

강우특성을 고려한 불포화 잔적토 비탈면의 붕괴사례 연구

Case Study on the Instability of the Slopes in Unsaturated Residual Soils Considering the Rainfall Characteristics

남 삼 현¹⁾ · 이 영 휘[†] · 오 세 봉²⁾

Samheon Nam · Younghuy Lee · Seboong Oh

Received: September 29th, 2014; Revised: October 14th, 2014; Accepted: November 3rd, 2014

ABSTRACT : This study has obtained Soil Water Retention Curve (SWRC) of the unsaturated soil from the volumetric pressure plate extractor test and the triaxial compression tests was also conducted. By using the rainfall data measured in the site the seepage analysis of unsteady flow was performed with the program of SEEP/W in Geostudio 2007 and stability of the slope was analyzed with SLOPE/W program. Results of analyses show that shear strength of the unsaturated soil increases with the increase of matric suction. And it was also found that the net volumetric stress and the apparent cohesion increased with the matric suction. The seepage analysis of rainfall represents that the increasing rate of negative pore pressure at the zone of large negative pore pressure is appeared to be high even though lower rainfall intensity, but this tendency declines with ground depth. The stability analysis of slope was carried out for the actual plane of failure with the data representing the field condition. The factor of safety thus calculated was about unity (1.0) or just below, which means that the adopted method of analysis is in good agreement with the field condition.

Keywords : Unsaturated soil, Matric suction, Suction stress, Seepage analysis of rainfall, Slope stability, Residual soil

요 지 : 본 연구에서는 불포화토에 대한 압력판 추출시험을 수행하여 함수특성곡선을 구하고 불포화토의 삼축압축시험을 실시한 후, Geostudio 2007의 SEEP/W 해석 프로그램을 이용하여 부정류 침투해석을 수행하였으며, SLOPE/W 해석프로그램으로 비탈면 안정성을 검토하였다. 그 결과 모관흡수력 증가에 따라 순체적응력과 축차응력이 증가하고 겔보기점착력도 선형적으로 증가함으로써 전단강도가 증가함을 알 수 있었다. 강우침투해석 결과 높은 음의 간극수압에서는 적은 강우량에도 간극수압의 증가폭이 크게 나타났고, 일정깊이 이하의 심도에서 지하수위의 상승을 제외하면 강우의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 비탈면의 파괴양상과 동일한 단면으로 파괴면을 일정하게 고정시켜 안정 해석한 결과 실제로 비탈면 파괴 시에 안전율이 1.0 이하로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 불포화토, 모관흡수력, 흡수응력, 강우침투해석, 비탈면 안정성, 잔적토

1. 서 론

지반의 불포화영역에서는 토립자와 간극사이에서 물과 공기의 접면이 발생한다. 이 접면에서 압력 차이에 의한 표면장력으로 모세관 현상이 일어난다. 또한 흙 입자 둘레에서는 물 분자를 결합하는 표면력이 흡착현상을 일으킨다. 이때 발생하는 음의 간극수압이 불포화토의 유효응력을 변화시키며 수리특성에 중요한 영향을 끼친다.

비탈면 안정해석에서 통상적으로 지하수위를 지표면까지 상승시켜 완전포화 비탈면 조건으로 안전율을 산정하고 있으나, 실제 강우 시에는 비탈면의 표면과 일정깊이 이하의 범위를 제외하고는 불포화 조건에 더 가깝다. 건설공사

비탈면 설계기준(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2011)에 따르면 토층 및 풍화암으로 구성된 비탈면의 안정해석은 강우 침투를 고려한 방법을 사용하도록 하고 있다.

이에 경북 포항시 동해면 약전지역에서 퇴적암을 기반으로 하는 풍화 잔적토를 대상으로 사례해석을 수행하였다. 먼저 불포화토의 기본물성 획득을 위한 실내시험 및 분석을 하고 함수특성시험과 불포화 삼축압축시험을 수행하여 불포화토의 거동특성을 연구하였다. 또 실제 붕괴된 비탈면을 대상으로 침투해석과 안정해석을 수행하여 풍화 잔적토에 대하여 강우특성을 고려한 비탈면의 안정성을 검토하였다.

1) Kunhwa Eng. Co. Ltd.

† Department of Civil Engineering, Yeungnam University (Corresponding Author : younghuy@yu.ac.kr)

2) Department of Civil Engineering, Yeungnam University

2. 이론적 고찰

불포화토의 흙 입자 사이에 물이 존재할 경우 물 내부의 액체분자에는 인력과 척력이 평형상태에 있기 때문에 분자력은 0이다. 물과 공기의 접면에 형성되는 수축막에서는 간극공기압 u_a 와 간극수압 u_w 가 동시에 작용하게 되며 두 압력의 차 $u_a - u_w$ 를 모관흡수력이라 한다. 포화 함수비 상태에서 모관흡수력이 어느 한계까지 증가하면 간극수가 유출되기 시작하면서 간극 속으로 공기가 유입되는데, 이때의 모관흡수력을 공기 함입치라고 한다. 모관흡수력이 증가하면서 불포화토는 건조되며 어느 한계에서 더 이상 간극수가 유출되지 않는데, 이를 잔류함수비라고 한다. 흙 속의 물의 양과 모관흡수력의 관계를 나타내는 곡선을 함수특성곡선이라 하며, 본 연구에서는 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선식을 적용하였다.

