The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 31, No. 2, June, 2021, pp. 165-178
https://doi.org/10.9720/kseg.2021.2.165

RESEARCH ARTICLE

불포화 자연사면의 안정해석시 흙-함수특성곡선 맞춤계수의 영향

김재홍[1] · 유용재[2] · 송영석[3*]

[1]동신대학교 토목환경공학과 교수, [2]동신대학교 토목환경공학과 석사졸업생,
[3]한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지질환경재해연구센터장

The Influence of Fitting Parameters on the Soil-Water Characteristics Curve in Stability Analysis of an Unsaturated Natural Slope

Jae-Hong Kim[1] · Yong-Jae Yoo[2] · Young-Suk Song[3*]

[1]Professor, Department of Civil Engineering, Dongshin University
[2]Master's Graduate, Department of Civil Engineering, Dongshin University
[3]Head of Geo-environmental Hazard Research Center, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

The influence of Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) fitting parameters for an unsaturated natural slope was evaluated through seepage and slope stability analysis as a function of rainfall. Soil samples were collected from the study area in Jirisan National Park and the physical and mechanical characteristics of unsaturated soil layers were measured in laboratory tests. The saturation depth was calculated via seepage analysis by changing fitting parameters α, the parameter related to the Air Entry Value (AEV) and n, the parameter related to the slope of the SWCC in the range of natural conditions. Slope stability analysis using the limit equilibrium method considered the calculated depth of saturation. Results from seepage analysis for various rainfall conditions indicate the saturation depth in the soil layer suddenly increased as the fitting parameter α decreased; the saturation time for the entire soil layer also decreased. Slope stability analysis considering the calculated depth of saturation shows that the slope safety factor rapidly decreased as the fitting parameter α decreased, whereas the variation in slope safety factor was very small when n increased. Hence, fitting parameter α has a large effect on saturation depth during rainfall and therefore on slope stability, whereas slope stability is relatively unaffected by the fitting parameter n.

Keywords: Soil-Water Characteristic Curve, fitting parameter, seepage analysis, saturation depth, safety factor of slope, natural slope

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Young-Suk Song
E-mail: yssong@kigam.re.kr

Received: 17 March, 2021
Accepted: 24 May, 2021

Ⓒ 2021 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/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

자연사면을 대상으로 강우에 따른 침투해석 및 사면안정해석을 통하여 사면토층의 흙-함수특성곡선(SWCC) 맞춤계수에 따른 안정성의 영향을 평가하였다. 연구 대상사면의 토질시료를 채취하여 토층의 물리적, 역학적 및 불포화 특성을 실험하였다. 현장조건의 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α 및 n을 변화시켜 침투해석을 통한 포화심도를 산정하였으며, 이를 고려하여 한계평형해석기법을 이용한 사면안정해석을 수행하였다. 강우에 의한 침투해석 결과에 따르면 맞춤계수 α가 감소함에 따라 토층 내

포화심도가 급격하게 증가하며, 전체 토층에 대한 포화시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 그리고 포화심도를 고려한 사면안정해석결과에 의하면 맞춤계수 α가 감소함에 따라 사면안전율은 급격하게 감소하지만, 맞춤계수 n을 증가시키더라도 사면안전율의 변화는 매우 작은 것으로 나타났다. 따라서 강우침투로 인한 포화심도와 이를 고려한 사면안정성은 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α에 크게 영향을 받으며, 맞춤계수 n의 영향은 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다.

주요어: 흙-함수특성곡선, 맞춤계수, 포화깊이, 사면안전율, 자연사면

서 론

기존에는 사면안정해석시 지반을 포화토 혹은 건조토로 가정하여 수행하였다. 이러한 이유는 지반을 포화토로 가정하여 사면안정해석을 수행할 경우 비교적 간단할 뿐만 아니라 안전측 설계가 가능하기 때문이다. 또한 강우시 사면파괴 메카니즘은 강우로 인하여 토층 내 지하수위가 상승하면서 간극수압이 증가하고, 이로 인하여 전단강도가 감소하면서 사면이 파괴에 이르는 것으로 알려져 있었다. 그러나 이후 연구에 의하면 자연사면에서 발생되는 사면파괴의 경우 강우 침투로 인한 지하수위의 상승에 대한 영향은 거의 받지 않는 것으로 밝혀졌다. 대신에 강우 침투로 인하여 진행되는 습윤전선 형성과 하강, 그리고 임계파괴 깊이의 도달로 인하여 자연사면에서 얕은 사면파괴가 발생하는 것으로 확인되었다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Ng and Shi, 1998; Song and Hong, 2011; Kim et al., 2013). 즉, 강우의 침투로 인하여 지표면으로부터 포화가 진행되면서 토층 내 음의 간극수압(negative pore water pressure)이 감소되고, 이에 따라 지표면에서부터 토층 내 포화깊이까지 전단강도가 감소하게 된다. 이러한 강우침투로 인한 상부토층에서의 포화가 자연사면에서 얕은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있다(Godt et al., 2006; Lu et al., 2013; Song et al., 2016; Park and Song, 2020).

