한국지반공학회논문집 제29권 12호 2013년 12월 pp. 77 ~ 85
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.29, No.12, December 2013 pp. 77 ~ 85

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2013.29.12.77

강우 침투로 인한 불포화 사면 붕괴의 유효응력 해석

An Effective Stress Analysis of Unsaturated Slope Failures by Rainfall Infiltration

이 영 휘[1] Lee, Young-Huy
오 세 붕[2] Oh, Se-Boong
진 인 철[3] Jin, In-Chul
김 준 우[4] Kim, Jun-Woo
박 영 목[5] Park, Yeong-Mog

Abstract

Unsaturated slopes experience infiltration during rainfall and become unstable when saturated. On the viewpoint of unsaturated effective stress, as matric suction decreases, both effective stress and shear strength decrease, which declines slope stability consequently. This study is focused on describing effective stress based on suction stress. The actual slope failures are simulated to calculate factors of safety in the field of finite element stress. In the residual soils of Hadong and Pohang, unsaturated properties are evaluated by laboratory tests. For unsaturated slopes, analyses of infiltration, stress and stability were performed to simulate actual failures. Based on unsaturated effective stress principle, the stability of actual slopes could be evaluated successfully. It is verified for the effective stress concept to be applicable to the engineering practice on slope design which considers infiltration by rainfall.

요 지

불포화 사면에서는 강우시 침투가 일어나고 포화가 됨에 따라 불안정해진다. 불포화토의 유효응력의 관점에서는, 모관흡수력이 감소하면 유효응력이 감소하고 동시에 전단강도도 감소하여 사면 안정성이 저해된다. 본 연구에서는 불포화토의 유효응력을 흡수응력으로 기술하는데 초점을 둔다. 그리고 유한요소응력장에서 안전율을 계산하여 실제 사면의 붕괴를 시뮬레이션한다. 하동 및 포항지역의 풍화토 지층에 대하여 실내실험을 수행하여 불포화 물성을 분석하였다. 그리고 불포화 사면의 침투 해석을 수행하고 응력해석과 안정해석을 통하여 실제 붕괴를 재현하였다. 따라서 불포화 유효응력 원리에 근거하여, 실제 사면의 안정성을 성공적으로 평가할 수 있었다. 유효응력 개념이 강우 침투를 고려한 사면 설계의 실무에 적용될 수 있음을 입증하였다.

Keywords : Effective stress, Suction stress, Rainfall infiltration, Slope stability, Unsaturated soils

1 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)
2 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., Tel: +82-53-810-3512, Fax: +82-53-810-4622, sebungoh@yu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 비회원, 영남대학교 건설시스템공학과 석사 (MSc, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)
4 비회원, 건일엔지니어링 사원 (Kunil Engrg.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2013 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

Terzaghi의 유효응력 가설처럼, Bishop(1954, 1959)에 의한 불포화토의 유효응력으로 불포화 지반의 공학적 문제를 설명할 수 있다. 그러나 Bishop 유효응력은 실용적으로 적용하기가 Terzaghi의 유효응력보다 매우 까다롭다. Lu와 연구자들(Lu and Likos 2006; Lu et al. 2010, Oh et al. 2012)은 흡수응력(suction stress)을 제안하여 Bishop 유효응력을 일반화하였다. 흡수응력은 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 정도를 정량적으로 표현한다. 불포화토의 전단강도는 수리적 특성과 연관이 있어서, 흡수응력은 함수특성곡선(soil water retention curve, SWRC)으로부터 구할 수 있다. Lu et al.(2010)은 흡수응력에 대한 함수를 유도하였으며, van Genuchten(1980)의 함수특성곡선을 이용하여 구할 수 있다. 이러한 유효응력을 적용하면, 불포화토의 전단강도는 포화도에 무관하게 유일하게 정의된다.

건설공사 비탈면 설계기준(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2011)에 따르면, 토층 및 풍화암으로 구성된 비탈면의 안정해석은 강우 침투를 고려한 방법을 사용하도록 하고 있다. 이러한 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건, 배수조건과 확률 계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속시간 등을 고려하여 안정해석을 실시하며, 해석시 적용한 설계정수와 해석방법을 명확히 기술하도록 하고 있다. 하지만 실무적인 적용에 있어서, 불포화 토질역학에 기반을 둔 설계정수 획득과 해석결과의 분석에 대한 사례연구가 필요한 실정이다. 또한 사면이 붕괴하는 원인을 파악하고 대책을 마련하기 위해서는 시공절차와 붕괴현황에 자료를 기록해야 한다. 하지만 여러 가지 이유로 이러한 기록들은 보전되지 못하고 있는 실정이어서, 지반공학 관례의 기술적인 개선이 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 실제 붕괴사면을 대상으로 사면설계의 관례를 개선하는 데 중점을 두고 있다.

중요도가 큰 비탈면에 대해서는 유한요소법 및 유한차분법 등의 해석기법을 적용하여 안정성을 판단한다(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2011). 불포화토의 수리-역학적 거동에 기반하여, 지층의 함수비가 변화하면 유효응력이 변화하여 안정성이 저하되는 것을 고려할 수 있다. 따라서 응력해석을 통하여 지층의 유효응력의 변동을 분석하는 절차를 포함할 필요가 있다. 본 연구에서는 유한요소 응력장에서 안전율을 계산하여 엄밀한 안정성 해석을 수행하였다. 특히 불포화토의 유효응력 이론을 실제에 적용하여 불포화 사면의 안정을 평가하는 기법에 초점을 두고 있다.

