한국지반공학회논문집 제28권 9호 2012년 9월 pp. 23 ~ 30

ISSN 1229-2427
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.9.23

토석류 발생 사면의 불포화토 사면안정해석

Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil in Debris-Flow Occurrence Slopes

곽 철 수[1] Kwak, Cheol-Soo
박 병 수[2] Park, Byung-Soo
유 남 재[3] Yoo, Nam-Jae

Abstract

This paper is research results of slope stability analysis associated with seepage infiltration for unsaturated soil in debris-flow occurrence slopes. Site investigations were carried out in two slopes, located at Inje in Kangwon province where debris flow occurred in 2006 and at Yangpyung in Kyeunggi province where it occurred in 2010. For unsaturated soil sampled at the zone of debris-flow initiation, soil water characteristic curves with tempe pressure cells and shear strength parameters with newly designed shear strength apparatus were obtained respectively. The commertially available software SEEP/W was used to analyze seepage infiltration in unsaturated soil, based on their properties obtained from test results and the actual rainfall data at the moment of debris flow occurrence, and slope stability analysis with the program of SLOPE/W, associated with results of seepage analysis, was performed to simulate slope failure. As results of this research, seepage infiltration to unsaturated soil due to intensive rainfall was found to cause increase of ground water table as well as degree of saturation. Through this research slope stability analysis for unsaturated soil, considering the actual rainfall characteristic, might be a reasonable method of investigating characteristics of debris flow behavior, in particular, the moment of debris flow occurrence.

요 지

본 논문은 토석류 발생사면에서 불포화토의 침투해석을 연계 수행한 사면안정해석 연구결과이다. 2006년 강원도 인제군과 2010년 경기도 양평군에 위치한 2개소의 토석류 발생사면에 대하여 현장조사를 수행하고 붕괴발생부에서 채취한 시료로 tempe pressure cell을 이용한 함수특성곡선과 새로이 개발된 불포화토 직접전단시험기를 사용하여 불포화토의 전단강도 정수를 구하였다. 실험을 통해 획득한 물성과 토석류 발생 당시의 강우자료를 바탕으로 상용프로그램 SEEP/W를 사용하여 불포화토 침투 해석을 실시하고 그 결과와 연동하여 사면안정해석 프로그램 SLOPE/W를 사용하여 사면활동을 분석하였다. 본 연구 결과 집중강우에 의한 불포화토 지반에 강우침투의 영향으로 지하수위의 상승과 포화도의 증가로 사면안전율이 감소하여 사면활동이 발생한 것으로 나타났다. 이러한 연구 방법을 통하여 실제 강우특성을 고려한 불포화토의 사면안정해석을 실시하는 것이 토석류 발생사면의 거동특성 중 특히 발생시점을 확인할 수 있는 합리적인 방법이라 판단된다.

Keywords : Unsaturated soils, Soil water characteristic curve, Shear stredngth, Direct shear test apparatus, Slope stability

1 정회원, 강원대학교 토목공학과 석사 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kangwon National Univ.)
2 정회원, 강원도립대학 건설토목과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Gangwon Provincial College)
3 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Kangwon National Univ., Tel: +82-33-255-6237, Fax: +82-33-250-7237, njyoo@kangwon.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 3월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

최근 지구온난화에 의한 이상기후로 여름철 집중호우가 발생되며 이로 인해 매년 인명 및 재산피해가 급증하고 있으며, 이로 인해 사면안정에 대한 관심이 증가하고 있다. 실제 사면에서는 지하수위의 위치에 따라 포화영역과 불포화영역으로 나눌 수 있으며 대부분의 지반은 완전포화상태가 아닌 부분적으로 포화상태인 불포화 상태로 존재한다. 따라서 불포화토에 대한 연구는 국내외의 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔고, 국내의 경우 화강풍화토에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다(Fredlund, 2005; Kim and Ryu, 2000; Lee and Lee, 2009; Kim and Kim, 2010).

이러한 불포화토에 대한 관심이 증가하면서 최근 강우 침투에 의한 사면재해에 대해 불포화토 개념으로 연구가 이루어지고 있다. Kim et al.(2002)은 강우시 발생하는 사면의 얕은 파괴는 강우 침투에 의한 포화깊이 증가에 의해 발생되고 강우에 의한 사면의 포화깊이가 사면의 안정성에 미치는 영향을 파악하였으며, Shin and Park(2006)은 사면 붕괴는 주로 강우 침투로 지표면에서의 습윤대 형성과 이로 인한 모관흡수력의 감소에 기인하며 풍화 사면의 불포화 침투는 깊이별로 선행 강우에 의한 초기 흡수력과 이력에 따른 불포화 투수계수에 많은 영향을 받는다고 하였다. 또한 Oh et al.(2008)은 실제 풍화토 사면으로 침투해석과 안정해석을 수행하여 강우에 따른 사면의 붕괴를 재현하였고, Jeong et al.(2009)은 사면의 기울기와 투수계수를 고려한 강우시 사면의 침투거동특성을 SEEP/W로 평가하고 그 결과를 활용해 SLOPE/W로 사면의 거동을 분석하였다. 이러한 사면안정성에 관한 연구는 불포화특성과 강우특성을 고려하고 있으며, 실제 사면의 거동 특성을 파악하기 위한 접근이 더욱 대두되고 있다.

