

[기술보고]

지질별 불포화토 사면의 붕괴 임계심도 분석

남경훈 · 김민규 · 정교철*

안동대학교 지구환경과학과

[Technical Report]

Analysis on Failure Critical Depth of Unsaturated Landslide Zone According to the Geological Condition

Koung-Hoon Nam, Min-Gyu Kim, and Gyo-Cheol Jeong*

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

Received 4 June 2015; received in revised form 17 June 2015; accepted 20 June 2015

강우침투로 인한 불포화토 사면의 안정해석이 산사태 분석 및 사면 안정성을 평가하는데 주요 문제로 부각되고 있다. 본 연구에서는 강우강도를 고려하여 국내 산사태 발생부의 모암별 풍화토층의 붕괴 임계심도를 파악하고자 하였다. 분석 결과 강우강도 및 사면경사 증가에 따라 편마암 풍화토는 임계심도가 3.00 m에서 3.77 m로 증가하였고, 화강암 풍화토는 임계심도가 1.75 m에서 2.40 m로 증가하였으며, 이암 풍화토는 3.00 m에서 4.15 m로 증가하였다. 점착력이 낮고 내부 마찰각이 높은 화강암 풍화토에서 붕괴 임계심도가 낮은 경향을 보였으며 강우강도에 의한 안전율 감소보다 사면경사 증가에 따른 안전율 감소가 다소 크게 발생하는 것으로 나타났다.

주요어: 산사태, 사면파괴, 임계심도, 안전율

Slope stability analysis of unsaturated soil slopes due to rainfall infiltration is an important issue in evaluating landslide analysis and stability assessment. The purpose of this study is to establish the critical depth considering weathered soil of parent rock and rainfall intensity at main scarp in national landslide. Based on the analytical results, it is found that as rainfall duration and Slope angle increased, the critical depth of gneiss-weathered soil increased from 3.00 m to 3.77 m, the critical depth of granite weathered-soil increased from 1.75 m to 2.40 m, and the critical depth of mudstone-weathered soil increased from 3.00 m to 4.15 m, respectively. The critical depth of granite-weathered soil with low cohesion and high internal friction angle is much lower than those of other soils. It is interestingly shown that a decrease in the safety factor is highly significant, much affected by the slope increase rather than the rainfall intensity.

Key words: landslide, slope failure, critical depth, safety factor

*Corresponding author: jeong@anu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

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.

서 론

기존의 사면 안정성 분석에서는 지표면에 지하수위를 위치시키는 방법으로 해석을 실시하였으나 최근에는 강우침투로 인한 사면 내부의 모관흡수력 감소 및 습윤전선의 하강에 따른 사면파괴 해석방법이 요구되고 있다. 사면의 전단강도를 증가시키는 지표면에서의 음의 간극수압의 감소로 인한 강도 저하가 얇은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다(Ng and Shi, 1998). 국내의 산사태 발생은 지하수위의 영향보다는 얇은 토층두께의 발달로 인해 강우의 침투 영향이 더 크게 작용한다. 즉, 강우가 발생되었을 때 지표로부터 강우의 침투양상에 따라 불포화 토층이 포화상태로 바뀌면서 전층파괴 형태로 붕괴가 진행된다. 집중호우에 의해 발생하는 국내의 산사태 및 사면파괴는 주로 지표면 부근 2m 이내에서 발생되며, 강우 발생 전 사면 내 지하수위가 높지 않다면 강우가 지하수위 상승에 미치는 영향은 크지 않다(Kim, 2002; Collins et al., 2004). 강우 시 지표로 침투된 강우는 토층의 간극수압 및 함수비를 변화시키며, 침윤선이 사면과 평행하게 발달되어 침윤선이 파괴면과 일치하게 되는 경우가 많아진다(Rahardjo et al., 1995). 산사태에 가장 크게 영향을 미치는 부분은 사면의 전단면을 기준으로 사면 토층의 하부로부터 지하수위 상승에 따른 사면 토층의 포화조건보다는 강우 발생 시 사면 토층 내부로 강우의 침투수가 사면파괴의 원인으로 더 크게 작용한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강우강도를 고려한 산사태발생에서 지하수위가 고려되지 않은 무한 사면에서 침윤선의 발달 및 임계심도의 발달 양상을 국내 대표적 풍화토인 편마암 풍화토, 화강암 풍화토 및 이암 풍화토로 안정해석을 실시하였다. 또한 van Genuchten, 1980과 Fredlund and Xing, 1994의 함수특성곡선을 고려하여 강우강도 및 지속시간을 달리하는 강우특성에 따라 포화심도와 흡수력에 따른 불포화강도정수를 이용해 간극수압의 변화에 따른 불포화사면 거동을 분석하였다.