본 연구에서는 불포화 유효응력에 기반한 (1) 풍화토 지층의 실내실험 및 분석, (2) 불포화토 사면 침투 해석 (3) 실제 붕괴사례에 대한 불포화 사면안정해석으로 구성되었다.

2. 2차원 수치모델

Lu & Likos(2006)는 흡수응력 σ^s를 정의하여 유효응력을 식 (1)과 같이 일반화하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \tag{1}$$

모관흡수력$(u_a - u_w)$은 공기압(u_a)과 수압(u_w)의 차이로 정의되고, 흡수응력은 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad (u_a - u_w \le 0) \tag{2a}$$

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)\Theta \quad (u_a - u_w \ge 0) \tag{2b}$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{2c}$$

여기서, θ_s, θ_r은 포화 및 잔류 체적함수비이다. 식 (2c)에서 Θ는 유효포화도이며 체적함수비 θ를 포화시 및 잔류시 함수비로 규준화한 것이다. 간극수압이 양의 값일 때에는 흡수응력은 식 (2b)와 같이 간극수압과 동일하여 식 (1)이 Terzaghi 유효응력과 일치한다.

사면문제에서 간극공기압이 대기압인 경우, 모관흡수력은 간극수압의 -1배가 된다. 식 (2b)에서 $\sigma^s = u_w\Theta$가 되고 유효응력은 $\sigma' = \sigma - u_w\Theta$로 나타난다. 이 때 Θ는 함수특성곡선으로부터 구할 수 있다. van Genuchten(1980)은 모관흡수력과 유효포화도의 함수특성 관계를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n}\right]^m \tag{3}$$

포화토 및 불포화토의 경우 식 (1)의 유효응력으로 동일한 Mohr-Coulomb 파괴규준을 나타내며 식 (4)와 같다 (Bishop and Blight 1963, Khalili et al. 2004, Lu and Likos 2006, Nuth and Laloui 2008, Lu et al. 2010, Oh

et al. 2012, Oh et al. 2012).

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan\phi' \tag{4}$$

여기서, τ_f는 파괴시 파괴면의 전단강도, c'는 포화시 유효 점착력, σ'_f는 파괴시 파괴면의 유효수직응력, ϕ'는 포화시 유효 마찰각이다.

사면의 수리특성은 다음과 같은 Richards의 방정식으로 기술한다.

$$K(h)\left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}\right) + Q = \frac{\partial\theta(h)}{\partial t} \tag{5}$$

여기서, $K(h)$는 수리 전도도 함수, h는 압력 수두, H는 전수두, Q는 유량, $\theta(h)$는 체적함수비이며, 일반적으로 $K(h)$와 $\theta(h)$는 압력수두 h의 비선형 함수이다.

사면의 전응력은 주로 사면의 형상과 자중의 영향을 받는다. 선형 탄성 재료에서의 전응력에 대한 지배방정식은 선형 운동량의 보존법칙에서 나온다.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \frac{\gamma}{g}\boldsymbol{b} = 0 \tag{6}$$

여기서, $\boldsymbol{\sigma}$는 응력텐서, $\boldsymbol{b}$는 물체력 벡터, γ는 지층의 습윤단위중량, g는 중력가속도이다. 유효응력은 식 (6)에서 구한 전응력과 식 (5)의 해에서 구한 간극수압을 이용하여 구하고, 안정해석에 사용된다.

한계평형해석에서는 Fig. 1에서 나타난 활동원의 절편에서 양측면에 작용하는 힘의 분포를 가정하여 안전율에 오차가 포함된다(Peterson 1955, Fellenius 1936, Janbu 1954, Bishop 1955, Morgenstern and Price 1965, Spencer 1967, Sarma 1973, Duncan 1996, Krahn 2003, Duncan and Wright 2005). 반면에 유한요소해석을 통하여 응력을 계산하면 구성관계에 따라 평형을 이루도록 절편 측면에 작용하는 힘을 계산할 수 있다. 또한 시공절차에 따른 지층의 응력변화를 고려할 수도 있다(Duncan 1996, Dawson et al., 1999, Griffiths and Lane 1999, Iverson 2000; Rahardjo et al. 2001, Crosta and Frattini 2003, Casagli et al. 2005, Tsai et al. 2008, Lu et al. 2013).

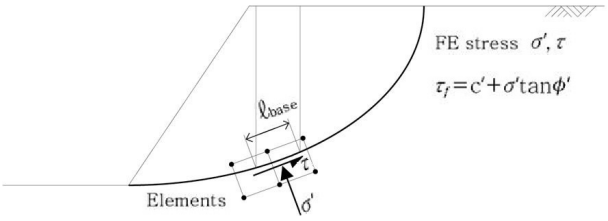


Fig. 1. Finite element stresses along the slip surface combined to limit equilibrium analysis

안전율은 활동면에 작용하는 유한요소해석시 전단응력 τ와 전단강도 (식 (4))의 합력의 비율이며, 다음과 같이 적분된다.

$$FOS = \frac{\sum_i (\tau_f\, l_{base})_i}{\sum_i (\tau\, l_{base})_i} \tag{7}$$

여기서, l_{base}는 절편 저면의 길이이며, i는 절편번호이다.