본 연구에서는 Figure 1에 보인 바와 같이 강원도 인제군과 경기도 양평군에서 발생한 토석류 발생 사면에 대한 현장조사를 수행하였으며 붕괴발생부에서 시료를 채취하여 함수특성시험과 새로이 개발된 불포화토 직접전단시험기를 사용하여 불포화토 사면 안정해석을 위한 지반정수를 획득하였다. 또한, 토석류 발생 지역에 대한 실제 강우량을 적용하여 불포화 전단강도를 고려한 사면의 안정해석으로 강우 침투에 따른 사면의 안전율 변화를 분석하였다.

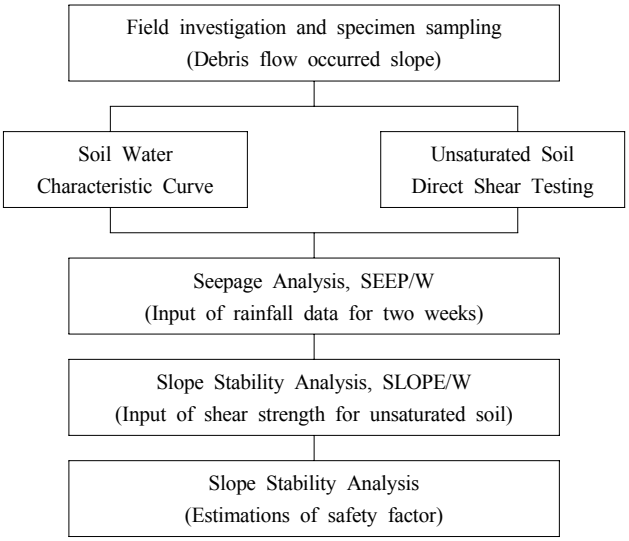


Fig. 1. Flow chart of slope stability analysis for unsaturated soil of debris flow occurred slope

2. 불포화토의 특성

일반적으로 함수특성곡선(soil water characteristic curve)은 함수비와 모관흡수력의 관계로 정의되며 불포화토의 역학적 성질을 보여주는 가장 기본적인 요소이다. 불포화토의 모관흡수력은 지반의 거동특성을 결정하는 중요한 역할을 하므로 불포화토의 흐름, 변형, 강도특성을 결정하기 위해서는 모관흡수력의 영향을 고려해야 한다(Fredlund and Xing, 1994). 흙 속의 물은 평형상태에서 모관흡수력의 영향으로 인해 변화하므로, 함수특성곡선은 모관흡수력에 대한 물의 보유능력을 나타내는 수분보유 곡선으로 표현할 수 있다.

Fredlund and Xing(1994)은 보편적이고 모관흡수력의 최대제한값(106kPa)을 고려하여 다음의 함수특성곡선식을 제안하였다.

$$\Theta = \frac{1}{\left[\ln\left[e+\left(\frac{\Psi}{a}\right)^{n}\right]\right]^{m}} \tag{1}$$

여기서 Θ는 정규화된 함수특성곡선, Ψ는 모관흡수력, e는 자연상수(2.71828), a, n, m은 매개변수(parameters)이다. 또한, 불포화토 전단강도를 정의하기 위해 독립된 두 개의 응력상태 변수로 마찰저항력을 전응력의 함수와 간극수압의 함수로 나누어 불포화토 전단강도에 적용할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다(Fredlund 등, 1978).

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2)$$

여기서 u_a는 파괴면의 간극공기압(pore-air pressure), u_w는 파괴면의 간극수압(pore-water pressure), $(\sigma_n - u_a)$는 파괴면의 순연직응력(net normal stress), $(u_a - u_w)$는 모관흡수력, ϕ'는 순연직력에 대한 유효마찰각(effective friction angle), ϕ^b는 모관흡수력에 대한 겉보기마찰각(apparent friction angle)이다.

3. 불포화토 실험 및 결과 분석

본 연구에서는 Tempe pressure cell 장비를 사용하여 함수특성곡선을 구하였고, 불포화토 전단강도정수를 구하기 위해 불포화토 직접전단시험기를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료는 2006년 강원도 인제군 가리산리와 2010년 경기도 양평군 금왕리에 발생한 토석류 현장 사면의 붕괴발생부에서 채취된 화강풍화토를 사용하였다.