앞서 설명한 바와 같이 강우로 인하여 사면토층 내 음의 간극수압의 감소와 이에 따른 전단강도 감소를 수치해석을 통하여 구현하기 위해서는 불포화토에 대한 이론적 접근이 필수적이다. 불포화토의 이론적 개념을 바탕으로 지반의 거동을 예측하기 위해서는 불포화토의 특성에 대한 이해가 필요하다. 불포화토의 특성을 가장 잘 설명할 수 있는 것이 바로 흙-함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)이다. 흙-함수특성곡선(SWCC)은 모관흡수력과 포화도 또는 체적함수비 사이의 상관관계를 나타낸 것으로 불포화토 내에서 물의 흐름 특성과 불포화토의 강도 및 응력거동 특성을 해석하는데 필수요소로 활용된다. 따라서 정확한 흙-함수특성곡선의 측정 및 산정없이 불포화토의 특성을 파악하는 것은 불가능하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 자연사면에서 발생되는 얕은 사면파괴를 수치해석을 통하여 구현하고, 수치해석의 입력자료로 적용되는 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수가 불포화 사면안정해석에서 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다. 이를 위하여 먼저 국내 자연사면을 대상으로 지형분석을 실시하고 대상지역에서 토질시료를 채취하였다. 현장에서 채취한 시료를 대상으로 물리적 및 역학적 특성을 조사하고 흙-함수특성곡선(SWCC)을 산정하였다. 특히 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수(fitting parameter)에 따른 사면안정성을 평가하기 위하여 맞춤계수를 변화시켜 사면안정해석을 수행하였으며, 이를 토대로 자연사면에서의 얕은 사면파괴에 대한 안정해석을 수행하는 경우 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수에 대한 영향을 고찰하였다.

현장개요

대상지역 및 지질특성

Fig. 1은 연구 대상지역의 위치를 나타낸 것으로 경상남도, 전라북도 및 전라남도의 경계에 지리산국립공원 내에 위치하고 있으며, 행정구역상 경상남도 산청군 시천면 중산리 일대이다. 지리산국립공원의 경우 2000년 이후 지리산 천왕봉을 중심으로 36개의 산사태가 발생된 것으로 조사되었다(KIGAM, 2019).

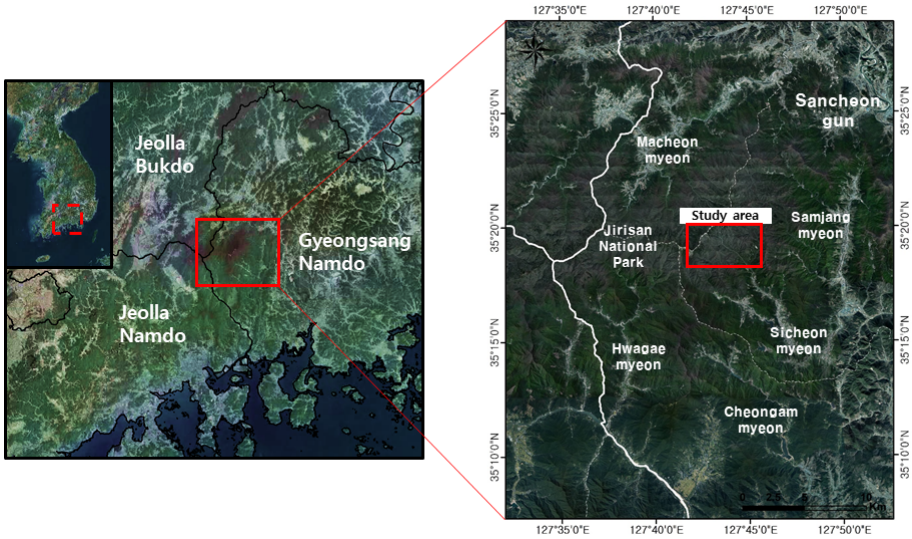


Fig. 1. Location of study area.

Fig. 2는 연구 대상지역의 지질도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 편마암류가 넓게 분포하고 있으며, 지리산 중산리 일대에는 주로 시생대의 화강암질편마암, 반상변정질편마암, 안구상편마암, 혼성편마암, 호상편마암, 흑운모편마암, 정편마암, 준편마암 등으로 구성되어 있다. 연구 대상지역에는 주로 화강암질편마암이분포하고 있음을 알 수 있다.

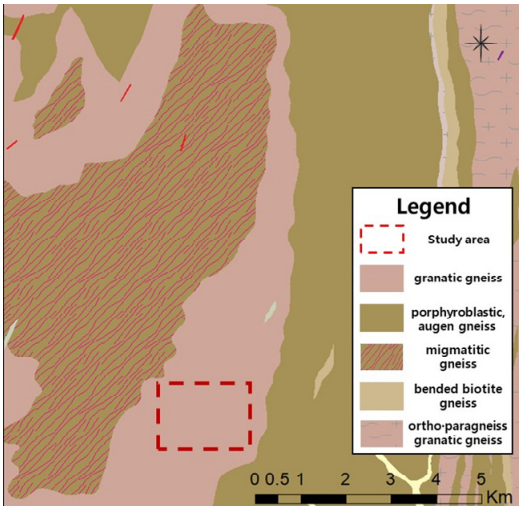


Fig. 2. Geological map of study area.

연구 대상지역의 사면토층에 대한 지반공학적 특성을 조사하고 불포화 특성을 산정하기 위하여 교란 및 비교란 시료를 채취하였다. 시료 채취위치는 연구 대상지역 범위 내에 존재하며 위도 35°17’3.77”N, 경도 127°43’22.70”E이다. 토질시료는 지표면으로부터 약 10~20 cm의 토층을 제거한 후 채취하였으며, 채취된 토질시료는 화강암질 편마암류에 속하는 편마암 풍화토에 해당한다.