사면에서의 전응력, 모관흡수력, 흡수응력 분포로부터 유효응력을 계산하면, 사면의 안정은 불포화토의 전단강도와 유효응력 분포를 고려하여 계산할 수 있다. 해석 절차는 불포화 유동, 전응력 분포 및 안전율을 구하는 과정을 포함하며(Lu et al. 2013), GeoStudio 2007 코드의 응력해석 모듈(SIGMA/W, 2007), 침투해석 모듈(SEEP/W, 2007)과 사면안정해석 모듈(SLOPE/W, 2007)을 이용하여 수행하였다. 불포화 유동은 강우에 따른 정상류 및 부정류 해석에 의하여 수행한다. 두번째로 전응력분포는 탄성모델을 이용하여 단순하게 계산한다. 안정해석에 적용하는 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하는 것이 합리적이지만, 아직 해석코드에 불포화토 유효응력에 관한 정식화가 구현되지 않아서 적용할 수 없었다. 탄성계수는 변위에는 크게 영향을 끼치지만 전응력에는 크게 영향을 주지 않는다고 가정하였다.

불포화 유동 및 전응력에 대한 유한요소해석을 통하

Table 1. Overview of analysis procedure

Steady state infiltration	Unsteady state infiltration	Stress analysis	Slope stability
Initial pore water pressure by previous rainfall	Pore water pressure with time by rainfall	Total normal stress σ and shear strength τ by self weight $\tau_f = c' + (\sigma - u_w\Theta)\tan\phi'$	Factor of safety in the field of finite elements $FOS = \frac{\sum_i (\tau_f\, l_{base})_i}{\sum_i (\tau\, l_{base})_i}$

여 활동면에서 유효응력과 상응하는 전단강도를 구할 수 있다(Table 1 참조). GeoStudio 2007 코드에서는 응력해석 및 침투해석으로부터 구한 결과를 안정해석시 활동면에 적용할 수 있다. 특히 함수특성곡선으로부터 비선형적인 불포화 전단강도를 설정하면, 식 (2)의 흡수응력이 동일하게 적용된다. 시간에 따른 안전율 변동을 평가하기 위하여, 현장 파괴면을 고려하고 예비해석을 통하여 고정적인 활동면을 설정하였다.

3. 대상사면의 개요 및 지층 물성

대상 사면들은 도로 현장의 절토사면으로, 지층은 풍화되어 불연속면을 매우 심한 빈도로 포함하고 있고, 사면의 상부는 잔류토층을 이루고 있다. 이와 같은 지질형태는 대구경북을 중심으로 동남부 내륙에서 흔히 나타난다. 하동지역의 경우에는 화강암과 편마암을 모암으로 하는 지층으로 구성되어 있어서 풍화토층의 투수성이 양호하게 나타난다. 하동사면은 기존의 절개사면으로 2009년 7월 집중강우로 인하여 붕괴가 일어났다. 포항사면은 이암과 셰일이 풍화된 잔류토층으로 이루어져 있는데, 2010년 10월에 절개를 완료하였고 2011년 6월 붕괴하였다. Fig. 2에는 하동사면 및 포항사면의 지층분포를 보여준다.

정확도 해석 후, Fig. 2와 같이 요소망을 적절하게 세분화하였다. 부정류에 대하여, 유량 경계조건은 실제 강우기록을 지표면에 적용하였다. 사면의 경사부 표면에서는 지하수가 유출될 수 있도록 설정하였다. 측면의 수두경계는 현장 상황과 지하수위 정보(Web page, Integrated Groundwater Information Service)를 고려하여 설정하였다. 예비해석을 통하여 최소안전율을 나타내는 활동면을 파악하였으며, 현장에서 관찰된 형태와 유사하게 전반적인 활동이 일어났다.

각 사면의 강우기록은 Fig. 3에서 보여준다. 하동사면은 붕괴시 일강우량 150mm 이상의 집중강우(4개월간 누적 강우량: 1200mm 이상)가 발생하였고, 포항사면은 붕괴시 일강우량 100mm 이상의 집중강우(3개월간 누적 강우량 : 600mm 이상)가 발생하였다.

잔류토는 본질적으로 균질하게 불교란시료를 채취하기가 까다롭다. 시료의 채취위치에 따라 불균질성을 보이기도 하여 충분한 양의 시험을 수행하여야만 대표적이고 일관된 시험성과를 획득할 수 있다. 잔류토층의 붕괴단면 외곽에서 교란시료 및 블록시료를 채취하였다. 대상현장에서는 시료의 일부에서 불연속면과 암편을 포함하였고, 제원이 긴 삼축시험시료의 경우에는 균질성을 확보하기 어려웠다. 실내시험은 함수특성시험과 강도시험을 중심으로 수행하였으며, 불교란시료를 이용