토석류가 발생한 사면에서 들밀도 실험을 실시하여 현장단위중량과 함수비를 측정하였고, 채취한 시료는 KSF 방법에 의한 실내실험을 실시하여 Table 1과 같은 시료의 기본물성 자료를 획득하였다.

3.1 함수특성곡선(SWCC)

함수특성곡선은 Tempe pressure cell을 사용하여 구하였으며, 불포화토를 포화시켜 단계적으로 공기압을 가해 간극수를 줄여가는 건조과정의 곡선(drying curve)을 얻을 수 있었다.

한편, 실험시 현장 함수비와 습윤단위중량을 고려하여 시료를 성형하였으며, Figure 2와 같이 측정된 각각의 함수특성곡선을 Fredlund and Xing 모델식을 사용하여 구할 수 있었다. 또한 구해진 함수특성곡선을 통해 매개변수와 포화체적함수비 및 공기함입치를 결정하여 Table 2에 나타내었으며, 실험을 통해 결정된 매개변수는 침투해석시 불포화토의 물성치로 사용되었다.

Table 1. Basic properties of the soil

Properties	Inje	Yangpyeong
Passing amount through No.200 sieve (%)	7.60	12.9
Liquid limit (LL)	–	23.5
Plastic limit (PL)	–	15.6
USCS	SW-SM	SC-SM
Specific gravity (G_s)	2.67	2.65
Total unit weight (kN/m^3)	17.9	16.7
Field water content (%)	32.6	14.7
Saturated coeff. of permeability (cm/sec)	6.10×10^{-5}	2.83×10^{-5}

3.2 전단강도

3.2.1 불포화토 직접전단시험기

불포화토 전단강도정수를 구하기 위해 불포화토 직접전단시험기를 개발하였다(Kwak et al., 2011). Figure 3에서 보는 바와 같이 개발된 불포화토 직접전단시험기는 변위제어시험법으로 전단강도정수인 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 측정할 수 있으며, 포화된 시료에서 공기압에 따라 간극수를 유출시킬 수 있도록 챔버에 공기압을 가하여 전단할 수 있게 설계되었고 하부상자에는 세라믹 디스크(high air entry disk)를 설치하여 공기압에 따라 공기의 흐름은 차단하고 간극수만을 통과시켜 불포화 상태를 만들 수 있다. 하부 이동식 직접전단시험기로 전단상자 내부 전단 공간은 직경 53.5mm, 높이 20mm이다.

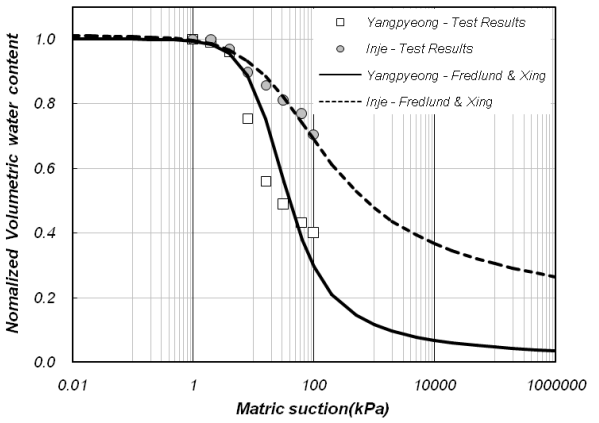
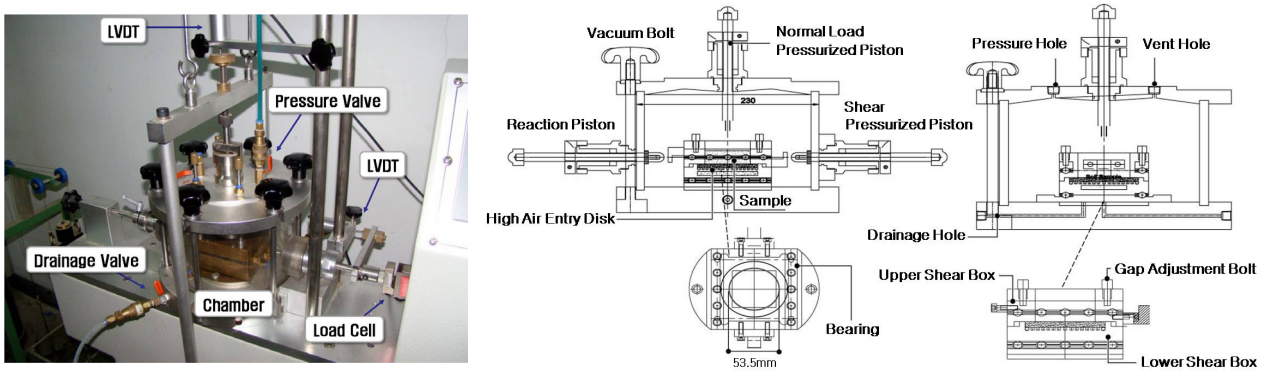