강우특성

연구 대상지역인 경상남도 산청군 지역의 강우자료를 조사하여 강우특성을 살펴보았다. 기상청의 과거 약 45년 동안 자료(1972~2018)를 조사한 결과 경상남도 산청군 지역의 최대강우강도는 84.5 mm/hr로서 2004년에 발생되었다. 그리고 2011년에는 62.5 mm/hr, 2012년에는 60.5 mm/hr 그리고 2018년에는 60.5 mm/hr의 집중호우가 발생되었으며, 연구 대상지역의 경우 시간당 60 mm/hr 이상의 강우가 지속적으로 발생하고 있는 것으로 나타났다. 또한 시간당 30 mm/hr 이상의 집중호우에 대한 발생빈도도 30회 이상인 것으로 나타났으며, 2010년 이후에는 거의 매년 집중호우가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 3은 과거 약 45년 동안 자료를 분석하여 30 mm/hr 이상 집중호우가 발생된 연도의 최대강우강도를 나타낸 것이다.

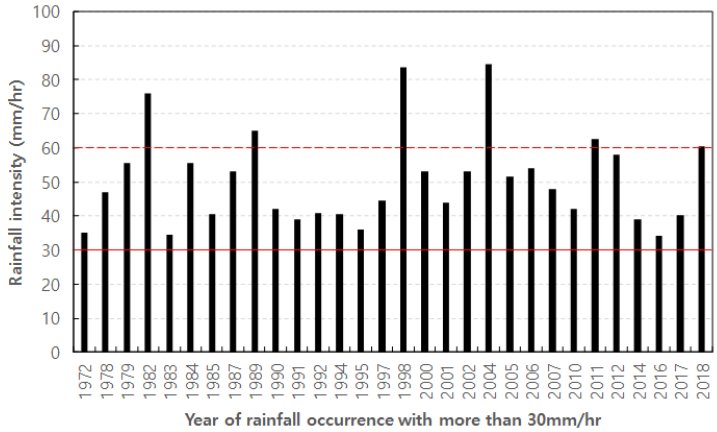


Fig. 3. Analysis result of rainfall data (Sancheong-gun) for the past 45 years (1972~2018).

토질의 공학적 특성

앞서 설명한 바와 같이 연구 대상지역에서 교란 및 불교란 시료를 채취하여 흙의 물리적 및 역학적 특성을 조사하기 위한 토질시험을 수행하였다. 흙의 물리적 특성을 조사하기 위하여 비중시험(ASTM D854, 2014), 액성 및 소성한계시험(ASTM D4318, 2017), 단위중량시험(ASTM D7263, 2009), 입도분포시험(ASTM D6913, 2017)을 수행하였다. 또한 흙의 역학적 특성인 전단강도와 포화투수계수를 산정하기 위하여 직접전단시험(ASTM D3080, 2011)과 삼축투수시험(ASTM D5084, 2000)을 수행하였다. Table 1은 연구 대상지역의 토질시료에 대한 물리적 및 역학적 특성을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 흙의 유효입경(D_{10})은 3.7×10^{-4} m, 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_g)는 각각 6.24와 1.18로 나타났으며, 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)상에 입도분포가 좋은 모래(SW)로 구분되었다. 한편 직접전단시험 결과로부터 산정된 흙의 점착력(c)은 10.27 kPa이며, 내부마찰각(ϕ)은 24.98°로 나타났다. 또한 흙의 포화투수계수(k_s)는 5.7×10^{-7} m/sec로 산정되었다.

Table 1. Engineering properties of soil in study area

Soil properties	Symbol	Unit	Values
Specific gravity	G_s	-	2.72
Natural moisture contents	w	(%)	27.49
Total unit weight	γ_t	(kg/m^3)	1.66×10^3
Dry unit weight	γ_d	(kg/m^3)	1.30×10^3
Effective grain size	D_{10}	(m)	3.7×10^{-4}
Coefficient of uniformity	c_u	-	6.24
Coefficient of curvature	c_g	-	1.18
Liquid limit	LL	(%)	49.92
Plastic limit	PL	(%)	25.78
Unified Soil Classification System	USCS	-	SW
Cohesion	c	(kPa)	10.27
Internal frictional angle	ϕ	(°)	24.98
Coefficient of permeability	k_s	(m/sec)	5.70×10^{-7}

토질의 불포화 특성

연구 대상지역의 토질에 대한 흙-함수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흙-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 흙-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

모관흡수력과 간극수량 측정결과

Fig. 4는 모관흡수력의 재하시 단계별 간극수의 유출량을 나타낸 것으로, 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정을 재현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모관흡수력은 단계별로 적용하였고, 일정단계 모관흡수력 수준에서 간극수의 유출은 증가하다가 수렴되었으며, 간극수의 유출이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 적용하였다.

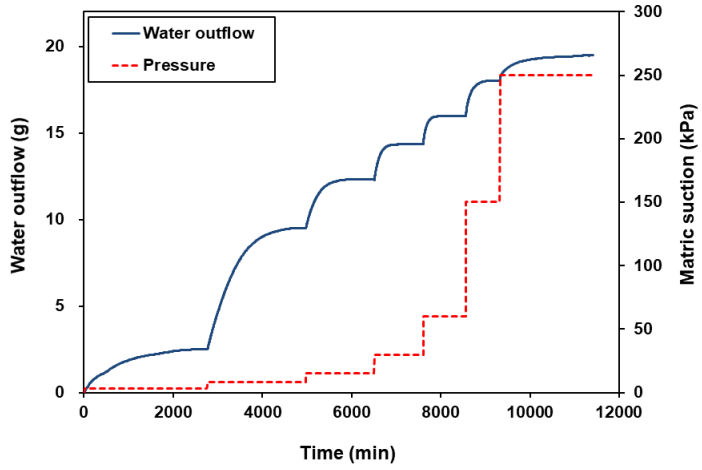


Fig. 4. Pore water outflow for various matric suctions.