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

여기서 α : 공기 함입치와 관련한 계수
 n : 간극 크기 분포와 관련한 계수
 $m = 1 - 1/n$

Θ 는 유효포화도로서 임의의 체적함수비 θ 를 포화체적함수비 θ_s 와 잔류체적함수비 θ_r 로 표준화한 것이다.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

불포화토에서는 간극 속의 물이 연결되어 있는 유로를 통해서만 흐름이 발생하므로 투수계수는 체적함수비 θ 나 모관흡수력의 함수로 표현된다. 투수계수 k_w 는 불포화토의 중요한 수리특성 중 하나이며, Mualem(1976)에 의하면, 함

수특성곡선의 관계로부터 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} f(\Theta)^2 / f(1)^2 \quad (3a)$$

$$f(\Theta) = \alpha \{1 - (1 - \Theta^{1/m})\}^m \quad (3b)$$

Bishop & Blight(1963)는 불포화토의 한 요소에 작용하는 수직응력과 전단응력을 Fig. 1과 같이 표시하고, 유효응력을 Eq. (4)와 같이 제시하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

Bishop의 유효응력 개념에서 유효응력계수 χ 는 모관흡수력에 따른 유효응력의 변화율로서 모관흡수력이나 체적함수비, 포화도의 함수로 나타낼 수 있다. 하지만 실험적으로 구하기 어렵고 모관흡수력이 매우 큰 경우에는 실제와 달리 항상 0이 되도록 정의하고 있다. 이에 Lu & Likos(2006)는 $\chi(u_a - u_w)$ 를 모관흡수력 $(u_a - u_w)$ 에 관련된 흡수응력 σ^s 로 정의하고, 유효응력과 흡수응력을 다음과 같이 일반화하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (5)$$

$$\sigma^s = \chi(u_a - u_w) \quad (6)$$

불포화토에서 순수직응력 $(\sigma - u_a)$ 는 흙 입자와 공기의 접촉면에 작용하는 응력성분이고, 모관흡수력 $(u_a - u_w)$ 는 물과 공기의 접촉면에 작용하는 성분이다. 이들은 모두 입자간 구속효과를 높이는데 기여하는 성분이며, 불포화 상태에서는 간극수압이 음(-)으로 작용하여 유효응력을 증가시키는 역할을 한다. 순수직 응력과 모관흡수력을 독립적인 응력 변수로 정의하면, 불포화토의 전단강도를 Mohr-Coulomb 파괴규준에 따라 Eq. (7)과 같이 정의할 수 있다(Fredlund et al., 1978).

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (7)$$

여기서 $(\sigma_f - u_a)$: 파괴 시 순수직 응력
 $(u_a - u_w)_f$: 파괴 시 모관흡수력
 ϕ^b : 모관흡수력에 따른 전단강도 증가비율을 나타내는 함수마찰각

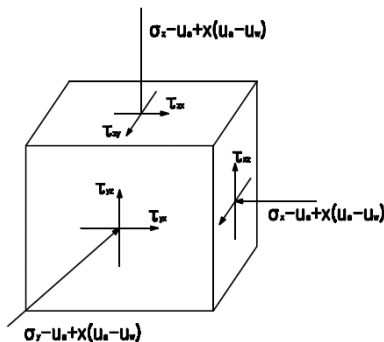


Fig. 1. Effective stress of unsaturated soils

위 식에서 포화도가 증가하여 포화상태가 되면 간극 내 공기부분은 간극수로 채워지고, 간극공기압 u_a 는 0이 되어 간극수압 u_w 로 대체된다. 따라서 포화 시에 Eq. (7)은 Terzaghi 유효응력의 원리에 따른 Mohr-Coulomb 파괴규준과 일치한다. 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력 \bar{c} 와 불포화도의 전단강도는 다음과 같이 표시된다.

$$\bar{c} = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (8)$$

$$\tau_{ff} = \bar{c} + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (9)$$

따라서 모관흡수력이 증가하면 겉보기 점착력도 증가하게 되고, 겉보기 점착력이나 순수식 응력이 증가하면 전단강도도 증가하게 된다. Vanapalli et al.(1996)은 함수특성곡선으로부터 시료의 잔류체적함수비를 구하여 불포화 전단강도를 구하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\tan \phi' \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (10)$$

Eq. (10)으로부터 모관흡수력의 증가에 따른 전단강도의 비선형적 증가를 고려할 수 있으며, 체적함수비는 시료의 함수특성곡선으로부터 얻을 수 있다. 따라서 함수특성곡선과 포화상태의 강도정수 c' , ϕ' 를 알면, 불포화도의 전단강도를 쉽게 구할 수 있다.

Lu et al.(2010)은 흡수응력을 열역학적 평형에 근거하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \Theta \quad (11)$$

흡수응력 σ^s 는 다음과 같이 모관흡수력의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^{1-1/n} \quad (12)$$

Lu et al.(2010)은 흡수응력과 함수특성곡선과의 관계를 규명하고, 모관흡수력에 따른 흡수응력 관계를 흡수응력특성곡선(Suction Stress Characteristic Curve, SSCC)으로 정의하였다. 함수특성곡선을 모관흡수력에 대한 모델로 정의하면 흡수응력특성곡선도 모관흡수력에 대한 유일한 함수로 나타나므로 흡수응력특성곡선도 유일하게 정의할 수 있으며, 유효응력도 흡수응력특성곡선에 의해 정의할 수 있다. 따라서 흡수응력특성곡선은 모관흡수력에 따른 전단강도나 함수특성곡선으로부터 쉽게 구할 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 모관흡수력에 따른 불포화도의 파괴규준이 서로 평행한 것으로 알려져 있으므로, 이 파괴포락선을 축차응력 q 가 0인 상태까지 연장하여 파괴 시의 등방인장응력을 구하고 포화도의 파괴 시 등방인장응력 값만큼 축 이동한 것이 흡수응력이고, 모관흡수력에 따른 유일한 관계로 나타나는 곡선이 흡수응력특성곡선이다.

흡수응력 σ^s 는 삼축압축시험 결과로부터 Eq. (13)과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma^s = \frac{d + M(p - u_a)_f - q_f}{M} \quad (13)$$

Oh et al.(2012)은 국내 풍화토를 대상으로 흡수응력 특성곡선을 구하고, 파괴규준이 유효응력에 의거하여 포화토 규준으로 유일하게 정의됨을 확인하였다. 또 전단강도로부터 구한 흡수응력특성곡선과 함수특성곡선으로부터 구한 흡수응력특성곡선이 일치함을 확인하였다. 특히 실제 거동에서 유효응력에 의한 파괴규준이 모관흡수력에 상관없이 포화토 규준과 동일하고 유일하게 정의되므로 불포화지만 문제를 포화토와 동일한 이론과 해법으로 해결하는 것이 가능함을 증명하였다.

