡수력은 간극내 물과 공기의 접촉면에서 발생하므로 독립적인 응력변수로 정의할 수 없으므로, Bishop(1959)의 유효응력 접근법이 합리적이라고 하였다. 그리고 식 (5)에서 보는 바와 같이 Bishop(1959)의 이론을 토대로 불포화 전단강도에 흡입응력(suction stress) 개념을 도입하고, Mohr-Coulomb 파괴규준으로 확장하였다. 식 (6)에서 σ^s 는 흡입응력으로서 입자상호간에 발생하는 물리화학적 응력, 표면장력에 의한 모관응력, 흩구조에 따른 응력을 고려하였다. 그리고 식 (7)에서 보는 바와 같이 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있으므로 함수특성곡선에서의 면적을 의미한다. 그러므로 흡입응력은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)이라고 한다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \chi(u_a - u_w)\tan\phi' = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + S_e(u_a - u_w)\tan\phi' \quad (5)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w)S_e = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (6)$$

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad ; u_a - u_w \leq 0 \quad (7a)$$

$$\sigma^s = -\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}(u_a - u_w) = -\frac{S - S_r}{1 - S_r}(u_a - u_w) \quad ; u_a - u_w > 0 \quad (7b)$$

3. 주문진 표준사의 수리 특성

본 연구에서는 사면안정해석 대상 지반인 사질토의 함수특성곡선과 불포화투수계수함수 그리고 흡입응력특성곡선을 산정하기 위하여 상대밀도 75%의 주문진 표준사에 대한 기본적인 물리적 시험 및 함수특성시험을 수행하였고, 그 결과는 표 1과 같이 나타났다.

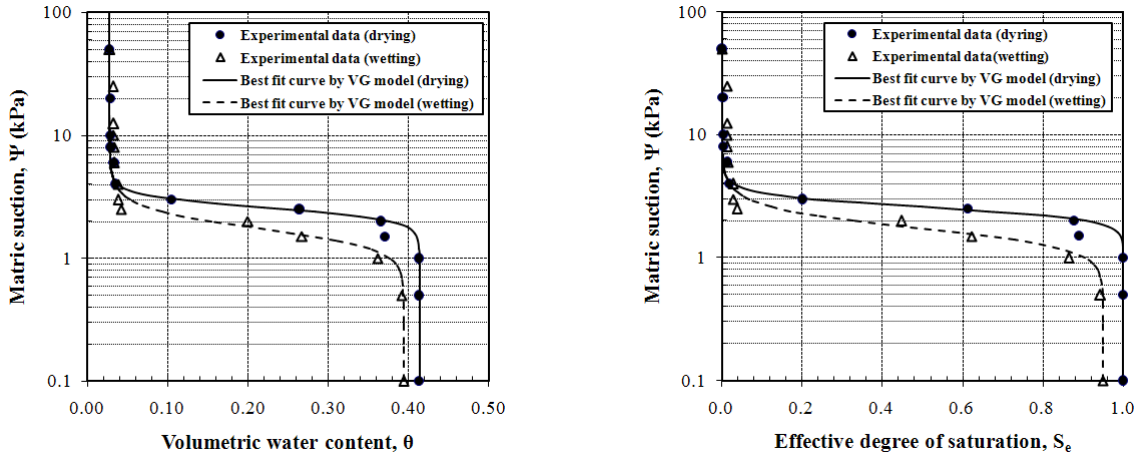
표 1. 시험시료의 물리적 특성

Description	Symbol		Property
Specific gravity	G_s		2.621
Max. dry unit weight	γ_{dmax}	N/m ³	15.824
Min. dry unit weight	γ_{dmin}		13.40
Effective particle size	D_{10}	mm	0.42
D_{30} particle size	D_{30}		0.51
D_{60} particle size	D_{60}		0.63
Uniformity coefficient	C_u		1.5
Coefficient of curvature	C_c		1.0
Soil classification	USCS		SP
Saturated hydraulic conductivity	k_s	m/hr	0.532

3.1 함수특성곡선

자동 함수특성곡선 시험장치(송영석 등, 2010)를 이용하여 단계별 모관흡수력과 간극수량의 관계를 측정하였다(그림 1). 함수특성시험은 함수특성곡선의 이력현상을 살펴보기 위해 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과, 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정

둘 모두에 대하여 수행되었다. 건조 및 습윤과정에서 각각 측정된 모관흡수력($u_a - u_w$)과 체적함수비(θ)의 관계를 토대로 최소제곱회귀분석을 통해 van Genuchten(1980) model인 식 (1)의 곡선 맞춤 parameter들을 각각 산정하였다.