흙-함수특성곡선의 산정

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten(1980)방법을 이용하여 흙-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 식 (1)은 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 흙-함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha (u_a - u_w)^n]} \right]^m \tag{1}$$

여기서, S_e는 유효포화도, θ는 체적함수비, θ_s는 포화체적함수비, θ_r은 잔류체적함수비, u_a는 간극공기압, u_w는 간극수압, α는 공기함입치과 관련된 계수, n은 변곡점의 경사에 관련된 계수, 그리고 m은 잔류함수비에 관련된 계수($= 1 - 1/n$)이다.

측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 비선형 최소제곱법을 적용하여 van Genuchten(1980) 모델의 흙-함수특성곡선(SWCC) 맞춤계수인 α, n 및 m을 산정하였다. 산정결과의 신뢰도를 나타내는 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 0.99로 매우 높게 나타났으며, 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수는 Table 2와 같이 나타내었다.

Table 2. SWCC fitting parameters by van Genuchten (1980) model

Contents	Symbol	Value
Fitting parameter	α (kPa^{-1})	0.21
	n	1.81
	m	0.45
Coefficient of determination	R^2	0.99
Saturated volumetric water content	θ_s	0.52
Residual volumetric water content	θ_r	0.27
Air Entry Value	AEV	2.46

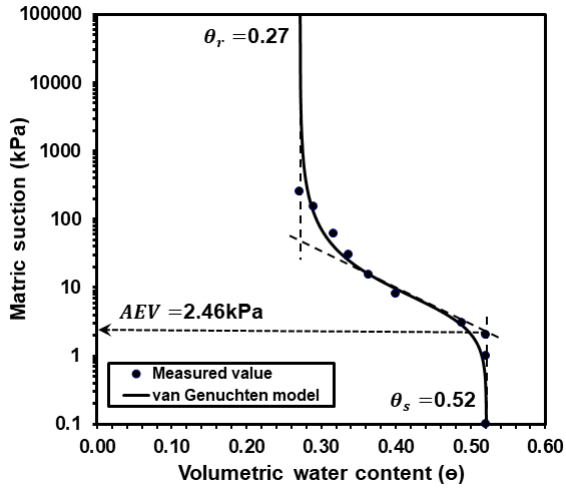


Fig. 5. Estimation of SWCC using van Genuchten (1980) model.

Fig. 5는 van Genuchten(1980) 모델을 적용하여 도시한 흙-함수특성곡선(SWCC)을 나타낸 것이다. 흙-함수특성곡선(SWCC)으로부터 산정된 포화체적함수비(θ_s)는 0.52, 잔류체적함수비(θ_r)는 0.27이며, 공기함입치(AEV)는 2.46로 나타났다.

맞춤계수에 따른 불포화 사면의 안정성 평가

맞춤계수의 범위선정

흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수에 따른 불포화 사면의 안정성을 평가하기 위하여 실험으로 산정된 흙-함수특성곡선(SWCC)과 Lu et al.(2010)이 제안한 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 범위를 활용하였다. 앞서 설명한 바와 같이 맞춤계수 m은 n과 관련되어 있으므로, 본 연구에서는 맞춤계수 α 및 n을 수정하여 흙-함수특성곡선을 다시 선정하였다. Fig. 6은 Lu et al.(2010)이 제안한 흙의 종류에 따른 맞춤계수 α 및 n의 범위를 제시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 맞춤계수 α는 흙의 종류에 따라 0.001~1 범위에 있으며, 맞춤계수 n은 1~8.5 범위에 존재하고 있다. 이에 따르면 맞춤계수 α 및 n에 의한 흙의 종류는 점토질 모래에 해당하는 것으로 나타났다.

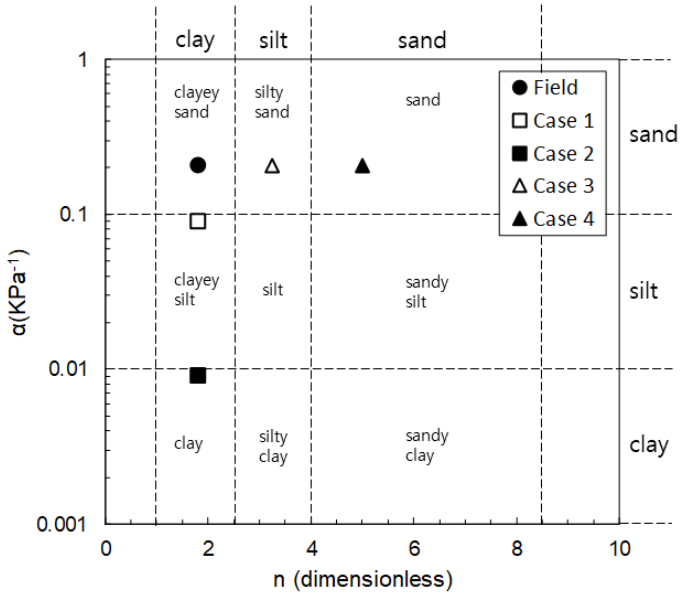


Fig. 6. Adjustment of SWCC fitting parameters considering soil type (modified from Lu et al., 2010).