연구 방법

자연사면의 강우 침투 고려

Geo-Slope사의 SEEP/W를 이용하여 시간에 따른 부정류해석을 실시하였으며 함수특성곡선은 함수특성곡선 방정식을 이용하여 산정하였다. Seep/w는 흙이나 암과 같은 재료 내에서의 물의 거동과 간극수압의 변화를 수치해석 하는 유한 요소 프로그램으로 포화토 및 불포화토의 흐름 해석, 정상류와 부정류를 이용한 해석, 2차원 문제 및 축대칭 문제, 다층지반, 비등방성 투수계수 등을 해석 할 수 있다.

기반암이 노출된 지역을 제외한 대부분의 국내 산사태는 shallow landslide 형태로써 사면 파괴 기울기는 25°~35°이며 붕괴심도는 7m 이내이다. 따라서 강우강도에 대한 지속시간의 변화에 따른 임계심도 분석 시 사면 기울기는 25°, 30°, 35°의 3가지를 고려하였으며 해석 단면의 높이는 3m, 5m, 7m로 비교적 낮게 설정하였다. 사용된 확률강우량은 국토교통부에서 지난 2000년부터 국내 68개 우량 관측소의 장기간 자기우량 자료의 빈도를 분석하여 지점별로 산정, 등우선도를 작성하여 확률강우강도를 제작한 자료를 바탕으로 지속시간 72시간 기준 10년, 20년, 50년, 100년, 그리고 200년 빈도의 확률강우량을 사용하였다. 해석결과 풍화토심도 7m 이내의 자연사면에서 강우침투는 큰 영향을 미치지 않았으며 침투양상의 변화는 미미한 것으로 나타났다.

자연사면의 안정성 분석

기존의 사면안정성에 관한 연구는 Ng and Shi (1998)가 지표면의 음의 간극수압의 감소로 강도저하가 발생하는데, 이 강도저하가 얇은 사면파괴의 주요원인이라고 하였다. Pradel and Radd (1993)와 Mein and Larson (1973)은 강우강도와 지속시간을 고려한 한계평형해석에서, 얇은 사면파괴 가능성을 평가하였다. 사면안정성 해

Table 1. Physical properties of three weathered soils and input parameters.

(NDMI, 2011, 2012).

Classification	Unit	Gneiss weathered soil	Granite weathered soil	Mudstone weathered soil
Dry unit weight	kN/m ³	13.9	14.98	15.36
Saturated unit weight	kN/m ³	18.51972	19.1352	19.46522
Cohesion	kPa	8.53	2.14	7.79
Angle of internal friction	°	33.24	35.61	25.28
Permeability coefficient	m/sec	3.82E-07	8.24E-07	1.92E-07
Water content	m ³ /m ³	45.09	34.37	57.45

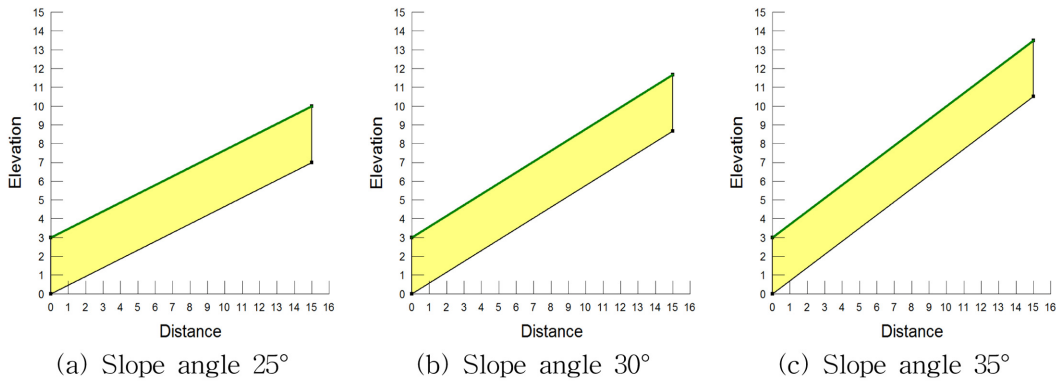


Fig. 1. Geometry of the infinite element mesh used for simulations.