(a) 체적함수비 vs 모관흡수력

(b) 유효포화도 vs 모관흡수력

그림 1. 건조 및 습윤과정의 함수특성곡선

표 1은 van Genuchten(1980) 방법으로 예측한 상대밀도 75%의 사질토에 대한 건조 및 습윤과정의 불포화도 관련계수를 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 체적함수비에서 모관흡수력이 다르게 나타나는 함수특성곡선의 이력현상(hysteresis)을 볼 수 있으며, 잉크병 효과와 접촉각 효과가 이력현상의 주요 원인으로 알려져 있다. 또한 함수특성곡선의 전이구간의 기울기가 매우 큰 것으로 나타났으며, 잔류체적함수비에 해당하는 모관흡수력이 약 4kPa에 해당하는 것으로 나타났다. 이는 실험 시료인 주문진 표준사의 입자가 매우 균등하고 입도가 매우 불량하기 때문으로 판단된다.

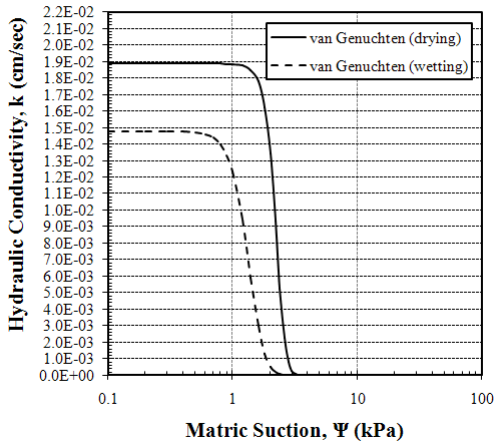
표 2. van Genuchten(1980)방법으로 산정된 불포화도 관련계수

계수	θ_s	θ_r	a	n	m
건조과정	0.41	0.03	0.393	8.553	0.883
습윤과정	0.39	0.03	0.593	5.561	0.820

3.2 불포화투수계수함수

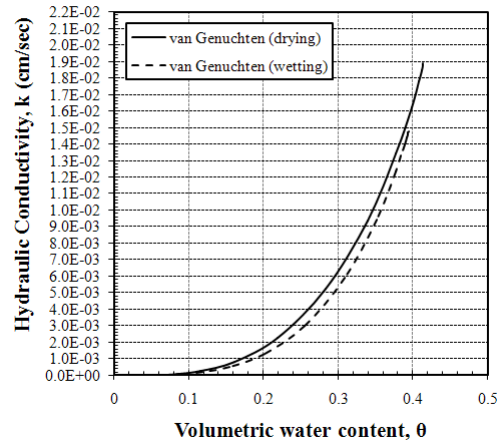
함수특성시험으로부터 산정된 함수특성곡선함수로부터 식 (2)를 이용하여 불포화 투수계수함수를 건조 및 습윤과정에 대하여 각각 산정하였다(그림 2). 함수특성곡선과 마찬가지로 투수계수 또한 공기함입치 전까지는 일정하게 유지되었고, 공기함입치를 초과하는 순간부터 투수계수가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 특히 동일한 모관흡수력에 대해서 건조과정의 투수계수가 습윤과정의 투수계수보다 크게 나타나는 이력현상을 보인다.