Fig. 6은 연구지역의 토질에 대한 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α 및 n을 기준으로 흙의 종류별로 구분되도록 맞춤계수를 조절한 것이다. 즉, 연구지역 토질의 맞춤계수 n를 고정시키고, 맞춤계수 α를 조절하여 점토질 실트(Case 1) 및 점토(Case 2)에 해당되도록 하였다. 또한, 연구지역 토질의 맞춤계수 α를 고정시키고, 맞춤계수 n을 조절하여 실트질 모래(Case 3) 및 모래(Case 4)에 해당되도록 하였다. Table 3은 본 연구에서 선정한 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수에 따른 흙의 종류와 이때의 α 및 n의 값을 나타낸 것이다. 한편 Fig. 7은 앞서 설명한 연구지역의 토질을 대상으로 맞춤계수를 조절한 경우에 대한 흙-함수특성곡선(SWCC)을 도시한 것이다.

Table 3. Range selection of SWCC fitting parameters according to soil type

Case	Soil type	α (kPa^{-1})	n
Field condition	Clayey sand	0.21	1.81
Case 1	Clayey silt	0.09	1.81
Case 2	Clay	0.01	1.81
Case 3	Silty sand	0.21	3.25
Case 4	Sand	0.21	5.00

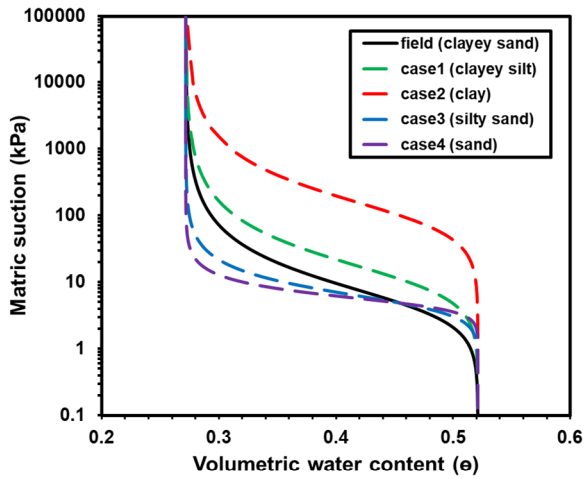


Fig. 7. SWCCs for various soil types.

수치해석을 위한 해석단면 및 경계조건 선정

흙-함수특성곡선 맞춤계수의 변화에 따른 불포화 자연사면에서의 안정성을 평가하기 위해서 먼저 강우로 인한 자연사면 토층에서의 포화깊이를 산정하고 이를 기반으로 한계평형해석기법을 적용하여 사면안정해석을 수행하였다. 본 연구에서 활용된 소프트웨어는 강우침투해석과 이를 연계한 사면안정해석이 가능한 Geo-Slope International Ltd.(2016a, 2016b)에서 개발된 GeoStudio의 SEEP/W와 SLOPE/W를 활용하였다.

대상지역의 자연사면에 대한 지형조건은 현장의 시료채취 지점을 중심으로 1:5,000축척의 수치지도를 활용하여 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 작성하였다. Fig. 8은 대상지역인 지리산국립공원 내에 위치한 경상남도 산청군 중산리 일대의 수치표고모형(DEM)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대상지역의 수치표고모형(DEM)으로부터 특정단면을 선정하여 해석을 수행하였다. 그리고 대상지역의 토심은 현장조사를 통하여 측정한 결과인 2.5 m를 적용하였으며, 지하수위는 기반암 하부 5 m에 존재하는 것으로 가정하였다. 이를 토대로 불포화 자연사면의 안정성 평가를 위한 해석단면을 선정하였으며, 이는 Fig. 9와 같이 나타내었다.

강우조건은 연구 대상지역의 최대강우강도인 84.5 mm/hr를 적용하였고, 강우지속시간은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 24, 36, 48, 72시간으로 구분하였다. 사면지반의 공학적 특성과 불포화 특성은 Table 1 및 Table 2에서 산정된 값을 적용하였다. 이때 흙-함수특성곡선 맞춤계수는 Table 3에서 선정한 바와 같이 현장조건을 포함한 5가지 경우를 대상으로 적용하였다.

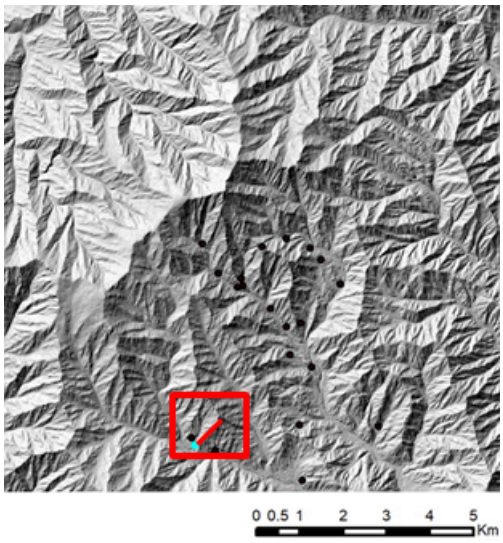


Fig. 8. DEM and analysis section of study area.

