

세립분 함량을 고려한 국내 화강풍화토의 건조 및 습윤 함수특성곡선 분석

Soil-Water Characteristic Curves for Drying and Wetting Processes in Granite-Weathered Soil Based on Variations in Fine Contents

이 상 빈¹ Lee, Sangbeen 유 재 은² Ryou, Jae-Eun
서 진 욱³ Seo, Jinuk 정 종 원⁴ Jung, Jongwon

Abstract

In current slope stability analysis techniques, slope stability is evaluated based on the saturated-soil theory. However, soil-water characteristics change frequently depending on the climate. Therefore, because the saturated soil theory has limitations, the application of the unsaturated soil theory is necessary for slope stability. It is also important to evaluate the engineering properties of unsaturated soil because the capillary absorption capacity is reduced due to heavy rain, thereby causing a reduction in slope stability. In this study, soil-water characteristic tests were performed using four samples with different fine contents (0%, 10%, 20%, and 30%) using granite-weathered soil in domestic production areas. In particular, to consider the previously conducted drying process as well as the evaluation of stability due to heavy rain on the actual slope, a wetting process was conducted, in which the water content was increased. In addition, the van Genuchten (1980) model, which is the most consistent theoretical equation for the experiment, was used with various theoretical equations, and the parameters were analyzed according to the fine content of the granite-weathered soil for the drying and wetting processes.

요 지

기존의 사면안정해석은 포화토 이론에 기반하여 비탈면 안정성에 대한 평가가 진행되었다. 그러나 자연 지반은 기후에 따라 함수 특성이 변화하기 때문에 포화토 이론은 한계가 있어 불포화토의 특성을 고려한 안정해석 연구가 필요하다. 또한, 실제 불포화토 지반은 호우로 인해 모관흡수력이 감소하여 사면 안정성의 저감을 유발하기 때문에 이에 대한 공학적 특성을 평가하는 것이 중요한 실정이다. 본 연구에서는 국내 산지에 내포된 화강풍화토를 활용하여 세립분 함량을 0%, 10%, 20%, 30%로 구분한 4가지 시료를 통해 흡-함수 특성 시험을 수행하였으며, 특히 건조과정 뿐만 아니라 실제 사면에서 호우로 인한 안정성 평가를 고려하기 위해 함수비를 증가시키는 습윤과정을 진행하였다. 또한, 다양한 이론식을 적용하여 실험에 가장 일치하는 이론식인 van Genuchten(1980) 모델을 활용하였으며, 건조과정과 습윤과정에 대한 화강풍화토의 세립분에 따른 파라미터를 분석하였다.

1 정회원, 충북대학교 토목공학과 석박사통합과정 (Member, Combined MS-Ph.D Student, Dept of Civil Engrg, Chungbuk National Univ.)

2 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, Dept of Civil Engrg, Chungbuk National Univ.)

3 비회원, 한국건설연구소(주) 대표이사 (President, Korea Construction Institute)

4 정회원, 충북대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungbuk National Univ., Tel: +82-43-261-2405, jjung@chungbuk.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근에 이상기후에 인한 집중호우로 인해 사면 파괴 및 산사태 발생이 증가하고 있다. 이러한 사면파괴는 집중호우로 인한 토사 내부침식 및 함수비와 간극수압의 변화로 인해 발생한다. 호우에 따른 간극수압의 증가는 흙의 전단강도 감소를 유발하며 최종적으로 사면붕괴가 발생하게 된다(Lumb, 1962; Lumb, 1975; Moon and Kim, 2011; Hwang et al., 2012; Lee and Yoon, 2015; Lee et al., 2018).