3. 불포화토의 실내시험

본 연구에 사용된 시료의 물리적 특성을 파악하기 위한 실내시험을 하였다. 시료의 대표성과 균질성을 확보하기 위

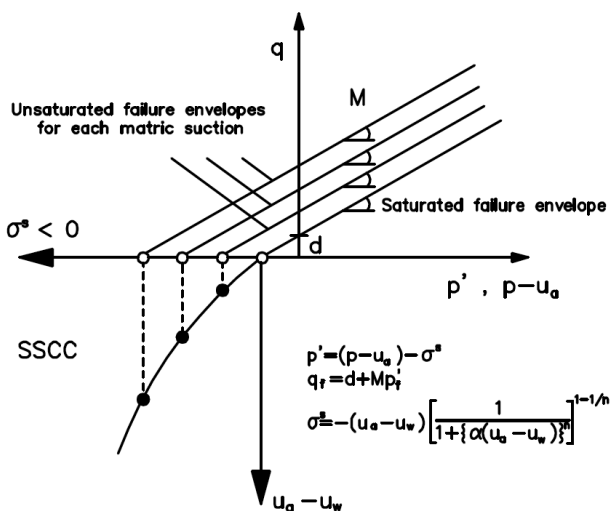


Fig. 2. Suction stress characteristic curve from failure criteria of Mohr-Coulomb at p - q phase (Oh et al., 2012)

해 교란시료는 붕괴된 비탈면 내에서 잔류토를 채취하였고, 불교란 시료의 경우 비탈면 외곽에서 불교란 시료채취기로 채취하였다. 입도분석은 세립분이 많은 것을 감안하여 시료를 물로 씻은 후 조립분 시료는 체분석시험, 세립분 시료는 비중계시험을 실시하였다. 또 현장들밀도 시험을 실시하여 습윤밀도와 건조밀도를 구하고 시료의 자연함수비를 구하였다.

직접전단시험(Direct shear test)은 전단상자의 단면적 3,571 mm², 두께 24mm의 시료에 대하여, 전단속도 1mm/min의 변형률 제어방식으로, 수직하중 50, 100, 150kPa을 재하하면서 각각 교란시료와 불교란 시료를 포화 상태에서 시험하였다.

포화시료에 대하여, 75µm체 통과량 50% 이상의 세립토이고 통일분류법에 의한 MH에 해당되어 변수위 투수시험을 수행하였다. 현장에서 채취한 시료를 24시간 노 건조시킨 다음, 자연함수비 조건으로 원통 용기 안에 넣고 균등하게 다짐용으로 다져 현장밀도에 맞게 재 성형한 후, 세립분 시료임을 감안하여 48시간 수조에 수침하였다. 또 흙 속에 있는 잔류 공기를 물속으로 확산시켜 완전히 포화시키기 위해 진공도 100kPa 정도의 진공펌프를 이용하여 수침감압방식으로 포화시켰다. 이 때 토립자가 유실되지 않도록 눈금 75µm의 황동제 망을 위아래에 놓고 시료용기의 뚜껑과 밀판 이음부에 그리이스를 바른 뒤 꼭 조여 물이 새지 않도록 하였다.

함수특성시험은 셀 밀판에 공기함입 저항치가 높은 다공판을 설치하고 그 위에 포화된 시료를 올려놓은 뒤, 셀 내부에 공기압을 가하여 압력 크기에 따라 시료에서 추출되는 물의 양을 측정하여 음(-)의 간극수압을 측정하는 방법인 압력판 추출시험기를 이용하여 수행하였다. 압력판 추출시험기의 구조는 크게 익스트랙터, 에어트랩, 발라스트 튜브, 뷰렛으로 구성되어 있는데 익스트랙터는 실린더 형태의 셀로서 셀 내부에 공기압을 주입할 수 있도록 레귤레이터와 연결되어 있고, 밀판에는 세라믹디스크가 있어 공기압에 따라 시료 내의 물이 밖으로 배출될 수 있도록 한 장치이다.

불포화토의 체적함수비 및 모관흡수력에 따른 강도 변화를 측정하기 위해 일반 삼축압축시험기를 불포화토의 시험 조건에 맞도록 개량하였다. 시험 장비는 일본 SEIKEN사에서 제작한 DTC-367L 모델의 자동화 진동 삼축압축 시험기로서 압력셀, 축하중 가압장치, 체적변화 측정장치 등으로 구성되어 있다. 개량된 압력셀 하부 좌대에는 공기가 통과할 수 없도록 높은 공기 함입치를 갖는 6.35mm 두께의 500kPa 용 세라믹디스크를 포화시켜서 설치하고 상부 캡은 다공판을 사용하였다. 가압장치로 사용되는 상부 배수라인은 레귤레이터로 조절하면서 공기압을 가할 수 있도록 되어 있고,

하부 배수라인으로는 압밀 및 전단 시 시료내부에서 배수되는 간극수를 배출한다. 시료 내에 공기압과 간극수압을 유입시켜 시료가 일정한 포화도에 이르게 한 뒤 시료가 평형 상태에 도달하면, 변형률을 제어하면서 각종 측정장치를 사용하여 전단시험을 하였다.

4. 불포화토의 시험결과 분석

기본물성시험 결과 75µm체 통과량이 62.24%의 소성이 큰 모래질 실트로서, 배수성이 불량하며 균등계수가 크고 곡률계수가 0.69로 입도가 불량하다. 건조밀도는 14.2kN/m³이고 통일분류법에 따르면 MH이다.