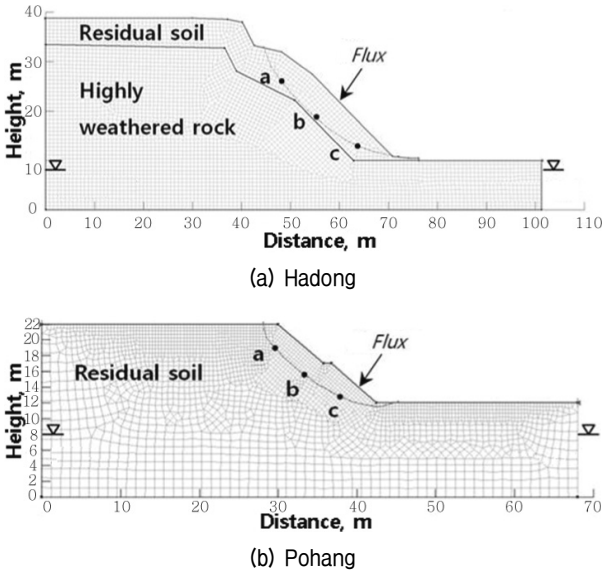


Fig. 2. Mesh for finite element analysis

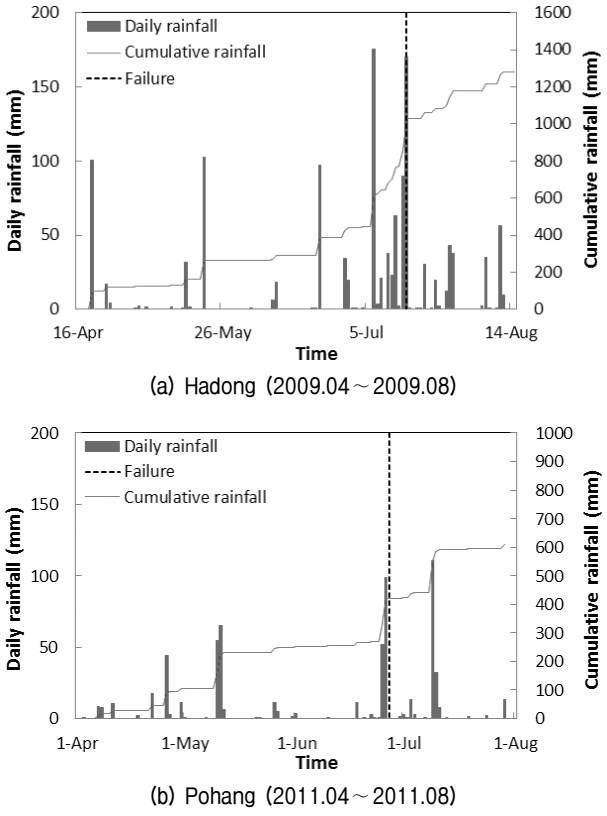


Fig. 3. Rainfall records (Web page, Korea Meteorological Administration)

하려고 노력하였지만 대부분 교란시료의 시험성과를 이용할 수밖에 없었다.

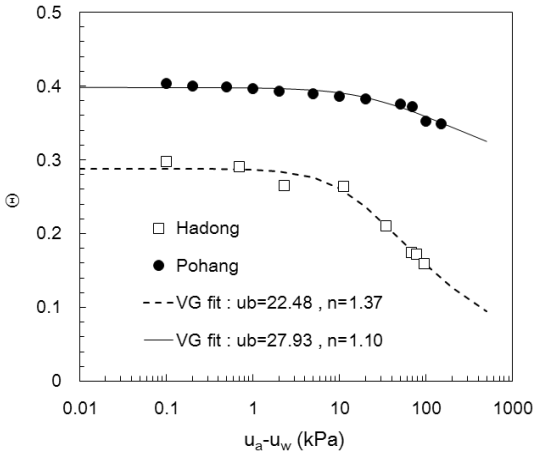
하동 및 포항지역사면에 대한 불포화 물성치를 Fig. 4에서 보여준다. Fig. 4(a)에서 보여지듯이, 압력판추출시험을 통하여 함수특성곡선을 획득하였고, RETC 프로그램을 이용하여 van Genuchten 모델로 회귀분석을 하였다(van Genuchten et al., 1991). 공기함입치 u_b와 계수 n, 포화 체적함수비, 잔류함수비는 Table 2에 정리되었다.

불교란 시료의 투수계수는 함수특성곡선으로부터 Mualem 이론에 의하여 추정하는 방법을 이용하였다. 그 결과 Fig. 4(b)와 같이 평가되었으며, 예비 해석과정에서 계수 연구를 통하여 포화투수계수를 설정하였다. 풍화암에 대하여, 함수특성곡선은 잔류토와 동일하게 가정하였다. 풍화암의 투수계수곡선은 잔류토의 투수계수와 동일하게 가정하였으며, Table 2에 정리하였다.

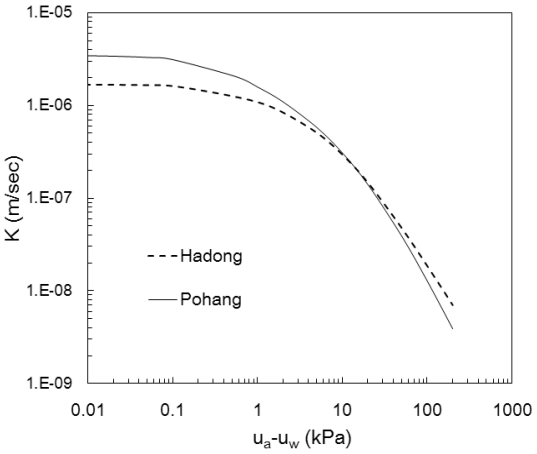
삼축시험에서는 포화조건에서 직접전단시험을 수행하였다. 불포화조건에서는 모관흡수력을 조절하여 삼축시험을 수행하였다. 시료는 현장 함수비 및 밀도 하에서 정적다짐으로 교란시료를 재성형하여 수행하였다. Fig. 4(c)에서는 흡수응력에 근거한 유효응력에 대한 삼축시험 결과를 보여준다. 이 때 p', q는 다음과 같이 정의된다.