Fig. 2. Water content characteristic curves expressed by Fredlund and Xing models

Table 2. Parameters of Fredlun and Xing models

Parameter	Inje	Yangpyeong
a	21	13.3
n	0.9	1.4
m	0.59	0.9
Air-entry value (kPa)	4.02	3.02
Saturated water content (θ_s)	0.46	0.43



(a) Measuring equipments (b) Equipment configurations

Fig. 3. Direct shear test equipment

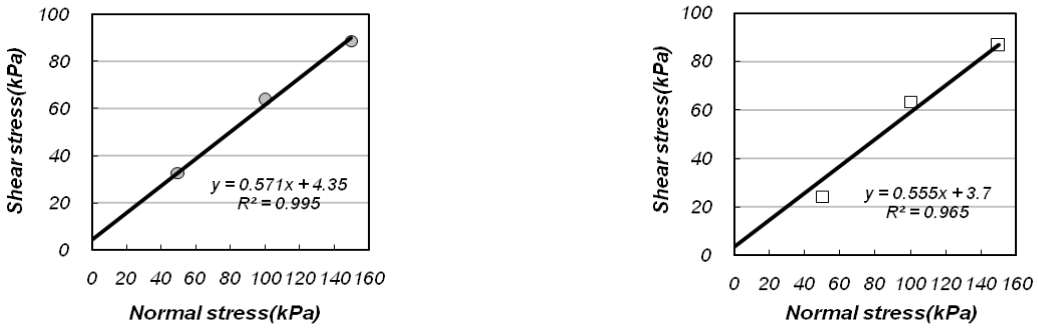
3.2.2 실험 결과 및 분석

(1) 포화토 전단시험

Figure 4에 인제와 양평 지역에 대한 전단강도 시험 결과를 나타내었다. 시험결과 전단응력은 수직응력의 증가에 따라 선형적으로 증가하였고 인제시료의 내부마찰각(ϕ)은 29.8°, 점착력(c)은 4.35kPa로 나타났으며, 양평시료는 내부마찰각(ϕ) 29.1°, 점착력(c) 3.70kPa로 나타났다.

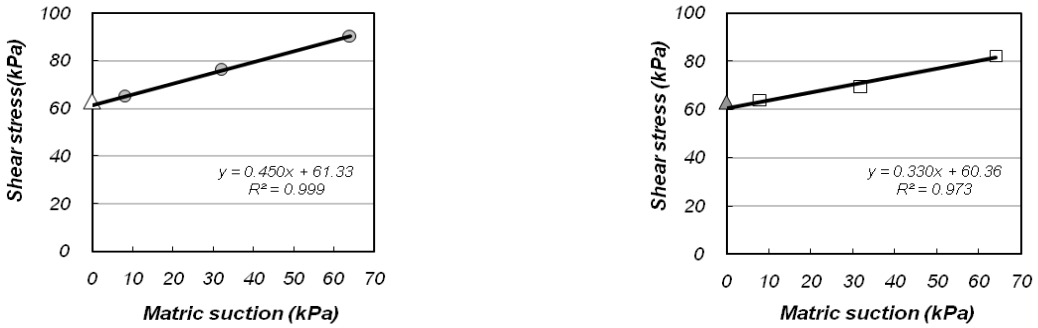
(2) 불포화토 전단시험

두 시료에 대한 불포화토 전단시험은 순수직응력 100kPa을 가하여 시험하였고 시험결과를 Figure 5에 도시하였다. 시험결과 불포화토 내부마찰각(ϕ^b)은 인제의 경우 24.3°, 양평의 경우 18.3°를 나타내었고 포화토 및 불포화토 전단강도정수를 Table 3에 정리하였다.



(a) Inje (b) Yangpyeong

Fig. 4. Shear strength of saturated soil



(a) inje (b) Yangpyeong

Fig. 5. Shear strength of unsaturated soil

Table 3. Variables of shear strength

Variables	Inge	Yangpyeong
Internal friction angle (saturated soil), ϕ(deg)	29.8	29.1
Internal friction angle (unsaturated soil), ϕ^b(deg)	24.3	18.3
Cohesion, c(kPa)	4.35	3.70

4. 강우 침투에 의한 사면안정해석

불포화토 실험 결과를 가지고 SEEP/W 프로그램으로 침투해석을 실시하고 그 결과를 SLOPE/W로 연동하여 사면안정해석을 실시하였다.