직접전단시험 결과 교란시료의 점착력과 내부마찰 각은 12.1kPa, 27.5°이고 불교란시료는 각각 15.9kPa, 29.8°이었다. 포화토의 토질정수를 비교해 보면 점착 력의 경우 교란 시료보다 불교란 시료가 더 크고, 내부마찰각의 경우도 교란시료보다 불교란 시료가 크게 나타났다.

불포화토의 투수계수는 van Genuchten 모델에 의한 SWRC를 이용한 투수함수식(VG 모델)을 토대로 상대투수계수를 예측할 수 있다(VGM모델). 그러나 VGM모델은 모관흡수력이 매우 낮은 포화상태에서는 상대 수리전도도 k_r 값이 급격하게 감소하므로 모관흡수력의 전반적인 범위에서 수리전도도를 크게 과소평가하는 경향이 나타난다. 또 포화상태 부근에서는 수리전도도가 급격히 변화하므로 수치적인 불안정성을 일으켜 해가 수렴하지 않거나 불규칙적인 진동이 일어난다. 이를 보완하기 위해 VGM모델을 이용하여 수정 투수계수를 산정하였다(수정VGM모델). 수정VGM모델은 모관흡수력이 낮을 때 수정곡선이 서서히 변화하고 포화상태에서는 1의 값을 유지하고 있으므로 수치적인 안정성을 개선할 수 있다(Lee et al., 2013).

Fig. 3은 약전비탈면의 수정VGM모델을 나타낸 투수계

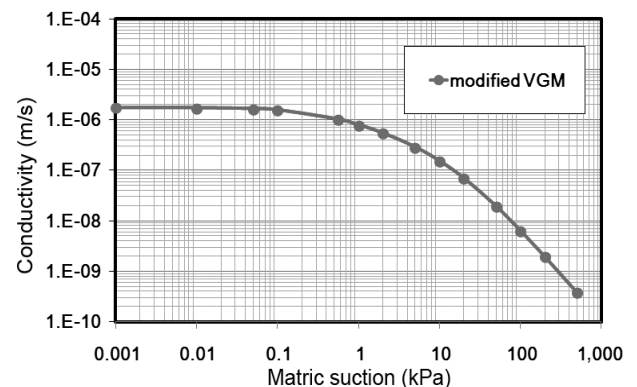


Fig. 3. Permeability curves

수곡선이다. 비탈면 침투해석에 적용한 수정투수계수는 불포화토의 경우 $1.73 \times 10^{-6} \text{m/s}$, 암반층의 경우 $1.00 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 이다. 교란시료의 습윤과정에서의 함수특성시험 결과 Fig. 4와 같다.

압력판 추출시험으로 함수특성곡선을 구한 뒤 RETC 프로그램을 이용하여 van Genuchten 모델로 회귀분석하여 맞출변수를 구하였다. 자연상태에서 흙 입자 표면에 결합되어 있는 흡착수의 모관흡수력 한계가 3,100kPa임을 감안하면 SWRC에서의 잔류체적함수비 θ_r 은 약 30%임을 알 수 있다.

모관흡수력-체적함수비 관계식에서의 곡선맞출변수는 포화체적함수비 θ_s 는 39.96%, 공기함입치 u_b 는 1.873kPa, 곡선맞출변수 α 는 0.534, 간극크기 분포계수 n 은 1.041이다. 습윤과정에서 얻은 시험성결과를 비탈면 침투해석에 적용하였다.

불포화토에 대한 압밀배수시험은 구속압 100kPa의 등방압밀상태에서 여러 수준의 모관흡수력에 대한 다단계시험을 수행하여 파괴조건의 응력 값을 구하고 Table 1에 요약하였다.

Fig. 5는 모관흡수력 증가에 따른 겔보기점착력을 나타낸 것으로서, 직선의 기울기인 흡수마찰각은 일반적으로 모관흡수력이 증가함에 따라 증가율이 감소하고 낮은 모관흡수력 범위에서는 상수로 가정할 수 있다고 알려져 있으나, 본 시험에서는 300kPa 이하의 모관흡수력에서 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

불포화토의 삼축압축시험 결과와 함수특성곡선으로부터

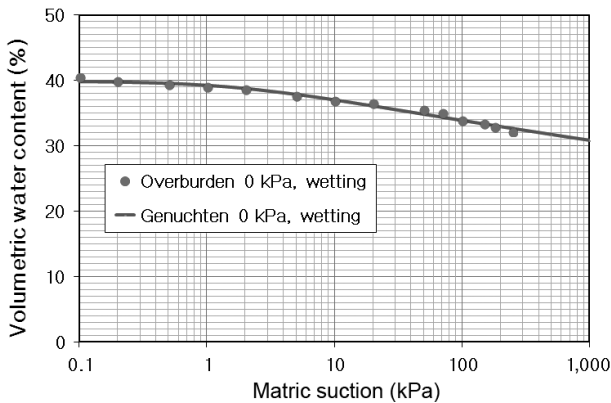


Fig. 4. Soil-water retention curve of wet process at disturbed samples

Table 1. Results of triaxial test at isotropic consolidated state

Matric suction (kPa)	Net volumetric stress (kPa)	Deviatoric stress (kPa)
100	176.1	236.5
200	229.1	381.1
300	271.5	536.0

추정한 흡수응력특성곡선을 비교하면 Fig. 6과 같다. 모관흡수력 200kPa에서 시험 값이 특성곡선 값보다 25% 정도 높고, 100kPa에서는 거의 유사한 것으로 나타났는데 75 μm 체 통과율 50%의 세립토에서 삼축시험 결과와 함수특성곡선으로 부터 추정한 흡수응력특성곡선 값이 100kPa 부근에서 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 함수특성곡선으로 추정한 흡수응력으로부터 구한 유효체적응력과 축차응력 관계이다.