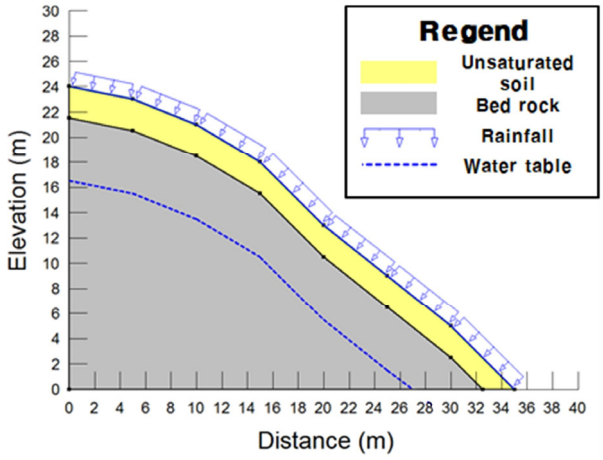
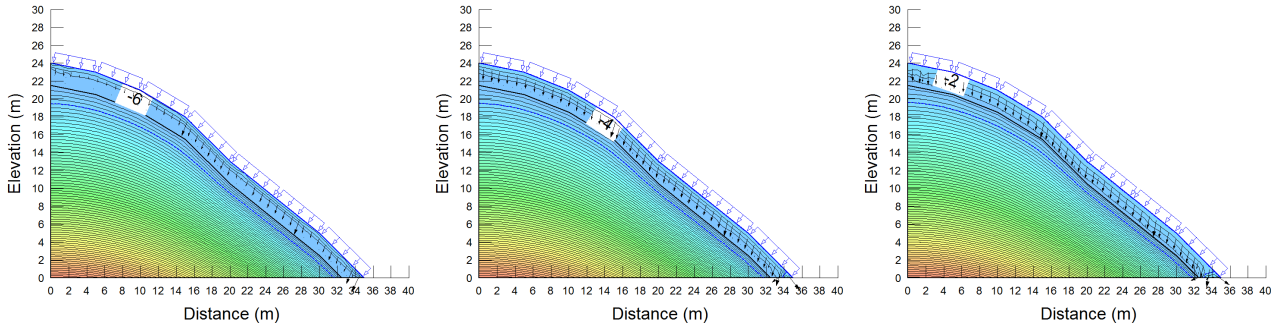


Fig. 9. Cross sectional view for stability analysis of unsaturated natural slope.

침투해석을 통한 포화깊이 산정

강우에 따른 사면에서의 포화깊이를 산정하기 위하여 앞서 제시한 해석단면과 경계조건을 토대로 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수를 변화시켜 침투해석(SEEP/W)을 수행하였다. 침투해석을 통하여 토층 내 간극수압이 공기함입치(AEV)와 유사한 (-)2 kPa까지 도달할 경우 모관흡수력은 최저값이라 판단할 수 있으므로 이때 해당깊이까지 포화되었다고 정의할 수 있으며, 이를 포화깊이로 산정하였다. 강우조건은 강우가 시작되고 1시간부터 72시간까지 12단계로 구분하여 해석을 수행하였다. Fig. 10은 대상지역의 현장조건하에서 흙-함수특성곡선(SWCC) 맞춤계수를 적용한 경우에 대한 침투해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우침투로 인하여 지표면으로부터 지중방향으로 서서히 포화가 진행되어 포화깊이가 확장되는 것으로 나타났다. 즉 지표면에서 습윤전선이 형성되고 지중으로 확장되어 습윤대가 확장되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) After 1 hour (b) After 36 hours (c) After 72 hours

Fig. 10. Seepage analysis results according to elapsed time.

한편, 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수를 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 선정한 4가지 경우에 대한 침투해석을 수행하였다. 강우조건은 대상지역에 대한 침투해석시 적용한 것과 동일하게 하였다. Fig. 11은 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수를 변화에 따른 사면토층에서의 포화깊이를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 현장조건에서의 강우에 따른 포화깊이는 강우발생 후 2시간 경과시점까지 0.07 m에서 0.38 m로 빠르게 증가하다가 이후 36시간 경과시점까지 천천히 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 36시간 경과시점부터 포화깊이는 비교적 빠르게 증가하는 양상을 보이며, 72시간 경과시점에서는 1.01 m의 포화깊이를 갖는 것으로 나타났다.

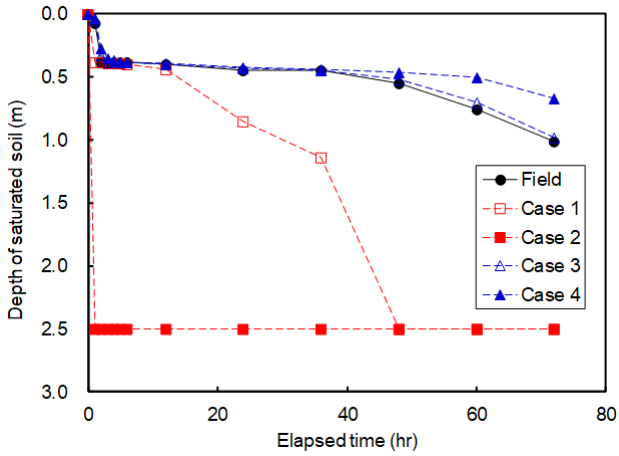


Fig. 11. Variation of saturation depth in the natural slope according to SWCC fitting parameters.