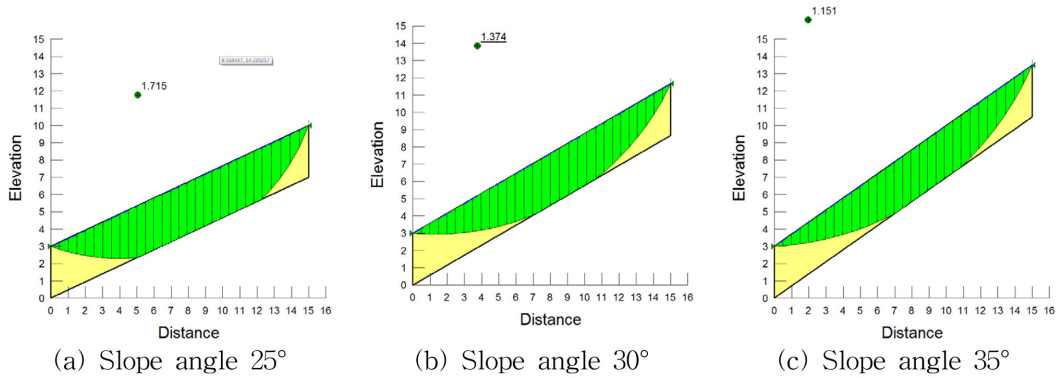


Fig. 2. Change in factor of safety along with slope angle and rainfall intensity (return period; 100 yr) in gneiss weathered soil.

석은 Geo-Slope사의 Geo-Studio 2007 프로그램을 이용하였다. 프로그램에 포함된 SLOPE/W를 사용하여 사면 안전성 분석을 수행하였으며, 절편법중의 하나인 Bishop 해석법(1995)을 이용하여 사면 안전율을 평가하였다. 해석에 사용된 지반 물성 및 기본 단면 모델은 다음과 같다(Table 1, Fig. 1).

결과 및 토의

국내 산지와 같이 자연사면에서 2 m 내외의 토층심도를 가지고 있는 경우 강우 시 지표로 침투된 강우가 토층의 간극수압, 함수비를 변화시키게 된다(Chae et al., 2012). Rahardjo et al. (1995)는 강우 발생 시 침윤선이 사면과 평행하게 발달하고, 발달된 침윤선이 파괴면과 일치하게 되는 경우가 많다고 보고하였다. 편미암 풍화토의 경우 강우강도가 증가함에 따라 간극수압이 증가하며 사면 상단부의 간극수압 증가율이 가장 빠르며,

사면의 경사가 낮을수록 간극수압의 증가가 빠르다고 하였다(Chae et al., 2007).

사면안정해석결과

Fig. 2는 재현기간 100년의 확률강우량을 적용하였을 때의 사면의 붕괴 임계심도 발달 양상을 나타낸 것으로, a는 사면경사 25°일 때, b는 사면경사 30°일 때, 그리고 c는 사면경사 35°일 때를 비교한 것이다. Fig. 2를 동일 강우강도-경사각변화로 비교를 해보면, 사면의 경사가 25°일 때의 안전율은 1.748, 30°일 때 1.410, 그리고 35°일 때에는 1.171로 경사가 증가할수록 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 동일사면경사-강우강도변화에서는 사면경사 25°에서는 10년 빈도의 강우강도에서는 1.748에서 100년 빈도 강우강도로 변화함에 따라 1.715로 감소하였다. 사면경사 30°에서 10년 빈도 강우강도에서는 안전율이 1.410에서 100년 빈도 강우강도로 변화함에 따라 안전율이 1.379로 감소하였다. 마지막으로 사