4.1 현장을 고려한 해석조건

강우시 불포화 사면의 강우 침투에 의한 지하수위 상승과 깊이별 포화도를 분석하기 위하여 SEEP/W 프로그램으로 침투해석을 실시하였다. Figure 6은 인제와 양평에 발생한 토석류 발생 사면에 대해 유한요소 해석단면으로 현장조사를 통해 표토층 심도 및 사면경사를 측정하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 인제군은 사면경사 37°, 표토층 심도 1.5m이고 양평군은 사면경사 25°이나 토층 심도는 사면의 상부(A-A) 2m～하부(C-C) 2.5m로 하부로 갈수록 심도가 점차 깊어지고 있다. 두 현장 모두 지하수위는 현장조사결과 표토층과 기반암층 경계에 위치하는 것을 확인하였으며 지반의 입력값은 현장에서 채취한 시료로 실험한 결과로 Table 1, 2, 3에 나타낸 바와 같다.

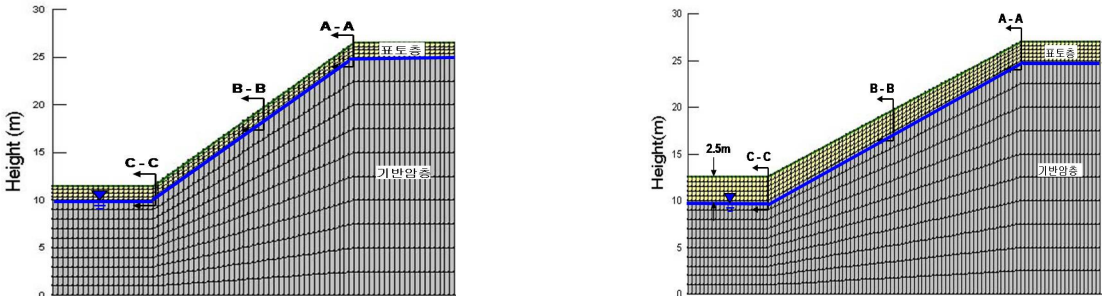
한편, 해석단면의 지표 상부 경계는 강우에 대한 침투경계로 설정하고 측면 경계는 무한요소를 적용하였으며 실제 현장과 동일한 조건으로 해석을 하기 위해 Figure 7과 같이 각 지역의 관측소 강우자료를 활용하여 2주간의 강우 데이터로 선행강우를 고려한 침투해석을 실시하였다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 인제 및 양평군 모두 토석류 발생 당일 150mm 이상의 집중호우가 발생하였다.

4.2 침투해석 결과

4.2.1 포화도 분포

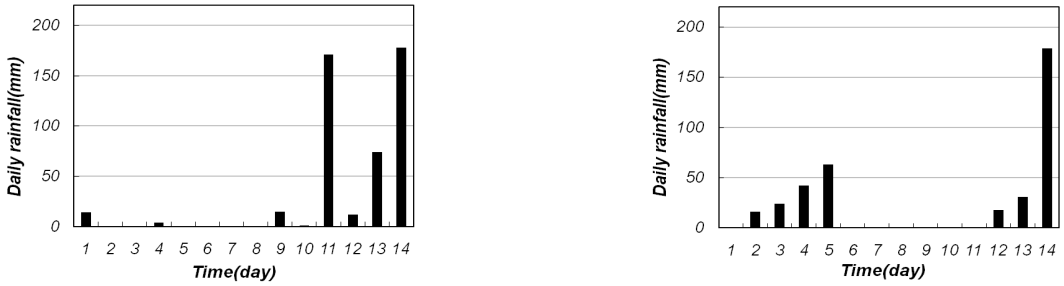
침투해석 결과 각 단면별로 깊이에 따른 포화도 분포를 0, 9～15일을 기준으로 분석하여 Figure 8, 9에 나타내었다.

두 지역 모두 강우에 따른 침투 영향으로 수분이 먼저 공급되는 지표면부터 포화도가 증가하는 경향성을



(a) inje (b) Yangpyeong

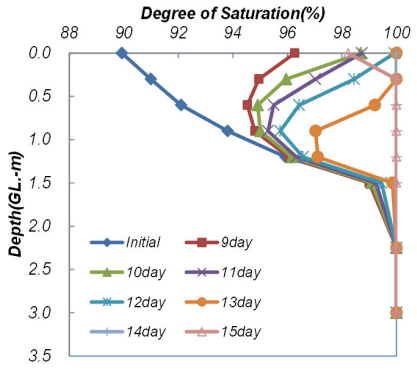
Fig. 6. Section of slope stability analysis