Hydraulic Conductivity Function



(a) 불포화투수계수 vs 모관흡수력

Hydraulic Conductivity Function

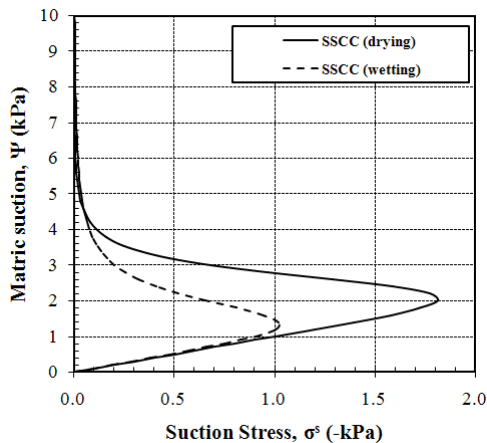


(b) 불포화투수계수 vs 체적함수비

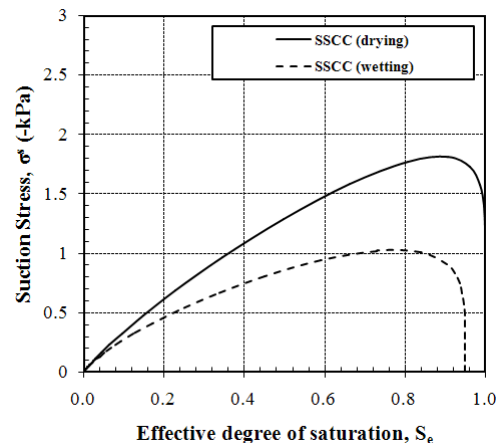
그림 2. 건조 및 습윤과정의 불포화투수계수함수

3.3 흡입응력특성곡선

흡입응력특성곡선 또한 함수특성곡선으로부터 식 (7b)을 이용하여 상대밀도 75%의 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정의 흡입응력특성곡이 산정되었다(그림 3). 함수특성곡선 및 불포화 투수계수함수와 마찬가지로 흡입응력특성곡선도 이력현상을 보이며, 건조과정 및 습윤과정의 최소흡입응력은 각각 약 -1.8kPa와 -1kPa로 나타났다. 또한 흡입응력특성곡선은 공기함입치 이하인 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 흡입응력은 감소하지만, 공기함입치 이상인 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 흡입응력은 증가하여 결국 0의 값을 갖는다. 흡입응력은 부(-)의 값으로 작용하기 때문에 결국 불포화토의 전단강도 및 유효응력을 증가시키게 된다. 따라서 불포화 상태의 사질토로 구성된 사면의 경우 흡입응력이 사면의 안정성 증가에 기여하다가 완전 포화에 가까워지면서 흡입응력이 사라지고 정의 간극수압이 발생하면서 사면의 안정성이 급격히 감소하게 되고 그로 인해 사면붕괴가 유발된다.



(a) 흡입응력 vs 모관흡수력



(b) 흡입응력 vs 유효포화도

그림 3. 건조 및 습윤과정의 흡입응력특성곡선

4. 불포화 무한사면 안정해석

강우시 불포화 무한사면의 안정해석을 위해서는 강우로 인한 지반내 모관흡수력과 체적함수비의 변화를 반드시 고려해야 한다. 이러한 강우시 지반내 모관흡수력 및 체적함수비의 변화를 고려하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 GEO-SLOPE International의 SEEP/W를 이용하여 시간에 따른 비정상 침투 해석을 수행하였다.

침투해석 단면은 그림 1과 같고, 사면은 경사가 1:1.5인 임의의 사질토 사면으로 가정하였다. 강우시 지반내 침투효과가 충분히 발현될 수 있도록 사면의 깊이를 4.05m, 지하수면은 지표면으로부터 3.05m 아래에 위치하는 것으로 하였다(그림 4). 또한, 지반의 침투해석을 위한 불포화 수리특성곡선은 앞서 수행된 흡윤과정의 함수특성시험으로부터 산출된 그림 1 및 2와 같은 흡윤과정의 함수특성곡선 및 불포화 투수계수함수를 적용하였고, 강우조건은 지반의 포화투수계수를 고려하여 0.7m/hr 로 가정하였다(표 2).

또한, 침투해석에 있어 선행강우에 의한 지반의 초기상태 즉, 지반의 초기 모관흡수력 및 체적함수비에 따라 침투시간에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 지반의 초기 모관흡수력을 지하수면으로부터 거리에 비례하여 정수압적으로 증가하되 최대 부간극수압수두를 2m로 설정하였고, 지반내 침투가 원활히 이루어질 수 있도록 지표면으로부터 하부 5cm에 해당하는 영역의 모관흡수력을 3kPa로 설정하여 침투해석을 수행하였다.

사면의 안정해석을 위해서는 Lu and Likos(2004, 2006)가 제안한 흡입응력 개념을 적용한 유효응력을 이용하여 기존의 한계평형해석을 통한 사면의 안정성을 평가하였다. 식 (8)은 불포화 무한사면의 임의의 활동면에서의 안전율을 산정하는 식이다. 첫 번째 항은 내부마찰각에 관한 항, 두 번째 항은 점착력에 관한 항, 그리고 세 번째 항은 흡입응력의 관한 항이다.

$$F(z) = \frac{\tan\phi'(z)}{\tan\beta} + \frac{2c'}{\gamma H_{ss} \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H_{ss}} (\tan\beta + \cot\beta) \tan\phi' \quad (8)$$

여기서, H_{ss} 는 파괴가 일어난다고 가정하였을 때 지표면과 가상 파괴면 사이의 거리, β 는 사면의 경사를 나타낸다. 그리고 c' 과 ϕ' 는 각각 흙의 점착력 및 내부마찰각을 의미한다.