$(p - u_a) - q$ 면에서 파괴규준의 기울기를 M이라 하고 포

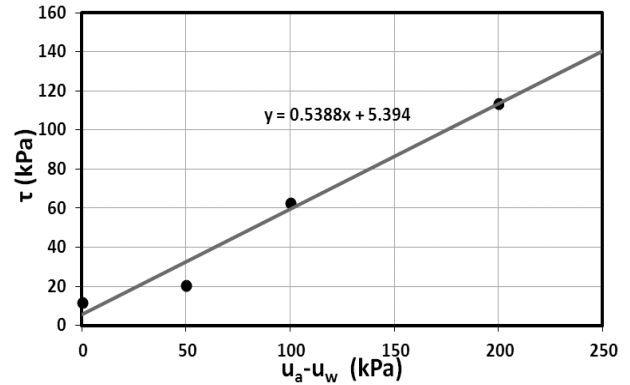


Fig. 5. Apparent adhesion from matric suction of unsaturated soil

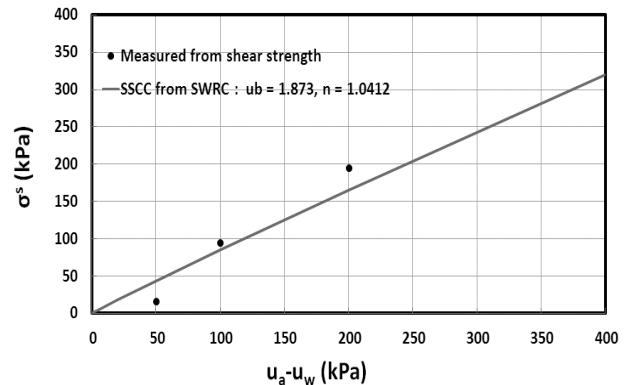


Fig. 6. Results of suction stress characteristic curve and triaxial test estimated from SWRC

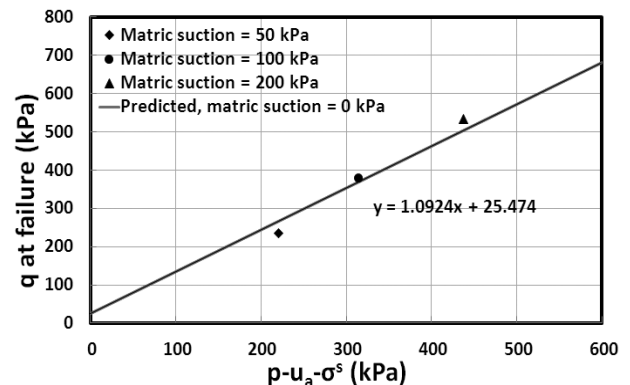


Fig. 7. Effective volumetric stress from suction stress in SWRC vs. deviatoric stress

Table 2. Strength parameters of unsaturated soil

c' (kPa)	ϕ' (°)	M	d (kPa)	ϕ^b (°)
12.1	27.5	1.09	25.4	28.3

화 시의 절편을 d 라고 하면, Table 2와 같이 강도 정수를 요약할 수 있다. 여기서 c' 는 포화토의 유효점착력, ϕ' 는 포화토의 유효내부마찰각, ϕ^b 는 불포화토의 흡수마찰각이다

불포화토에서 흡속의 체적함수비가 감소하면 모관흡수력이 증가되므로 이에 따른 전단강도도 흡수마찰각에 상응하는 값만큼 증가됨을 알 수 있다.

5. 비탈면 침투해석

비탈면의 불포화 침투해석을 하기 위해서는 각 토층에 대한 함수특성곡선과 투수계수, 강우에 대한 자료가 필요하다. 초기포화도 해석 시에는 초기조건으로 각 요소의 포화도를 설정하는 것이 가능하나, 실제포화도를 각 요소별로 자연스럽게 설정하기 어려우므로, 비탈면 모델에 적합한 수위조건을 가정하고 정상류 침투해석을 하여 초기포화도로 설정하는 경우가 많다.

약전비탈면은 2010년 6월부터 10월 말까지 절취 작업을 완료한 이후, 비탈면 보호공을 하지 않은 상태에서 약 7개월 경과한 뒤, 2011년 6월 24일~26일 사이에 내린 231mm의 강우영향으로 2011년 6월 27일에 파괴가 발생하였다. 비탈면 파괴는 비교적 완만한 경사지를 높이 10m 정도 절취한 곳에서 발생하였는데, 파괴 전에도 지중으로 침투한 우수가 강우 후에 절취비탈면으로 유출되는 현상이 자주 관찰되었다.

비탈면의 절취높이는 약 10m, 경사는 1:1.0이고 지반의 토질정수는 점착력 12.1kPa, 내부마찰각 27.5°의 소성이 큰 모래질 실트이다. 강우침투에 있어, 상부비탈면의 경우에는 수목의 영향으로 유출이 발생하지 않고 모두 침투하는 것으로 보고, 절취비탈면에서만 유출 또는 침투가 발생하는 것으로 설정하였다. 또 지하수위는 좌측은 비탈면 상단에서 20m 아래로, 우측은 지표면에서 12m 아래로 경사면을 따라 흐르는 것으로 설정하였다. 횡단면도를 바탕으로 작성한 해석단면의 요소망은 Fig. 8과 같다.