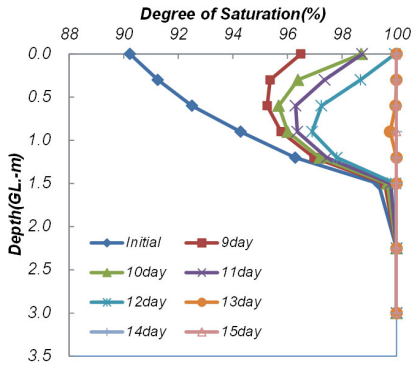
(a) inje (b) Yangpyeong

Fig. 7. Rainfall data of two weeks

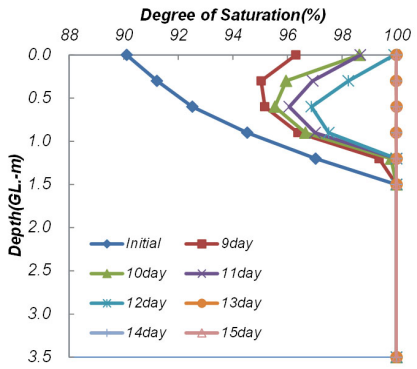
확인할 수 있었으며 초기(0 day) 포화도는 지하수위 상부에서 90~96%를 보였고 시간경과에 따라 지하수위 상부층도 점차 포화도가 증가하였다. 즉, 지하수위 상부 토층이 불포화토 거동에 의해 부(-)의 간극수압을 가지지만 강우에 따른 침투 영향으로 점차 포화도가 증가하면서 간극수압이 점차 증가하여 양(+)의 값을 가지게 되는 것으로 나타났다. 또한 토석류 발생 당일인 15일에는 표토층 전체가 포화되는 것으로 확인할 수 있었다. 이러한 침투결과는 강우시간이 경과함에 따라 초기 흡수력이 빠른 시간에 감소하면서 포화대가 깊어지는 Park and Shin(2009)의 침투해석 결과와 일치하는 것이다.



(a) A-A



(b) B-B

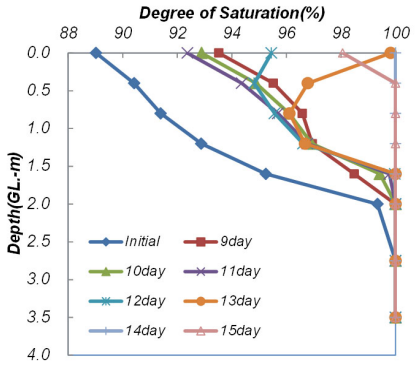


(c) C-C

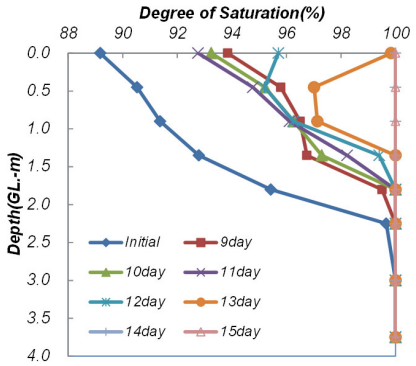
Fig. 8. Distribution of saturation degree for each sections (Inje)

4.2.2 지하수위 분포

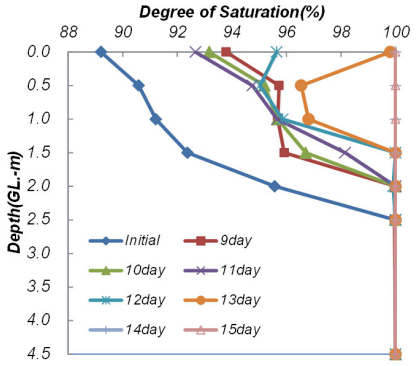
사면의 안전율은 강우침투에 따른 지하수위 변화에 민감하게 나타나며 사면의 포화는 강우 및 지중침투에 의해 사면하부에서부터 지하수위가 상승하는 것으로 알려져 있다(Yune and Jun, 2010). 따라서 사면의 포화는 강우에 의해 1차적으로 침윤선이 점차 하강하여 사면하부에서 지하수위와 만나 2차적으로 지하수위 상승의 원인으로 발생하므로, 본 침투해석 결과 지반의 지하수위 변화를 알아보고자 하였다. Figure 10에 강우에 따른 침투해석 결과 지반의 지하수위 변화를 나타내었다.