국내사면은 대다수가 지하수위 상부에 존재하며, 증발과 모세관 현상 등에 의해 수분을 일부 포함하고 있는 불포화 상태로 유지된다. 불포화 상태의 사면은 간극수압이 음(-)의 값을 유지하며, 이는 사면의 안정성 유지에 영향을 미친다. 강우로 인해 사면에 도달된 수분은 경사를 따라 유출되거나 지반 내부로 침투된다. 침투된 강우에 의한 함수비의 증가는 흙 입자 사이에 발생하는 모관흡수력(Matric suction)을 감소시키고, 지반이 포화상태로 변화되면 간극수압은 양(+)의 값으로 변화한다. 이러한 현상은 사면의 전단강도를 감소시킨다. 이와 같은 강우에 의한 상부지반의 포화가 얇은 사면파괴의 주원인으로 확인되고 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Ng and Shi, 1998; Godt et al., 2006; Jeong et al., 2009; Song and Hong, 2011; Lu et al., 2013; Kim et al., 2021). 따라서, 불포화토에 대한 침투 양상 파악과 이를 활용한 지반 안정성 평가가 진행되고 있다. 하지만 국내 사면의 흙 특성을 고려한 불포화토의 실험적 분석이 부족한 실정이다. 또한, 강우 시 사면의 안정성 평가를 위해서는 함수비 증가에 따른 모세관 압력의 변화에 대한 이해가 필요하다(Lim and Lyu, 2008; Jung et al., 2015; Song et al., 2016; Oh and Kim, 2021). 하지만, 기존 연구는 포화된 흙이 건조됨에 따른 모세관압력의 변화를 평가하는데 집중되어 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내사면의 흙 조성을 조사 및 분석하여, 다양한 세립분을 포함한 지반의 흙-함수 특성곡선(SWCC, soil water characteristic curve)을 분석하였다. 건조뿐만 아니라 습윤에 따른 흙-함수 특성곡선을 분석 및 비교하였다. 또한, 기존 문헌의 다양한 불포

화토 이론에 기반된 수학적 모델을 적용하여 국내사면에 가장 적합한 이론식을 도출하였다.

2. 연구동향

흙 입자 내에 분포하는 모관흡수력은 불포화 지반의 거동특성에 주요한 영향을 미치는 핵심적인 요소이다. 따라서 불포화토와 관련된 유동 특성, 강도 특성, 그리고 변형 특성을 고려할 때, 모관흡수력의 영향을 신중히 고려해야 한다(Fisher, 2016; Fredlund et al., 1994; Vanapalli et al., 1996; Cho, 2012; Kim et al., 2013). 불포화토 내 함수비에 따른 모관흡수력의 관계는 흙-함수특성곡선인 SWCC(Soil water characteristic curve)으로 대표된다.

불포화토의 특성을 고려하기 위해서는 불포화토의 구성요소인 흙, 물, 공기인 세 가지 구성 요소가 모두 고려되어야 한다. 따라서, 불포화 지반해석에는 중량함수비(W_w/W_s)가 아닌 간극 내 공기를 고려하는 체적함수비(Volumetric water content, V_w/V)로 표현하는 것이 일반적이다(Kim et al., 2013). 흙-함수특성곡선에서 흙 시료 내 함수를 나타내는 x축은 체적함수비(Volumetric water content, θ) 혹은 유효포화도(Effective degree of saturation, S_e)로 표현되며, 시료 내 발생하는 압력을 나타내는 y축은 모관흡수력(Matric suction) 혹은 압력수두(Pressure head)로 표현된다. 흙-함수특성곡선 산출과정 중 초기 상태인 시료의 포화상태에서 모관흡수력이 증가하여도 고유수치인 공기함입값(Air entry value)이 초과하기 전에는 시료 속 간극 내에서 물이 외부로 유출되지 않고, 이 영역을 포화영역(Saturated zone)으로 구분한다. 공기함입값이 측정된 후, 모관흡수력이 증가할수록 흙 속 간극 내 지속적으로 공기가 유입되면서 물이 유출되는 영역을 전이영역(Transition zone)으로 구분한다. 따라서, 공기함입값은 포화영역과 전이영역의 구분을 할 수 있는 매개변수이다. 전이영역 이후 모관흡수력이 증가하여도 간극 내 물이 유출되지 않는 영역을 잔류영역(Residual zone)으로 구분하며, 이 지점에서의 체적함수비를 잔류함수비(Residual water content, θ_r)로 정의한다. 이와 같은 일련의 건조과정(Drying process)을 통해 함수특성곡선이 산출되며 일반적으로 흙-함수특