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3'),\ q = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{8}$$

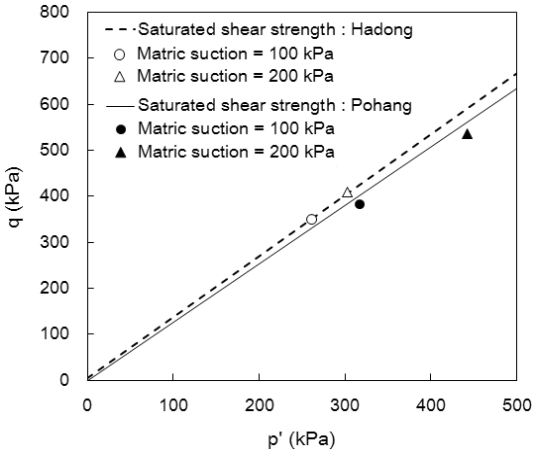
SWRC 시험으로부터 구한 전단강도가 삼축시험으로부터 구한 실험치를 합리적으로 예측할 수 있었다. 다양한 모관흡수력에 대하여 유효응력으로 기술한 전단강도는 유일한 파괴포락선위에 존재한다. 특히 포화시 파괴규준과 동일한 파괴규준으로 정의할 수 있음을 알 수 있다(Bishop and Blight 1963, Khalili et al. 2004, Lu and Likos 2006, Nuth and Laloui 2008, Lu et al. 2010, Oh et al. 2012, Oh et al. 2012). 이로부터 Fig. 4(a)에 나타난



(a) SWRC



(b) Hydraulic conductivity



(c) Shear strength

Fig. 4. Properties of unsaturated soils

Table 2. Material properties of slope layers

Layers		Stress analysis		Seepage analysis					Slope stability		
		E (kPa)	ν	θ_s	θ_r	u_b (kPa)	n	K_s (m/sec)	γ_t (kN/m^3)	c' (kPa)	Φ' ($^\circ$)
Hadong	Soil	2×10^6	0.333	0.282	0	22.48	1.37	1.68×10^{-6}	18.2	2.8	32.8
	Rock								21	50	35.5
Pohang		2×10^6	0.333	0.398	0.12	27.93	1.1	3.46×10^{-6}	18.4	0	31.6

SWRC가 식 (4)의 전단강도를 불포화 유효응력(식 (1))으로 적절하게 기술할 수 있음을 확인하였다.

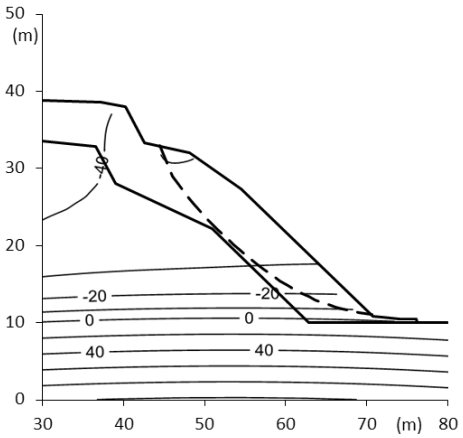
4. 강우에 따른 불포화 침투거동

선행 강우량은 대상문제에 적합하게 선정하였다. 하동사면은 사면절개 후 수년 후에 붕괴가 일어난 사례로 거의 자연사면과 같은 상태를 나타내고 있었다. 선행강우는 1년간 연평균 강우량으로 산정하였다(2.86e-8m/s, 년 902mm). 반면 포항 사면은 사면 절개 후 1년 이내에 붕괴가 일어났으며, 1개월간의 평균 강우량(5.60e-9m/s, 월 15mm)을 선행강우로 설정하였다.

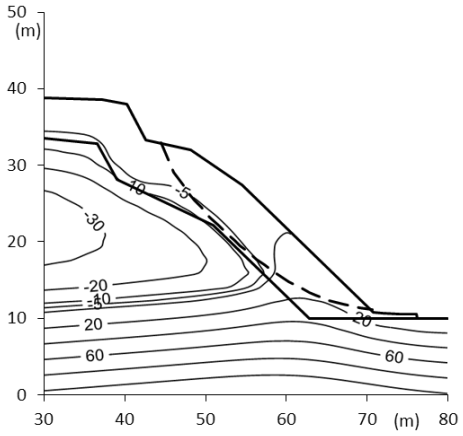
하동사면 잔류토층의 흡수응력(식 (2)) 분포는 Fig. 5와 같이 나타났다. Fig. 5(a)에서는 불포화층의 정상류 해석으로 나타난 초기 흡수응력 분포를 보여준다. 전년도 연평균 강우에 의하여, 흡수응력은 -40kPa에서 0kPa정도로 나타났으며 분포의 양상은 깊이에 따라 증가한다.

부정류 해석에서는 간극수압이 증가하여 포화도가 증가하며 지하수위가 다소 상승하였다. 사면붕괴가 일어난 2009년도 7월 16일에는 Fig. 5(b)와 같은 흡수응력 분포가 계산되었으며, 파괴면 주변에서 -5kPa 이상인 영역이 확장되고 있다.