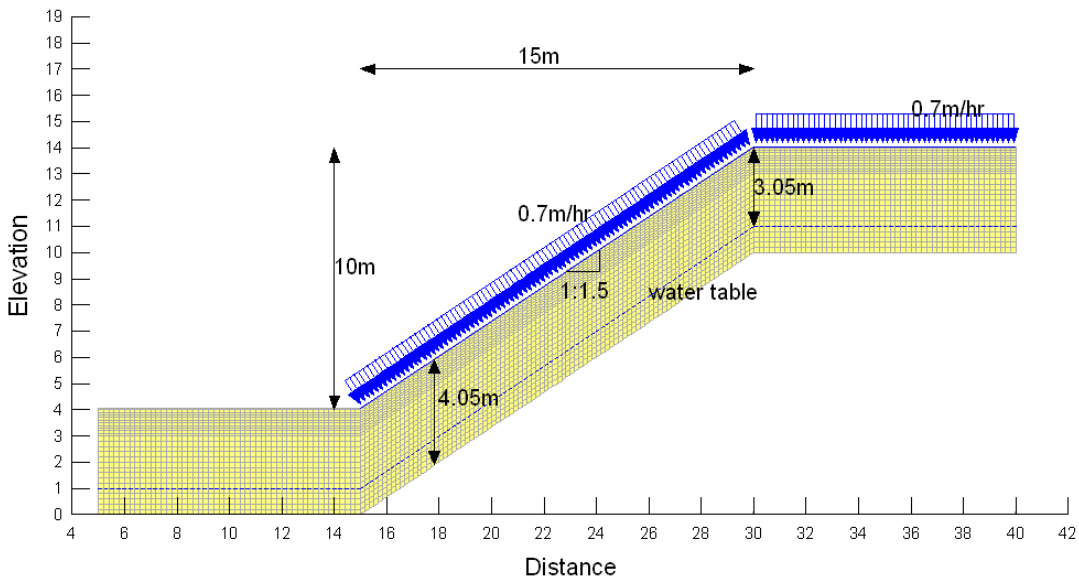


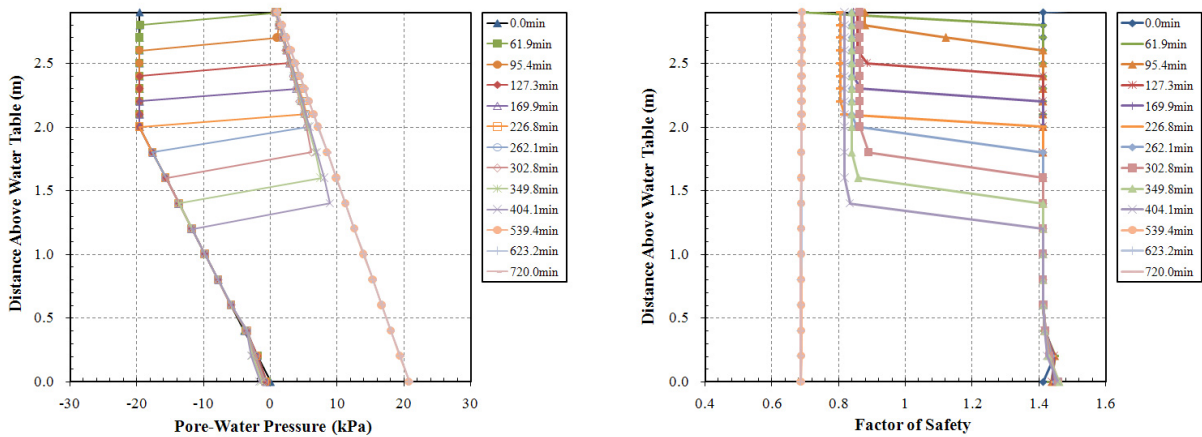
그림 4. 침투해석에 이용된 무한사면의 요소망

표 3. 불포화 무한사면의 안정해석을 위한 기본 조건

함수특성곡선 (van Genuchten parameter)	습윤과정	α (kPa ⁻¹)	0.593
		n	5.561
직접전단시험 (Direct shear test)		ϕ' (°)	43.27
		c' (kPa)	0
사면 조건 (Slope conditions)		β (°)	$\tan^{-1}(1/1.5)$
		H_{wt} (m)	3
침투 조건 (infiltration condition)		q(m/hr)	0.7