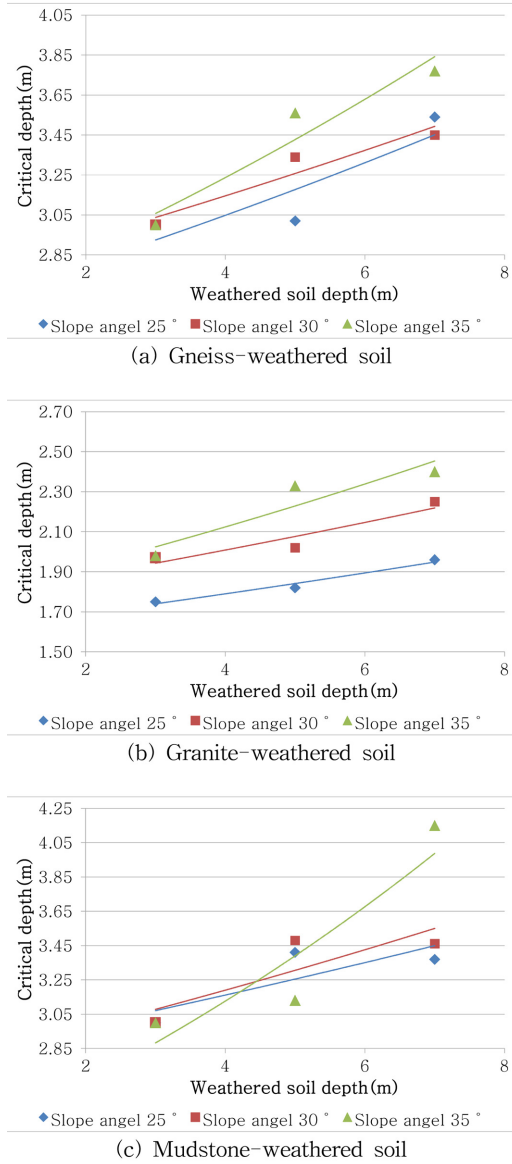


Fig. 3. Correlation of weathered soil depth and critical depth along with slope angle.

면경사 35°에서 10년 빈도의 강우강도에서는 1.171에서 100년 빈도 강우강도로 변화함에 따라 안전율이 1.151로 변화하였다. 전체 사면모델 135개를 비교·분석한 결과 사면경사의 증가와 강우강도의 증가에 따라 모두 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 강우강도에 의한 안전율의 감소율 보다, 사면경사의 증가에 따른 안전율의 감소가 큰 폭으로 발생하는 것으로 나타났다. 이는 사면의 경사 증가에 따라 사면의 안전율

이 감소하며, 강우강도의 증가 및 강우지속시간의 증가에 따라 안전율이 감소한다는 기존의 연구와 일치하는 것이다(Jung et al., 2009; Song, 2013).

풍화토층의 심도와 임계심도와와의 상관관계

해석을 통하여 산정된 지질별 붕괴 임계심도와 풍화토층 심도와와의 상관관계를 비교하였는데, 사면의 모양이 편마암으로 이루어진 경우에는 풍화토층의 심도와 상관없이 일정한 깊이의 붕괴 임계심도가 발달하는 것으로 나타났다.

모암이 편마암인 풍화토층에서 풍화토층의 심도가 증가함에 따라 붕괴 임계심도가 사면경사가 25°일 때에는 3.00 m에서 3.54 m, 사면경사 30°일 때 3.00 m에서 3.45 m, 그리고 사면경사 35°일 때 3.00 m에서 3.77 m로 증가하는 모습을 보였다(Fig. 3a). 모암이 화강암인 풍화토층에서 풍화토층의 심도가 증가함에 따라 붕괴 임계심도가 사면경사가 25°일 때에는 1.75 m에서 1.96 m, 사면경사 30°일 때 1.97 m에서 2.25 m, 그리고 사면경사 35°일 때 1.98 m에서 2.40 m로 증가하는 모습을 보였다(Fig. 3b). 모암이 이암인 풍화토층에서 풍화토층의 심도가 증가함에 따라 붕괴 임계심도가 사면경사가 25°일 때에는 3.00 m에서 3.37 m, 사면경사 30°일 때 3.00 m에서 3.46 m, 그리고 사면경사 35°일 때 3.00 m에서 4.15 m로 증가하는 모습을 보였다(Fig. 3c). 이는 사면경사가 증가함에 따라 붕괴 임계심도가 증가한다는 것으로 해석되며, 풍화토층의 심도가 클수록 붕괴 임계심도 역시 증가함을 나타낸다. 또한, 편마암과 이암풍화토와 비교하여 화강암 풍화토가 상대적으로 낮은 붕괴 임계심도를 나타내었는데, 이는 화강암 풍화토의 점착력과 투수계수 등의 인자가 다른 풍화토에 비하여 낮은 것에 기인한다고 판단된다.