(a) A-A

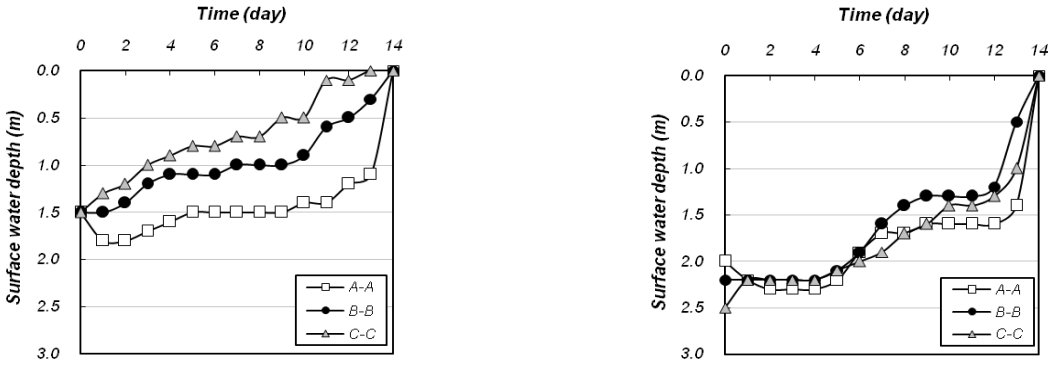


(b) B-B



(c) C-C

Fig. 9. Distribution of saturation degree for each sections (Yangpyeong)



(a) Inje (b) Yangpyeong

Fig. 10. Change of ground water table for each sections

그림에서 볼 수 있듯이 시간 경과에 따라 강우침투가 발생하여 지하수위가 점차 상승하였으며, 집중호우가 발생한 토석류 발생 당일(14일)에는 지하수위가 지표면까지 상승하여 지반이 포화상태를 보였다.

인제의 경우, 강우가 적은 초기에는 지하수위 변화가 적었으나 171mm의 집중호우가 발생한 11일에 급격한 상승을 보였고, 14일 발생한 178mm의 집중호우에 의해 사면이 포화되는 것으로 나타났다. 양평의 경우, 전체 사면이 강우 발생에 따라 동일한 지하수위 상승 경향을 보이며, 14일 179mm의 집중호우에 의해 사면 전체가 포화상태를 보였다. 따라서, 해석결과 적은 양의 선행강우로도 지하수위 상승이 발생되며 집중호우 발생시 급격한 지하수위 상승이 발생되는 것으로 보였다. 그러나 본 연구에서 해석된 지반은 지층두께가 약 1.5～2.5m이고 기반암이 위치하여 지하수위가 높게 위치하는 제한적인 경우이므로 지하수위 변화거동은 지반특성 및 지형적인 영향에 따라 다양하게 나타남에 주의해야 할 것이다.

4.3 사면안정해석

SEEP/W를 통해 얻어진 침투해석 결과를 SLOPE/W에 연동시켜 강우 침투에 따른 사면안정해석을 실시하였다. 강우 침투에 따른 사면안정성 변화를 검토하기위해 강우 시간대별로 사면안정해석을 실시하였으며, Figure 11과 같은 결과를 얻었다.

Figure 11에 나타낸 시간에 따른 사면의 안전율 변화를 살펴보면 인제의 경우, 토석류 발생 3일 전(11일)에 171mm의 집중호우가 내렸고 안전율은 1.284로 감소하였으며, 토석류 발생 당일까지 12mm(12일), 74mm(13일) 강우의 영향으로 안전율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 토석류 발생 당일 강우량은 178mm의 집중호우가 발생하였고 사면 안전율은 0.948로 3일전 집중호우의 영향 이후 점차적으로 감소한 안전율은 다시금 소폭 감소하여 가장 낮은 안전율을 보였다. 따라서 1차(11일) 집중호우 발생에서 안전율 1.284로 안정한 상태를 보인 사면은 2차(14일) 집중호우 발생시 안전율 0.948로 불안정한 상태로 파괴가 발생하였다.

양평의 경우, 인제와는 다르게 토석류 발생 당일 강우 외에는 집중호우성 강우가 발생하지 않았으며, 토석류 발생 2일전부터 18mm(12일), 31mm(13일)의 적은 일강우량이 발생하였음에도 1.424(12일), 1.370(13일)의 급격한 안전율 감소를 보였다. 이는 2～6일간 발생한 선행강우로 인한 지표면 포화 및 지하수위의 상승에 의해 적은 강우량에도 사면의 포화가 발생하여 급격한 안전율 감소가 발생한 것으로 판단된다. 또한 발생 당일 179mm의 집중호우 영향으로 사면 안전율은 0.979로 감소하여 불안정성을 보였다. 이를 통해 적은 양의 선행강우도 지하수위 상승 및 간극수압의 증가에 영향을 주며 이는 사면 안전율을 감소시키는데 영향을 주는 것으로 판단된다.