정상류 해석기간은 2011년 3월 1일부터 3월 31일까지의 1개월로, 누계 강우량은 16.5mm이고 강우강도는 6.16×10^{-9} m/s이다. 초기 강우량이 적을 경우 부정류 해석에 영향을 미치는 것을 감안하여, 부정류 해석기간은 사면파괴 전 90일, 파괴 후 30일을 기준으로 2011년 4월 1일부터 7월 29일

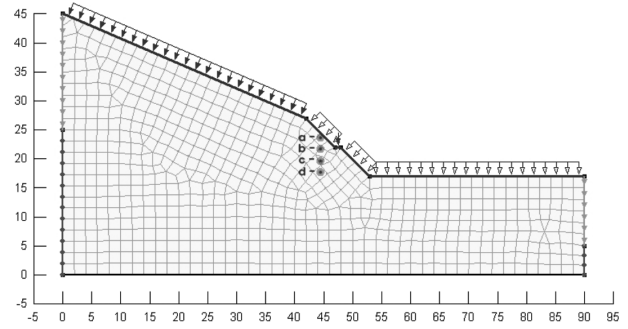


Fig. 8. Numerical elements mesh of Yakjun slopes

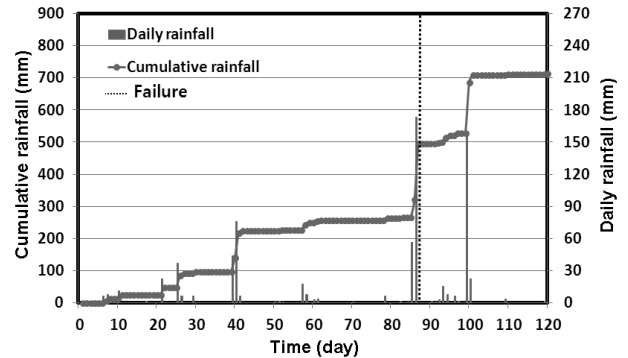


Fig. 9. Rainfall status of unsteady flow analysis period

까지의 120일간으로 하였으며, 이 기간 동안의 누계강우량은 714.5mm이고, 강우현황은 Fig. 9와 같다.

침투해석은 Geostudio 2007(Geo-slope사) 프로그램을 이용하여 수행하였다. 해석에 사용된 토사 층에 대하여 압력판 추출시험으로 구한 함수특성곡선과 RETC프로그램으로 구한 곡선맞춤변수를 적용하였다.

잔류체적함수비는 압력판 추출시험에서의 모관흡수력시험 범위를 벗어나므로 잔류함수비를 0으로 설정하여 구한 van Genuchten 함수특성곡선으로부터 모관흡수력 3,000kPa에 해당하는 값인 29.5%를 적용하였다. 투수계수는 van Genuchten 함수특성곡선으로부터 Mualem투수함수식에 의해 추정하는 방법으로 구한 투수계수를 예비해석 과정에서 계수연구를 통하여 산정한 값을 적용하였고 암반층의 투수계수는 $k = 1.0 \times 10^{-7}$ m/s를 적용하였다. 강우침투에 있어서 상부 비탈면의 경우에는 수목의 영향으로 유출이 발생하지 않고 모두 침투하는 것으로 보고, 절취비탈면에서만 유출 또는 침투가 발생하는 것으로 설정하였다. 지하수위는 경사진 지표면의 절토부 하단면에서 지하수가 침출되는 것이 확인되어 지하수위 0으로 설정하고 좌측은 비탈면 상단에서 20m 아래로, 우측은 지표면에서 12m 아래로 경사면을 따라 설정하였다. 또 해석을 위한 관찰점은 첫 번째 소단과 절취면 끝의 중간 지점에서 0.5m 아래의 점 a와 2m 깊이 간격으로 b, c, d점을 선정하였다.

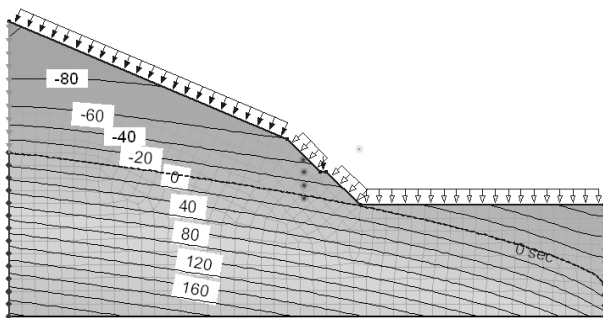
초기강우 적용일인 2011년 3월 31일의 간극수압은 a점과 d점에서 47kPa의 차이를 나타낸다. 부정류 해석으로부터 비탈면 파괴일에서 a점의 간극수압은 (-)43에서 (-)1kPa로 변화하였고 d점의 경우 (+)4에서 (+)41kPa로 변화하여 각각 42, 37kPa의 증가량을 나타냈다. 강우 후에도 비탈면 내에서 침출수가 유출되어 표면이 습윤상태인 것을 현지에서 여러 차례 목격하였는데, 집중강우가 내릴 때에 비탈면 상부가 지하수위 상승으로 포화됨을 확인할 수 있었다. Fig. 10 및 Fig. 11은 침투에 따른 간극수압의 변화를 나타낸 것이다.

부정류 해석기간의 간극수압은 강우 시 지표에 가까운 a, b, c점에서 강우침투에 의한 영향을 크게 받는 것으로 나타났고, 비교적 깊은 d점은 지하수위 상승에 의한 영향을 받

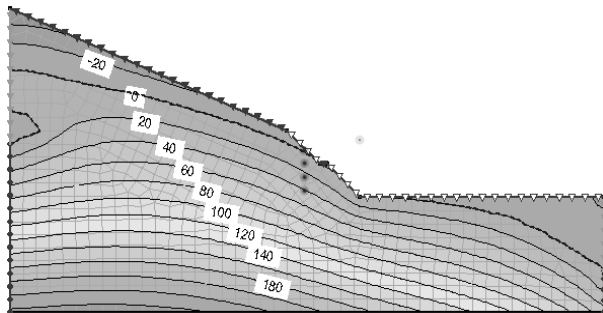
는 것으로 나타났다. 또 지표면에 가까울수록 간극수압의 변동 폭이 크고 강우가 종료된 뒤에는 해석초기의 형태로 회복되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 부정류해석 초기와 비탈면 파괴 시의 체적함수비를 나타낸 것이다. 강우초기에는 지하수위가 하부 지표면에 있었으나, 파괴 직전에 2일간 내린 230mm의 집중강우로 절취비탈면의 8m 높이까지 포화되고 모든 관찰점들에서 체적함수비는 39.9%로 포화되는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 약전비탈면의 관찰점들에서의 포화도를 나타낸 것이다. 포화도는 95~100% 정도로 매우 높고 차이가 크지 않는데, 이는 SWRC에서 알 수 있는 바와 같이 모관 흡수력에 따른 체적함수비의 변화가 토질 특성상 매우 적었