Fig. 6에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도

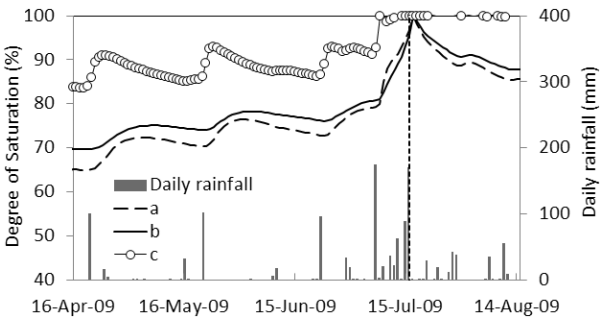


(a) April 15, 2009

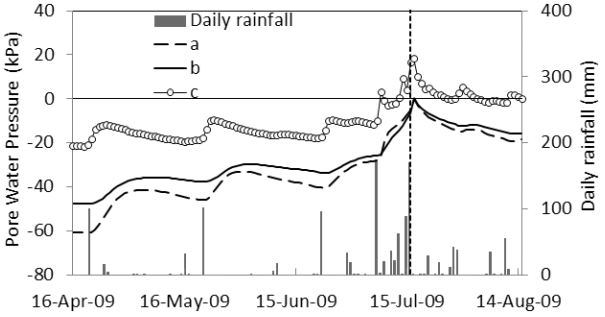


(b) July 16, 2009

Fig. 5. Suction stress (kPa) distributions as flows (Hadong)

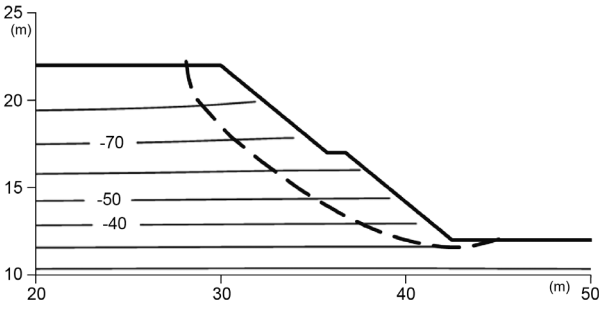


(a) Degree of saturation vs. time,

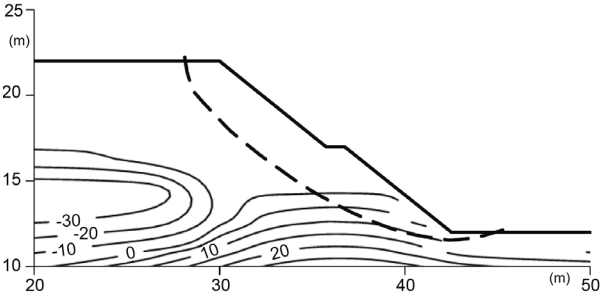


(b) Pore water pressure vs. time

Fig. 6. Wetness variables on the slip surface (Hadong)

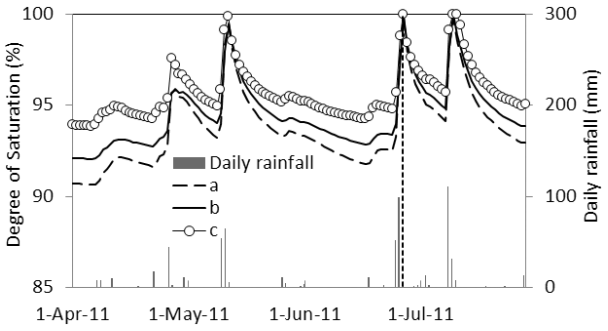


(a) March 31, 2011

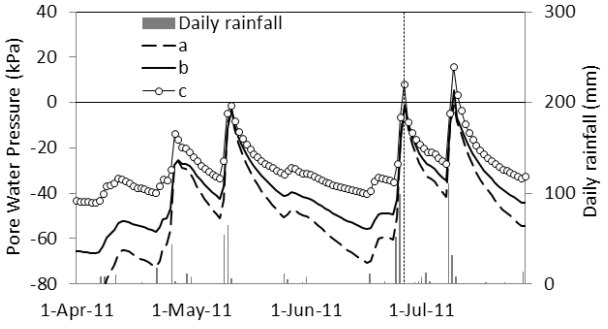


(b) June 27, 2011

Fig. 7. Suction stress (kPa) distributions as flows (Pohang)



(a) Degree of saturation vs. time



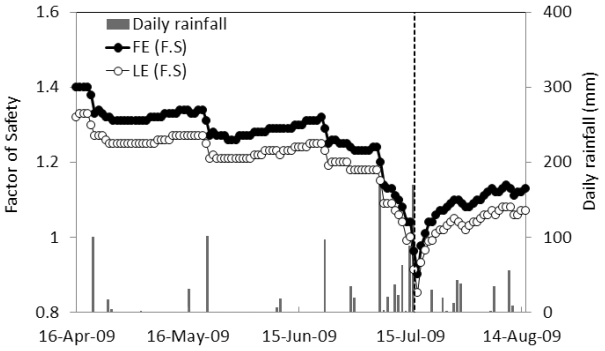
(b) Pore water pressure vs. time

Fig. 8. Wetness variables on the slip surface (Pohang)

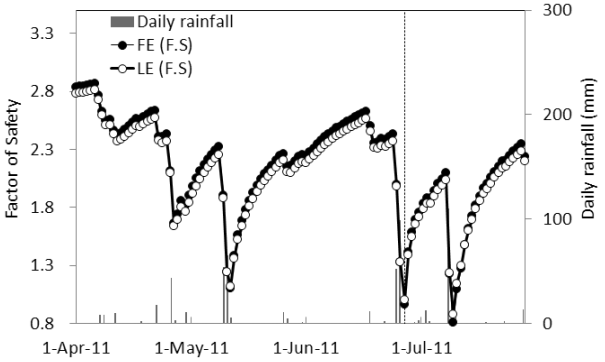
변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(Fig. 2(a))에서 65%에서 100%로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. Fig. 6(b)에서는 포화도가 증가함에 따라 간극수압도 증가하는 것을 보여주고 있다. 특히 붕괴가 일어난 2009년도 7월 16일 무렵에는 집중강우로 인하여 활동면의 하부 지점에서는 간극수압이 양의 값을 나타낸다.