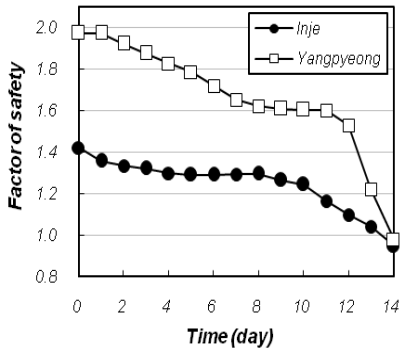


Fig. 11. Change of slope safety rate

5. 결 론

본 연구에서는 토석류 발생 사면에 대하여 현장조사와 불포화특성실험을 통해 얻어진 정수를 이용하여 실제 강우에 따른 사면의 침투해석(SEEP/W)과 안정해석(SLOPE/W)을 수행하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 함수특성곡선 분석 결과, Fredlund and Xing의 경험식으로 표현한 함수특성곡선과 실험결과로 얻은 함수특성곡선은 잘 부합되는 것으로 확인되었다.
(2) 불포화토 직접전단시험기를 개발하여 불포화 상태 시료의 전단강도정수를 측정한 결과, 포화토의 내부마찰각(ϕ)은 인제 29.8°, 양평 29.1°, 점착력은 인제 4.35kPa, 양평 3.70kPa로 측정되었고, 불포화토의 내부마찰각(ϕ^b)은 인제 24.3°, 양평 18.3°로 측정되었다.
(3) 불포화 사면의 강우침투에 의한 깊이별 포화도를 분석한 결과 수분이 먼저 공급되는 지표면부터 포화도가 증가하는 경향성을 확인하였고 지하수위 상부토층이 불포화거동에 의해 부(-)의 간극수압을 가지다가 강우에 따른 침투영향으로 포화도가 증가하면서 간극수압이 점차 증가하여 양(+)의 값을 가지는 것으로 나타났다.
(4) 침투해석 결과를 연동한 사면안정해석 결과, 두 지역 모두 강우침투의 영향으로 지하수위가 점차 상승하다가 토석류 발생당일 지표면까지 상승하였으며 이로 인해 토사층의 사면안전율이 인제 0.948, 양평 0.979로 감소하면서 사면 파괴가 발생한 것으로 분석되었다.
(5) 향후 사면안정해석을 보다 합리적으로 적용하기 위해서는 많은 현장조사와 더불어 불포화상태 및 누적강우를 고려한 강우침투해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원('08기술혁신 B01-01)에 의해 수행되어 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.4, pp.521-532.
2. Fredlund, D. G. (2005), "Unsaturated soil mechanics in engineering practice", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No3, pp.286-321.
3. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Can. Geothch. Journal*, Vol.15, No.2, pp.261-276.
4. Jeong, S. S., Choi, J. Y., and Lee, J. H. (2009), "Stability analysis of unsaturated weathered soil slopes considering rainfall duration", *Journal of KSCE*, Vol.29, No.1C, pp.1-9.
5. Kim, J. H., Park, S. W., Jeong, S. S., and Yoo, J. H. (2002), "A study of stability analysis on unsaturated weathered slopes based on rainfall-induced wetting", *Journal of KGS*, Vol.18, No.2, pp.123-136.
6. Kim, M. W. and Kim, Y. M. (2010), "Shear strength of weathered granite soil considering change of saturation", *Journal of Korean Geo-Environmental Society(KGES)*, Vol.11, No.9, pp.5-14.
7. Kim, S. K. and Ryu, C. H. (2000), "Shear strength of unsaturated decomposed soils", *Journal of Korea Society of Civil Engineers (KSCE)*, Vol.20, No.2C, pp.109-118.
8. Kwak, C. S., Yoo, K. S., Park, B. S., and Yoo, N. J. (2011), "Development of unsaturated direct shear testing apparatus", *Proceedings of Korean Geotechnical Society(KGS) Fall National Conference*, KGS, pp.266-274.
9. Lee, H. K. and Lee, I. (2009), "A study of unsaturated-character of weathered granite soil in korea", *Journal of KGES*, Vol.10, No.3, pp.13-20.
10. Oh, S. B., Mun, J. H., Kim, T. K., and Kim, Y. K. (2008), "A case study of rainfall-induced slope failures on the effect of unsaturated soil characteristics", *Journal of KSCE*, Vol.28, No.3C, pp.167-178.
11. Park, S. W. and Shin, G. H. (2009), "Stability analysis on unsaturated gneiss weathered soil slopes considering wetting path soil-water characteristic curve", *Journal of KSCE*, Vol.29, No.5C, pp.191-198.
12. Shin, G. H. and Park, S. W. (2006), "Effect of hysteresis on soil-water characteristic curve in weathered granite and gneiss soil slopes during rainfall infiltration", *Journal of KGS*, Vol.22, No.7, pp.55-64.
13. Yune, C. Y. and Jun, K. J. (2010), "Seepage analysis on Ground water level changes for the site of debris-flow", *Proceedings of KGES*, pp.272-280.

(접수일자 2011. 12. 22, 심사완료일 2012. 9. 11)