경사와 임계심도와와의 상관관계

해석을 통하여 산정된 사면의 경사와 지질별 붕괴 임계심도와와의 상관관계를 비교하였는데, 사면의 경사가 증가함에 따라 붕괴 임계심도가 점차 증가하고 있는 것으로 나타났다. 모암이 편마암인 풍화토층에서 사면경사에 따라 풍화토층의 깊이가 3 m 일 때, 임계심도는 3 m로 나타났으며, 풍화토층의 깊이가 5 m 일 때, 3.45 m에서 3.76 m, 그리고 풍화토층의 깊이가 7 m 일 때, 3.02 m에서 3.77 m의 임계심도를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 4a). 모암이 화강암인 풍화토층에서 사면경사에 따라 풍화토층의 깊이가 3 m 일 때, 임계심도는 1.96 m에서 2.40 m, 풍화토층의 깊이가 5 m 일 때, 1.75 m에서

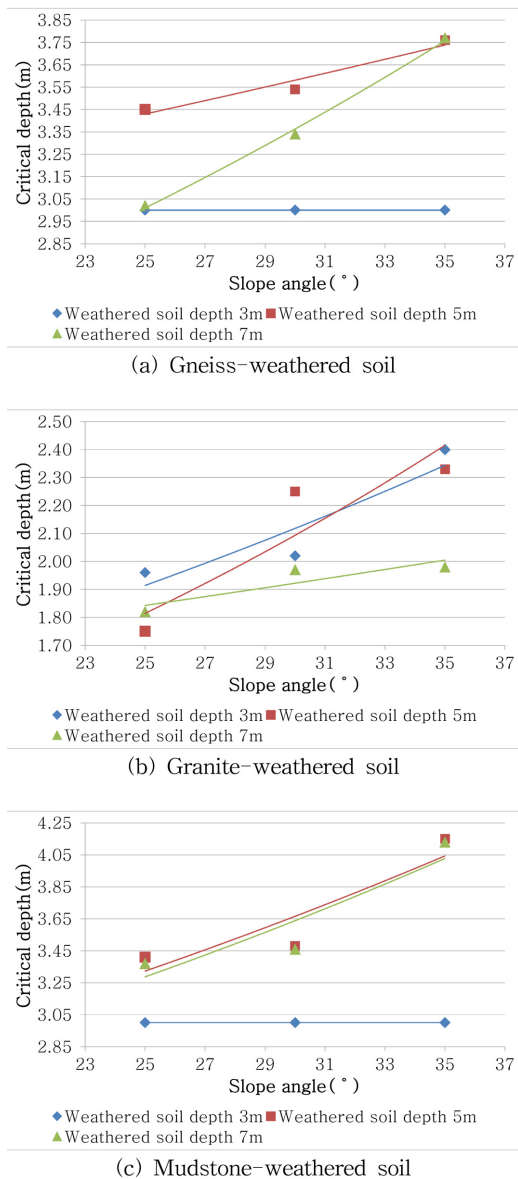


Fig. 4. Correlation of slope angle and critical depth along with weathered soil depth.

2.33 m, 그리고 풍화토층의 깊이가 7m일 때, 1.82 m에서 1.98 m의 임계심도를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 4b). 모암이 이암인 풍화토층에서 사면경사에 따라 풍화토층의 깊이가 3 m 일 때, 임계심도는 3 m로 나타났으며, 풍화토층의 깊이가 5 m 일 때, 3.41 m에서 4.15 m, 그리고 풍화토층의 깊이가 7 m일 때, 3.37 m에서 4.13 m의 임계심도를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 4c). 화강

암 풍화토의 붕괴 임계심도가 편마암이나 이암 풍화토보다 상대적으로 적은 이유는 앞서 설명한 것과 같이 상대적으로 낮은 점착력과 투수계수 등의 인자들에 의한 것으로 판단되었다.

결론

본 연구는 지질별 풍화토층의 심도별 붕괴 불연속면 및 전단면을 파악하기 위하여 붕괴 임계심도를 고려한 산사태 발생 유형 분석을 수행하였다. 붕괴 임계심도 분석결과 강우강도 및 사면경사 증가에 따라 편마암 풍화토는 임계심도가 3.00 m에서 3.77 m로 증가하였고, 화강암 풍화토는 임계심도가 1.75 m에서 2.40 m로 증가하였으며, 이암 풍화토는 3.00 m에서 4.15 m로 증가하였다. 이는 사면경사와 강우강도가 증가함에 따라 임계심도가 증가하며, 풍화토층의 심도가 클수록 임계심도 역시 증가한다고 판단되었다. 또한, 편마암과 이암풍화토와 비교하여 화강암 풍화토가 상대적으로 낮은 임계심도를 나타내었는데, 이는 화강암 풍화토의 점착력과 투수계수 등의 인자가 다른 풍화토에 비하여 낮은 것에 기인한다.