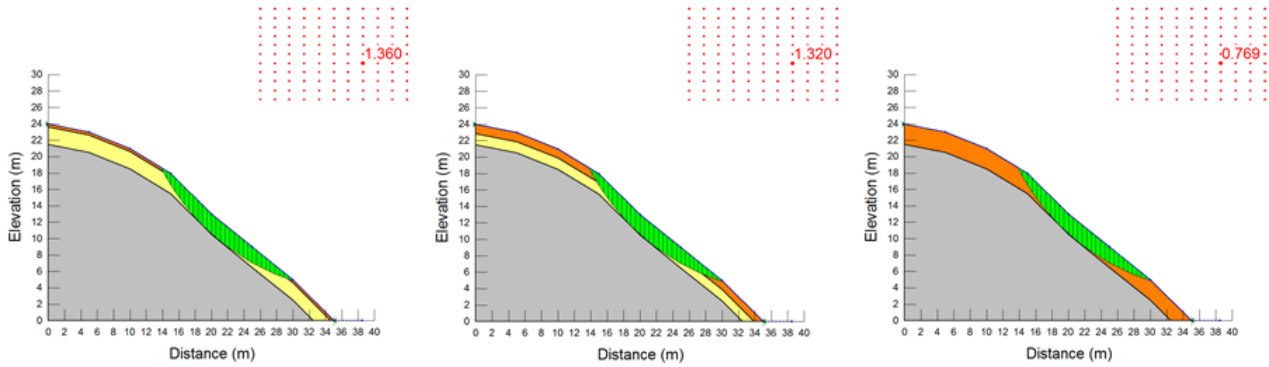
흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수에 따른 영향을 살펴보기 위하여 현장조건($\alpha = 0.21$)을 기준으로 맞춤계수 α를 변화시킨 Case 1($\alpha = 0.09$)과 Case 2($\alpha = 0.01$)를 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 맞춤계수 α가 감소함에 따라 포화심도는 급격하게 증가하며, 2.5 m의 사면토층에 대한 전체 포화시간도 맞춤계수 α가 작을수록 빠른 것으로 나타났다. 한편, 현장조건($n = 1.81$)을 기준으로 맞춤계수 n을 변화시킨 Case 3($n = 3.25$)와 Case 4($n = 5.00$)를 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 맞춤계수 n이 증가함에도 불구하고 강우발생 후 36시간 경과시점까지 유사한 포화심도를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 36시간 경과시점부터 맞춤계수 n이 증가함에 따라 포화심도는 감소하는 것으로 나타났으나 그 차이는 약 0.3 m로 비교적 적은 것으로 나타났다.

이상과 같이 수치해석을 통하여 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α와 n에 따른 강우시 포화깊이를 분석한 결과 자연사면에서의 포화깊이는 맞춤계수 α에 큰 영향을 받으며, 상대적으로 맞춤계수 n의 영향은 작은 것으로 나타났다.

포화깊이를 고려한 사면안정해석

흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수를 변화시키며 강우에 따른 사면에서의 포화깊이를 산정하였고, 이를 토대로 사면안정해석(SLOPE/W)을 수행하였다. 사면안정해석은 원호파괴형태의 한계평형해석기법 가운데 Bishop의 간편법(Bishop, 1959)을 적용하였다. 또한 사면안정해석은 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 변화에 따라 포화깊이를 산정한 시간과 동일하게 수행하였다.

Fig. 12는 현장조건을 기준으로 맞춤계수 α를 0.09로 조정한 Case 1을 대상으로 포화깊이를 고려하여 사면안정해석을 수행한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간에 따라 강우침투로 인한 포화깊이가 증가되고 이로 인하여 사면안전율이 감소됨을 알 수 있다.



(a) After 1 hour (b) After 36 hours (c) After 72 hours

Fig. 12. Slope stability analysis results considering saturation depth.

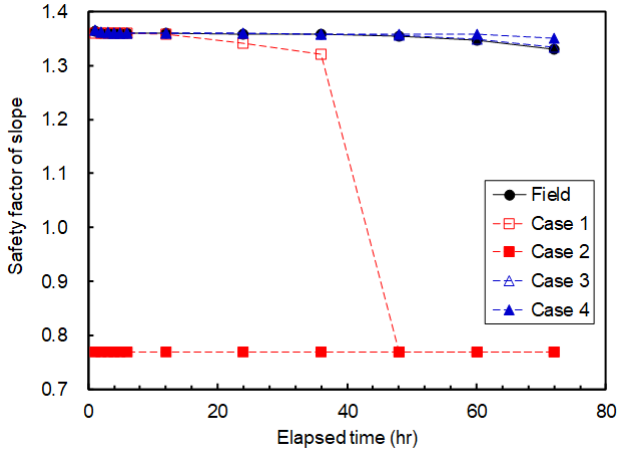


Fig. 13. Variation of safety factors of slope according to SWCC fitting parameters.

흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수를 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 앞서 산정된 포화깊이를 활용하여 사면안정해석을 수행하였다. Fig. 13은 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 변화에 따른 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 현장조건의 맞춤계수를 적용한 사면안전율은 강우발생 후 36시간 경과시점까지 1.36으로 일정하게 유지되다가 이후 조금씩 사면안전율이 감소하는 것으로 나타났으며, 72시간 경과시점에서의 사면안전율은 1.33으로 나타났다. 즉 대상지역의 자연사면의 경우 해당 강우강도 조건에서는 사면붕괴의 위험성이 낮은 것으로 나타났다.

흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수에 따른 사면안전율 변화를 살펴보기 위하여 현장조건(α = 0.21)을 기준으로 맞춤계수 α를 변화시킨 Case 1(α = 0.09)과 Case 2(α = 0.01)를 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 맞춤계수 α가 감소함에 따라 사면안전율은 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 맞춤계수 α가 0.01인 Case 2의 경우 강우발생 후 1시간 이내에 사면안전율은 0.77로 사면붕괴가 발생되는 것으로 나타났다. 또한 맞춤계수 α가 0.09인 Case 1의 경우에도 강우발생 후 36시간 경과시점까지 사면안전율은 서서히 감소하다가 이후 급속하게 감소되어 약 44시간 경과시험에서는 사면안전율 1.0 이하로 감소하였다.