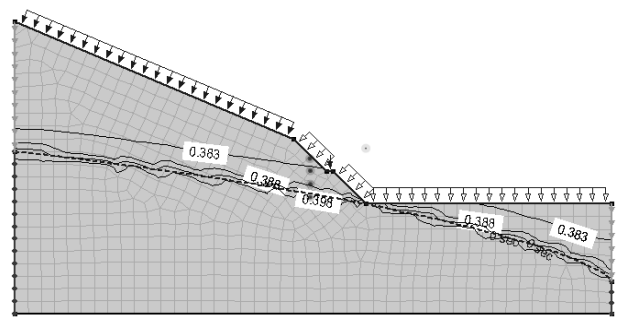


(a) At initial rainfall (2011. 3. 31.)

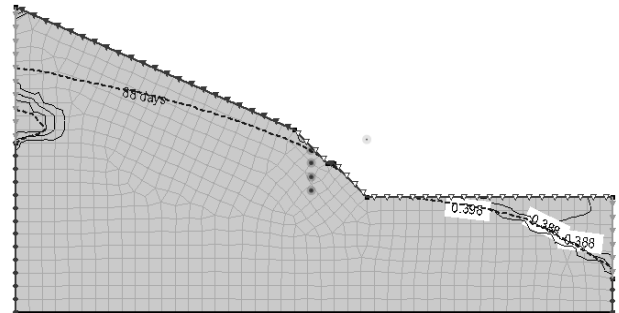


(b) At failure of slope (2011. 6. 27.)

Fig. 10. Change of pore pressure from rainfall infiltration



(a) At initial rainfall (2011. 3. 31.)



(b) At failure of slope (2011. 6. 27.)

Fig. 12. Change of volumetric water content from rainfall infiltration

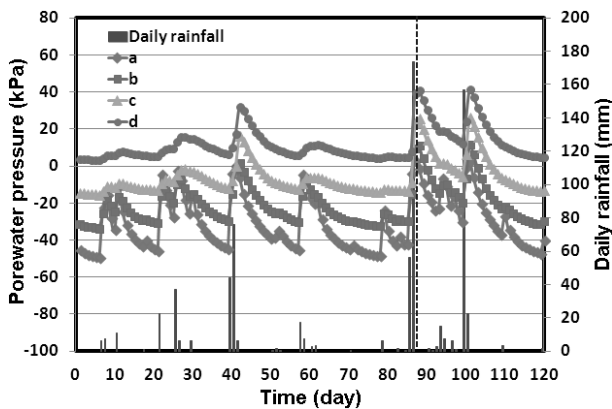


Fig. 11. Change of pore pressure from rainfall infiltration during the analysis period

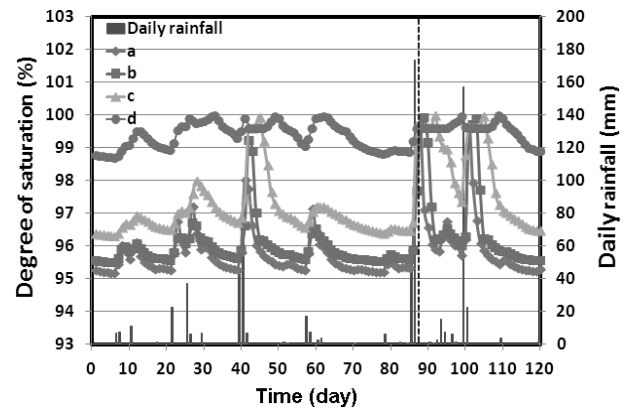


Fig. 13. Change of saturation from rainfall infiltration during the analysis period

고, 침투해석 시 적용한 잔류함수비를 모관흡수력 3,000kPa에서의 체적 함수비로 적용하였기 때문에 판단된다. 그럼에도 불구하고 지하수위의 영향을 받는 d점을 제외하고 강우에 따른 포화도의 변화는 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 14는 강우침투에 따른 시간별 흡수응력의 변화를 나타낸 그림이다. 각 관찰점에서의 파괴 시의 흡수응력은 (-)1.2 ~ (+)41kPa로 차이가 크게 나타났다. 비탈면 파괴일을 기준으로 모관흡수력에 따른 SSCC와 해석결과들을 비교하면, 점 a에서 d까지 모관흡수력 (-)1, (+)10, (+)26, (+)41kPa에서의 해석결과들은 (-)1, 11, 26, 41kPa이고 SSCC에서는 1, 10, 23, 36kPa로 나타났는데 두 방법이 서로 유사함을 알 수 있다.

6. 비탈면 안정해석

비탈면의 안전율이란 비탈면이 활동하려고 하는 힘과 활동에 저항하려는 힘의 비율, 즉 주어진 활동면에 대해서 흙의 전단강도를 현재의 전단응력으로 나눈 값을 말한다. 본 연구에서는 SEEP/W프로그램으로 침투해석한 결과를 바탕으로 불포화 상태를 고려할 수 있는 한계평형해석 프로그램인 SLOPE/W를 이용하여 비탈면의 안정해석을 수행하였다.