포항사면 잔류토층의 흡수응력 분포는 Fig. 7과 같이 나타났다. Fig. 7(a)에서는 불포화층의 정상류 해석으로 나타난 초기 흡수응력 분포를 보여준다. 전월 월평균 강우에 의하여, 수압은 -80kPa에서 -30kPa정도로 나타났다. 부정류 해석에서는, 간극수압이 증가하여 포화도가 증가하며 지하수위가 다소 상승하였다. Fig. 7(b)의 사면붕괴 시 흡수응력은 파괴면 주변에서 -5kPa 이상인 영역이 확장되고 있다.

Fig. 8(a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 포화도의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 활동면에서 전체적으로 90%에서 100%로 증가하고 있다. Fig. 8(b)에서는 포화도가 증가함에 따라 간극수압도 -80kPa에서 0kPa 이상으로 증가하는 것을 보여주고 있다.



(a) Hadong



(b) Pohang

Fig. 9. Factor of safety for limit equilibrium method and finite element method

5. 불포화사면의 안정해석

하동사면은 여러 해 안정성에 이상이 없이 공용중이던 사면이다. 붕괴시 일강우량 150mm 이상의 집중강우가 발생하였고, 과도한 강우로 인하여 지층 내에 포화도가 증가하고 일부 영역은 완전 포화상태를 나타낸다(Fig. 5(b)). 포항사면은 붕괴시 일강우량 100mm 이상의 집중강우가 발생하였다. 이로 인하여 시공 후 일정기간 안정성에 문제가 없던 사면의 붕괴가 발생하였다.

이러한 안정성 변동을 유효응력에 기반한 불포화 안정성 해석을 통하여 분석할 수 있었다. 본 연구의 해법은 유한요소(FE) 응력장에서 절편에 작용하는 힘 분포에 대하여 안전율을 계산한다. 이러한 해법은 한계평형법(LE)에 비하여 해의 엄밀도를 높일 수 있다. Fig. 9에서는 2개 현장에 대하여 FE와 LE의 안전율을 비교하고 있다.

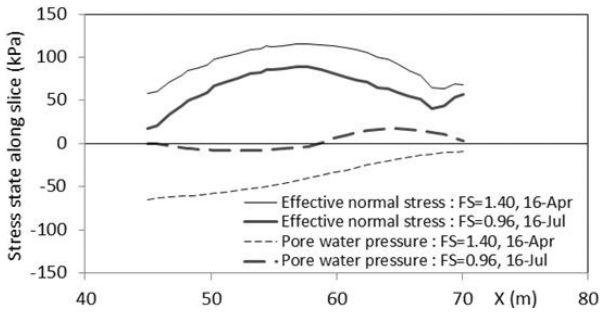
Fig. 9(a)에서는 하동사면의 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 2009년 7월, 전반적인 사면활동이 발생하였고 안전율은 1.0이하로 실제 파괴를 모의할 수 있었다. 초기에 안전율은 1.4정도지만

집중강우로 인하여 1.0이하까지 점차 감소하였다. LE 안전율이 FE의 경우에 비하여 10% 정도 낮게 나타난다.

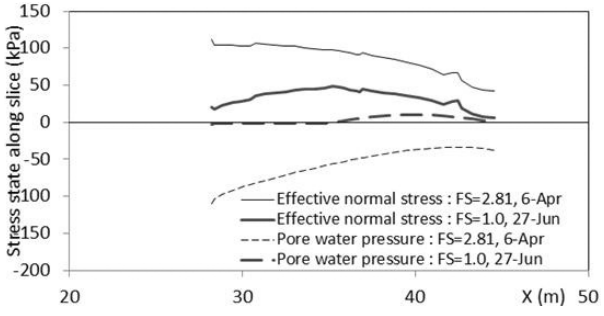
Fig. 9(b)에서는 포항사면의 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 2011년 6월, 전반적인 사면활동이 발생하였고 해석시 계산된 안전율은 1.0으로 실제 파괴를 모의할 수 있었다. 초기에 안전율은 2.8정도지만 집중강우로 인하여 1.0까지 점차 감소하였다. 포항사면의 경우에도 FE 안전율이 LE 안전율보다 다소 크게 계산되지만 유사하게 나타났다.

Fig. 10(a)에서는 하동사면의 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -60에서 -10kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 활동면 영역에서는 국부적으로 포화상태에 이룬다. 따라서 간극수압이 10~60kPa 정도 증가하였다. 간극수압의 변화량중에서 일부가 불포화 유효응력에 기여하여 전반적으로 40kPa 정도 감소하였다.

Fig. 10(b)에서는 포항사면의 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -100에서 -40kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 최대 80kPa 정도 감소하였다.