한편, 현장조건(n = 1.81)을 기준으로 맞춤계수 n을 변화시킨 Case 3(n = 3.25)와 Case 4(n = 5.00)의 경우에 대한 사면안전율 변화를 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 맞춤계수 n이 증가하더라도 사면안전율의 차이가 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다. 다만, 강우발생 후 48시간 경과시점부터 사면안전율의 차이가 조금씩 발생되고 있으나 매우 미소한 것으로 나타났다. 최종적으로 72시간 경과시점에서도 현장조건에서의 사면안전율보다 0.003에서 0.02로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

이상과 같이 포화깊이를 고려한 사면안정해석을 통하여 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α와 n에 따른 영향을 분석한 결과 자연사면에서의 안정성은 맞춤계수 α에 큰 영향을 받으며, 맞춤계수 n의 영향은 매우 작은 것으로 나타났다. 맞춤계수 α의 경우 공기함입치와 관련된 계수로서 불포화토의 공기함입치는 불포화 사면에서의 안정성에 가장 크게 영향을 미치는 값임을 확인할 수 있다.

결 론

자연사면을 대상으로 강우에 따른 침투해석 및 사면안정해석을 통하여 사면토층의 흙-함수특성곡선(SWCC) 맞춤계수에 따른 영향을 평가하였다. 이를 위하여 연구대상사면을 선정하고 시료를 채취하여 토층의 물리적, 역학적 및 불포화 특성을 측정하였다. 이때 선정된 현장조건의 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수를 변화시켜 침투해석을 통한 포화심도를 산정하고, 이를 고려하여 사면안정해석을 수행하였다. 이를 토대로 자연사면의 안정성에 대하여 흙-함수특성곡선(SWCC) 맞춤계수의 영향을 검토하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

(1) 연구 대상지역은 지리산국립공원 내에 위치하고 있으며, 화강암질 편마암이 주로 분포하는 지역이다. 대상사면의 토층심도는 평균적으로 2.5 m이며, 토질은 편마암 풍화토로서, 통일분류법(USCS)상 입도분포가 양호한 모래(SW)로 구분된다.

(2) 대상사면 토층의 불포화 특성을 구하기 위하여 van Genuchten(1980) 모델을 적용하였으며, 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α, n 및 m은 각각 0.21, 1.81 및 0.45로 산정되었다.

(3) 흙-함수특성곡선(SWCC) 맞춤계수 α 및 n은 대상사면의 현장 토질조건(점토질 모래)을 기준으로 흙의 종류가 변화되도록 조절하였다. 맞춤계수 α 및 n을 변화시킴으로서 다른 불포화특성을 가진 흙(실트질 모래, 모래, 점토질 실트, 점토)으로 구성된 자연사면에 대한 해석이 가능하다.

(4) 대상사면에 대한 강우시 침투해석결과에 따르면 맞춤계수 α가 감소함에 따라 토층 내 포화심도가 급격하게 증가하며, 전체 토층에 대한 포화시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 그러나 맞춤계수 n이 증가함에 따라 토층 내 포화

심도는 감소하지만 감소량은 작게 발생되었다.

(5) 강우 침투해석결과인 포화심도를 적용하여 사면안정해석을 수행한 결과 맞춤계수 α가 감소함에 따라 사면안전율은 급격하게 감소하지만, 맞춤계수 n을 증가시키더라도 사면안전율의 변화는 크지 않음을 알 수 있다.

(6) 강우침투로 인한 포화심도와 이를 고려한 사면안정성은 흙-함수특성곡선(SWCC)의 맞춤계수 α에 크게 영향을 받으며, 맞춤계수 n의 영향은 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “실시간 도시지역 산사태 조기경보기술 및 지질환경 오염물질 위험관리기술 개발(21-3412-1)”과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

ASTM D3080 2011, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D4318 2017, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D5084 2000, Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D6913 2017, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D7263 2009, Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D854 2014, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bishop, A.W., 1959, The principle of effective stress, Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk, 106(39), 859-863.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993, Soil mechanics for unsaturated soils, Wiley, New York, 544p.

Geo-Slope International Ltd., 2016a, Seepage Modeling with GeoStudio (SEEP/W), Calgary, Canada.

Geo-Slope International Ltd., 2016b, Stability Modeling with GeoStudio (SLOPE/W), Calgary, Canada.

Godt, J.W., Baum, R.L., Chleborad, A.F., 2006, Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA, Earth Surface Processes and Landforms, 31(1), 97-110.

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) 2019, Landslide early warning and risk control technology of geo-environmental hazards for climate change adaption, Report No. GP2017-019-2019, Ministry of Science and ICT of Korea, 455p.

Kim, Y.S., Kim, J.H., Lee, J.K., Kim, S.S., 2013, A study on soil slope stability design considering seepage analysis, Journal of The Korean Geotechnical Society, 29(1), 135-147 (in Korean with English abstract).

Lu, N., Godt, J.W., Wu, D.T 2010, A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil, Water Resources Research, 46, W05515.

Lu, N., Wayllace, A., Oh, S., 2013, Infiltration-induced seasonally reactivated instability of a highway embankment near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA, Engineering Geology, 162, 22-32.

Ng, C.W.W., Shi, Q., 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, Computers and Geotechnics, 22(1), 1-28.

Park, J.Y., Song, Y.S., 2020, Laboratory experiment and numerical analysis on the precursory hydraulic process of rainfall-induced slope failure, Advances in Civil Engineering, 2020, 2717356.

Song, Y.S., Chae, B.G., Lee, J.T., 2016, A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall, Engineering Geology, 210, 84-92.

Song, Y.S., Hong, W.P., 2011, Analysis of slope stability with consideration of the wetting front and groundwater level during rainfall, The Journal of Engineering Geology, 21(1), 25-34 (in Korean with English abstract).

Song, Y.S., Hwang, W.K., Jung, S.J., Kim, T.H., 2012, A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions, Engineering Geology, 124, 90-97.

van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.