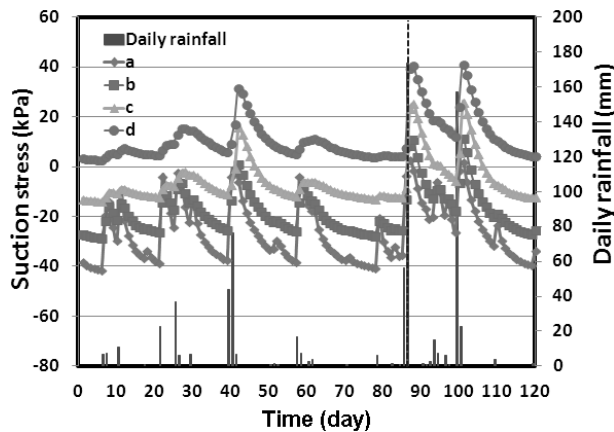


Fig. 14. Change of suction stress from rainfall infiltration during the analysis period

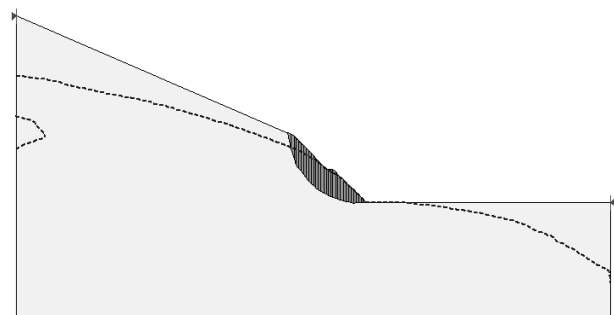


Fig. 15. A Failure surface at Yakjun slopes

안정해석 결과, 부정류 해석초기의 안전율은 1.76이고 비탈면 파괴 직전에는 1.28이었으나, 173mm의 집중강우로 안전율은 0.89까지 급격히 감소한 후에 파괴가 발생하였다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 부정류해석 기간의 강우량에 따라 안전율도 유사하게 변화하고 있음을 알 수 있으며 평균 강우에서의 안전율은 1.3~1.7의 범위인 것으로 판단된다.

간극수압과 안전율을 비교·분석해 보면, 지표면 아래 4.5m 깊이인 c점에서 해석초기 간극수압은 (-)14.5kPa, 파괴시점의 간극수압은 (+)25.6kPa으로 간극수압의 변동이 안전율의 변동추세와 유사함을 볼 수 있다. 또한 세립토 임에도 강우에 따른 안전율 변화가 뚜렷함을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 퇴적암을 기반으로 하는 풍화잔적토를 대상으로 강우특성을 고려한 불포화 잔적토의 비탈면 안정성을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 불포화토의 삼축압축시험 결과, 모관흡수력 증가에 따라 순체적응력과 축차응력이 증가하고 겉보기점착력도 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 포화토와 달리 불포화토에서는 모관흡수력이 증가하면 전단강도도 증가함을 알 수 있다.
- (2) 흡수응력 분석 결과, 세립토에서 삼축압축시험에 의한 값과 함수특성곡선에 의한 SSCC값이 모관 흡수력 100kPa의 부근에서 비교적 일치하였다.
- (3) 불포화토층의 강우침투해석 결과, 지표면 부근에서 강우의 영향을 크게 받고, 높은 음의 간극수압에서 적은 양의 강우에도 증가폭이 크게 나타났다. 또 일정깊이 이하의 심도에서 지하수위 상승을 제외하면 강우의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.
- (4) 불포화토층의 비탈면 안정해석 결과, 비탈면 파괴 발생

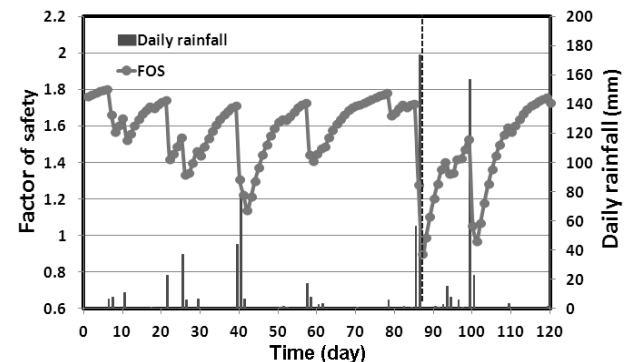


Fig. 16. Changes of safety factor at Yakjun slopes

일에서 안전율이 1.0 이하로 낮아지는 것을 확인할 수 있었고 강우량에 따라 안전율이 변화하는 것을 볼 수 있는데, 이는 비탈면 파괴 원인으로 강우에 따른 모관흡수력의 감소로 인한 영향이 큼을 알 수 있다.

- (5) 비탈면에서 파괴면을 실제 파괴형상에 맞게 고정하여 안정 해석한 결과, 파괴면에서 간극수압의 변화 추이와 안전율의 변화추이가 유사하게 나타났다.
- (6) 불포화토의 모관흡수력이 증가하는 만큼 비탈면의 전단강도도 커지게 되므로 비탈면의 안전율도 전단강도 증가분만큼 커짐을 알 수 있다.

References

1. Bishop, A. W. and Blight, G. E. (1963), Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils, *Geotechnique*, Vol. 13, No. 3, pp. 177~197.
2. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978), The shear strength of unsaturated soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313~321.
3. Korea Infrastructure Safety Corporation (2011), Design guide on engineered slopes, pp. 31~33 (in Korean).
4. Lee, Y. H., Oh, S. B. and Park, Y. M. (2013), Development of evaluation technique of a slope stability of residual soils decomposed of sedimentary rocks in Daegu-Gyeongbuk region considering unsaturated behavior characteristics, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp. 14~18 (in Korean).
5. Lu, N. and Likos, W. J. (2006), Suction stress characteristic curve for unsaturated soils, *Journal of Geo-technical and Geo-environmental Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 131~142.
6. Lu, N., Godt, J. W. and Wu, D. T. (2010), A closed-form equation for effective stress in unsaturated soils, *Water Resources Research*, Vol. 46, doi:10. 1029/ 2009 WR008646, pp. 1~14
7. Mualem, Y. (1976), A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 593~622.
8. Oh, S. B., 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 Geo-environmental Engineering*, Vol. 138, No. 1, pp. 47~57.
9. 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, No. 5, pp. 892~898.
10. 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, No. 3, pp. 379~392.