(a) Hadong



(b) Pohang

Fig. 10. Effective stress distribution along the slip surface

하동사면은 붕괴시 일강우량 150mm 이상의 집중강우가 발생하였고, 이로 인하여 일어난 붕괴 현상을 유효응력을 고려한 해석으로 예측할 수 있었다. 포항사면은 붕괴시 일강우량 100mm 이상의 집중강우가 발생하였다. 이로 인하여 시공 후 일정기간 안정성에 문제가 없던 사면의 붕괴가 발생하였으며, 침투를 고려한 유효응력해석 절차를 통하여 사면의 붕괴원인을 규명할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 하동과 포항지역 절개사면에서 일어난 실제 붕괴사례를 중심으로 불포화토의 유효응력에 기반한 사면붕괴 기구(mechanism)를 재현하였다. 대상지역에 대하여 시료를 채취하고 불포화 물성을 실험적으로 획득하였으며, 실제 강우기록을 고려하여 현장상황을 재현하여 강우 침투에 의한 사면 안정성 변동을 재현하였다. 이를 토대로, 강우시 침투를 고려한 안정 해석기법이 실용적으로 실무에 적용할 수 있음을 입증하였다. 특히 침투시 유효응력 변화가 불포화 사면의 붕괴를 일으키는 기구를 입증하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

(1) 하동사면 및 포항사면의 잔류토 사면에 대한 조사를 수행하여 현장기록 및 불포화 물성을 획득하였다. 불포화 전단강도는 함수특성으로부터 흡수응력을 산정하여 포화토와 동일한 파괴규준으로 정의할 수 있었다.

(2) 침투해석을 수행한 결과 하동사면은 4개월간 누적강우량: 1200mm 이상이 발생하였고, 과도한 강우로 인하여 지층내에 포화도와 간극수압이 증가하여 붕괴시에는 일부 영역은 완전 포화상태를 나타냈다. 포항사면은 3개월간 누적 강우량: 600mm 이상이 발생하여 포화도가 증가하는 것을 해석할 수 있었다.

(3) 불포화토 유효응력에 기반하여 전단강도를 산정하고 유한요소응력장에서 유효응력을 계산하여 안전율을 산정하였다. 하동사면과 포항사면에서 붕괴시 안전율 1.0을 계산할 수 있었고, 한계평형법에 비하여 엄밀한 해석을 수행하였다. 이로부터 강우 침투시 불포화토의 유효응력에 따른 사면의 안정성 해석기법을 검증할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원(과제번호 : 11지역기술혁신D04) 및 한국연구재단(2012R1A1A2001001)의 성과로서 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Integrated Groundwater Information Service, www.gims.go.kr (In Korean) 국가지하수정보센터 홈페이지, www.gims.go.kr
2. Daily rainfall record data, Korea Meteorological Administration, www.kma.go.kr/weather/observation/past_table.jsp?stn=108&yy=2013&obs=21&x=7&y=14 (In Korean) 기상청 홈페이지, 지상관측자료, www.kma.go.kr/weather/observation/past_table.jsp?stn=108&yy=2013&obs=21&x=7&y=14
3. Korea Infrastructure Safety Corporation (2011), Design guide on engineered slopes. (In Korean) 한국시설안전관리공단 (2011), 건설공사 비탈면 설계기준(안).
4. Bishop, A. W. (1954), "The use of pore water coefficients in practice", *Géotechnique*, 4(4), pp.148-152.
5. Bishop, A. W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Oslo, Norway, 106(39), pp. 859-863.
6. Casagli, N., Dapporto, S., Ibsen, M., Tofani, V., and Vannocci, P. (2005), Analysis of the landslide.
7. Crosta, G.B. and Frattini, P. (2003), Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. Natural Hazards and Earth System Sciences 3, 81-93.
8. Dawson, E.M., Roth, W.H., and Drescher, A. (1999), "Slope stability analysis by strength reduction", *Geotechnique* 49(6), 835-840.
9. Duncan, J.M. and Wright, S.G. (2005), "Soil Strength and Slope Stability", *John Wiley & Sons Inc*, N.J., p.309.
10. Fellenius, W. (1936), "Calculation of the stability of earth dams." Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, D.C., 4, pp.445-463.
11. GEO-SLOPE (2007a), Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2007, *GEO-SLOPE International Ltd*, Canada.
12. GEO-SLOPE (2007b), Seepage Modeling with SEEP/W 2007, *GEO-SLOPE International Ltd*, Canada.
13. GEO-SLOPE (2007c), Stability Modeling with SLOPE/W 2007, *GEO-SLOPE International Ltd*, Canada.
14. Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999), "Slope stability analysis by finite elements", *Geotechnique* 49(3), 387-403.
15. Iverson, R.M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration", *Water Resources Research* 36(7), 1897-1910.
16. Janbu, N. (1954), "Applications of composite slip surfaces for stability analysis", *Proceedings of the European Conference on the Stability of Earth Slopes*, Stockholm, 3, pp.39-43.
17. Lu, N. and Likos, W. J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), pp.131-142.
18. Lu, N., Godt, J., and Wu, D. T. (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, Vol.46, doi:10.1029/2009WR008646, 1-14.
19. Lu, N., Kaya, M., Collins, B.D., and Godt, J.W. (2013), "Hysteresis of hydromechanical properties of a silty soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), pp.507-510.
20. Lu, N., Wayllace, A., and Oh, S. (2013), "Infiltration-induced seasonally reactivated instability of a highway embankment near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA", *Engineering Geology,* 162, pp.22-32.
21. Oh, S., Lu, N., Kim, Y. K., Lee, S. J., and Lee, S. R. (2012), "Relation between the soil water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from tests on residual soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(1), pp.47-57.
22. Oh, S., Lu, N., Kim, T.-K., and Lee, Y. H. (2012), "Experimental Validation of Suction Stress Characteristic Curve from Nonfailure Triaxial K_0 Consolidation Tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(9), pp.1490-1503.
23. van Genuchten, M. T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp.892-898.
24. van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991), The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, EPA 600/2-91/065.

Received : October 8th, 2013
Revised : November 11th, 2013
Accepted : November 28th, 2013