그림 5는 불포화 무한사면의 사면깊이별 시간에 따른 간극수압 및 안전율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기의 간극수압 분포는 해석시 주어진 초기조건에 따라 지하수면으로부터의 거리에 비례하여 정수압적으로 감소하다가 최대 부간극수압인 약 -20kPa에 도달한 후 일정한 것으로 나타났으며, 시간이 경과함에 따라 강우의 침투로 인해 지표면에서부터 점차 포화되어 정의 간극수압이 형성된 것으로 나타났다. 그리고 약 540분경과 후에 지반내 전 깊이가 포화되어 정의 간극수압이 형성되었다.

또한, 초기 사면의 안전율은 지하수면 위 약 0.4m 이상에서는 침투가 없는 무한사면의 안전율과 동일한 약 1.412를 나타내고, 지하수면 위 약 0.4m 범위 내에서는 흡입응력의 영향으로 안전율이 다소 크게 나타났다. 이는 그림 7(a)의 습윤과정의 흡입응력특성곡선에서 알 수 있듯이 흡입응력의 작용 결과로 판단된다. 시간이 경과함에 따라 강우의 침투로 인해 지표면에서부터 점차 포화되어 안전율이 감소하는 것으로 나타났으며, 약 540분경과 후에 사면의 전 영역이 완전히 포화되어 지하수위가 지표면과 일치하는 사면의 안전율과 동일한 약 0.688로 나타났다.



(a) 간극수압 변화

(b) 안전율 변화

그림 5. 사면깊이별 시간에 따른 간극수압 및 안전율의 변화

5. 결론

강우 침투시 시간에 따른 불포화 무한사면의 안정해석을 수행하였다. 자동 함수특성곡선 시험장치를 이용하여 상대밀도 75%의 사질토의 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성곡선(SWCC)을 측정하고, 이로부터 불포화투수계수함수(HCF) 및 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하였다. 사면의 안정해석은 흡입응력을

고려한 유효응력을 개념을 적용한 전단강도를 이용하여 무한사면에 대한 한계평형해석법으로 수행되었다. 사면안정 해석결과 지하수위 부근에서는 흡입응력의 영향으로 사면안전율은 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 나타내었으며, 대상지반의 공기함입치(AEV)에서 최대사면안전율이 발생하였다. 그리고 시간이 경과함에 따라 강우로 인해 지표면으로부터 포화대가 형성되고 그에 따라 정의 간극수압이 발생하여 안전율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 흡입응력의 영향범위는 공기침투가 발생된 이후 잔류체적함수비가 발생하는 시점인 funicular 영역으로 정의할 수 있다. 그러나 흡입응력을 고려하지 않은 경우 지하수위의 모관현상에 의한 사면안전율의 증감현상은 발생하지 않았다. 따라서 지하수위가 존재하는 불포화 무한사면의 안정해석에서는 지하수위의 영향으로 인한 모관현상과 흡입응력을 반드시 고려하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김경수, 송영석, 채병곤, 조용찬, 이춘오 (2007), “지질조건에 따른 자연사면 산사태의 기하학적 특성”, 지질공학, 제17권, 제1호, pp.75-87.
2. 송영석, 이남우, 김태형, 황웅기 (2010), “자동 함수특성곡선 시험장치를 이용한 모래의 불포화 특성 평가”, *Proc. 2nd Workshop on Unsaturated soils*, pp.42-65.
3. 최경 (1986), 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구, 강원대학교 박사학위 논문, 45p.
4. Bishop, A.W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
5. Brooks, R. H., and Corey, A. T., 1964, "Hydraulic properties of porous media", Colorado State University, Hydrology Paper No. 3, March.
6. Burdine, N. T., 1953, "Relative permeability calculation from size distribution data", *Transactions, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 198, 71 - -78.
7. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, D.A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
8. Fredlund, D. G., and Xing, A., 1994, "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521 - -532.
9. Lu, N. and Likos, W.J.(2004), *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, New York, 556p.
10. 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.
11. Mualem, Y., 1978, "Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: Generalized macroscopic approach", *Water Resources Research*, 14(2), 325 - -334.
12. 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.
13. 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.
14. 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*, 33, 379 - -392.