경사와 지질별 붕괴 임계심도와와의 상관관계에서는 모암이 편마암인 풍화토층에서 사면경사에 따라 풍화토층의 깊이가 3 m에서 7 m로 증가할 때, 최저 3 m에서 최고 3.77 m 이내의 임계심도를 보이며, 모암이 화강암인 경우 풍화토층의 깊이가 3 m에서 7 m로 증가할 때, 최저 1.96 m에서 최고 2.40 m 이내의 임계심도를 보였다. 그리고 모암이 이암인 경우 풍화토층의 깊이가 3 m에서 7 m로 증가할 때, 최저 3 m에서 최고 4.15 m의 임계심도를 나타내었다. 분석결과 사면의 경사가 증가함에 따라 붕괴 임계심도가 점차 증가되는 것을 알 수 있었으며, 화강암 풍화토의 붕괴 임계심도가 편마암이나 이암 풍화토 보다 상대적으로 적은 이유는 앞서 설명한 것과 같이 상대적으로 낮은 점착력과 투수계수 등의 인자들에 의한 것에 기인한다.

사사

이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단·공공복지안전연구사업의 지원을 받아 수행된 연구로(과제번호 : 2012M3A2A1050976) 이에 감사드립니다.

References

- Bishop, A. W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Chae, B. G., Lee, S. H., Song, Y. S., Cho, Y. C., and Seo, Y. S., 2007, Characterization on the relationships among rainfall intensity, Slope angle and pore water pressure by a flume test: in case of gneissic weathered soil, *The Journal of Engineering Geology*, 17(1), 57-64 (in Korean with English abstract).
- Chae, B. G., Park, K. B., Park, H. J., Choi, J. H., and Kim, M. I., 2012, Analysis of slope stability considering the saturation depth ratio by rainfall infiltration in unsaturated soil, *Journal of Engineering Geology*, 22(3), 343-351 (in Korean with English abstract).
- Collins, B. D. and Znidarcic, D., 2004, Stability analyses of rainfall induced landslides, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, New-York, 130(4), 362-372.
- Fredlund, D. G. and Xing, A., 1994, Equations for the soil water characteristic curve, *Canadian geotechnical journal*, 31(4), 521-532.
- Jung, S. S., Choi, J. Y., and Lee, J. H., 2009, Stability analysis of unsaturated weathered soil slope considering rainfall duration, *Korean Society of Civil Engineers*, 29(1), 1-9 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. H., 2002, Stability analysis on unsaturated weathered infinite slopes based on rainfall-induced wetting, MSc Thesis, Yonsei University, 1-90 (in Korean with English abstract).
- Mein, R. G. and Larson, C. L., 1973, Modeling infiltration during a steady rain, *Water Resource Research*, 9(2), 384-394.
- National Disaster Management Institute (NDMI), 2011, GIS-based stability analysis system of steep slope, Research report, National Institute of Disaster Prevention, 1-156 (in Korean).
- National Disaster Management Institute (NDMI), 2012, GIS-based warning system for steep slope, Research report, National Institute of Disaster Prevention, 1-140 (in Korean).
- Ng, C. W. W. and Shi, Q., 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, *Comput. Geotech.*, 22(1), 1-28.
- Pradel, D. and Raad, G., 1993, Effect of permeability on the surficial stability of homogeneous slopes, *Journal of Geotechnical Engineering and Geoenvironmental Engineering*, 119(2), 315-332.
- Rahardjo, H. and Lim, T. T., Chang, M. F., and Fredlund, D. G., 1995, Shear strength characteristics of a residual soil with suction, *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1), 60-77.
- Song, Y. S., 2013, Stability analysis of the unsaturated infinite slope considering suction stress under steady infiltration condition, *Journal of the Korean geotechnical society*, 29(9), 5-15 (in Korean with English abstract).
- van Genuchten, M. Th., 1980, A closed form equation for predicting hydraulic conductivity in unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.

남경훈

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-7735
Fax: 054-822-5467
E-mail: namsoil@naver.com

김민규

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-7735
Fax: 054-822-5467
E-mail: kmgju0505@naver.com

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@anu.ac.kr