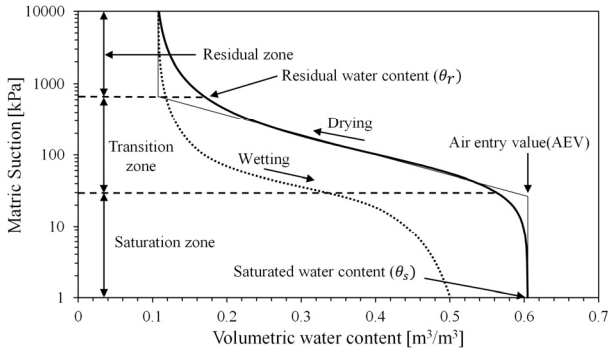


Fig. 1. Soil-water characteristic curve

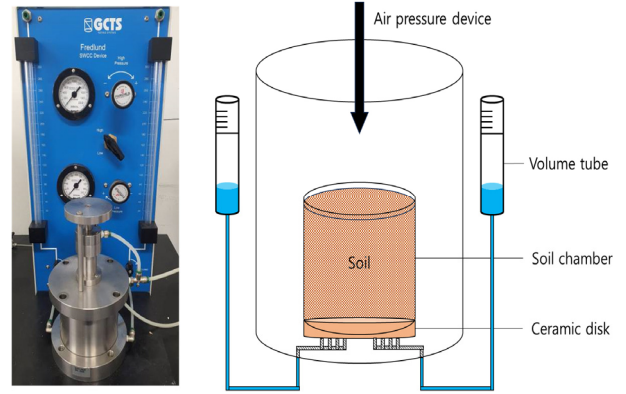


Fig. 2. Schematic of SWC-150 used in this study

성곡선은 Fig. 1과 같이 S자 형태를 보인다.

건조과정 이후 압력을 저감하여 물을 유입하는 단계를 습윤과정(Wetting process)이라 한다. 또한, 흡-함수 특성곡선의 개형은 흡 시료의 입경, 간극률 및 단위중량 등에 영향을 받는다고 보고되었다(Hillel, 1982; Shin et al., 2003; Shin, 2010; Moon, 2010).

강우로 인한 사면붕괴는 주로 빗물이 침투하여 토양의 전단강도가 감소하면서 발생하기 때문에, 강우 시 사면 안정성 평가는 불포화 상태에서 포화상태로 변하는 습윤과정과 연관이 있다(Kim, 2007; Malaya, and Sreedeeep, 2010; Josip et al., 2018; Qian et al., 2020).

따라서, 본 연구는 흡 입자의 다양한 크기의 구성에 따른 흡-함수특성곡선의 공기함입값 및 잔류함수비를 분석하고, 화강풍화토의 세립분 함량에 따라 건조과정 뿐만 아니라 강우 시 사면 안정해석을 위한 습윤과정에 의한 함수특성곡선 추정 실험이 수행되었다.

3. 실험 장비 및 조건

3.1 실험 장비

본 연구에서는 함수특성곡선 산출을 위해 시료 내 모

관흡수력을 조절할 수 있는 GCTS SWC-150이 활용되었다(GCTS Testing Systems)(Pham and Fredlund, 2004). 활용된 장비는 흡 시료가 들어갈 압력 챔버(Soil chamber), 압력조절 장치(Air pressure device), 압력을 통해 유출된 물의 부피를 측정할 부피측정장치(Volume tube), 그리고 세라믹디스크(Ceramic disk) 등으로 구성되며 전체 전경 및 모식도는 Fig. 2와 같다. 실험장비의 허용 가능한 범위의 압력은 1~2000kPa이며, 압력셀 밑 2개의 유출부를 통해 시료 내 함수비 변화를 측정하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 포화된 시료에 압력을 가하여 불포화 상태로 만든 후, 배출된 유량의 부피를 통해 체적함수비를 산정하는 건조과정(Drying process)을 실험 조건 내 최대 압력까지 마친 후, 압력을 저감하여 유출된 물을 흡 시료 내부로 유입시키며 체적함수비를 산정하는 습윤과정(Wetting process)을 통해 흡-함수특성곡선을 산정하였다.

3.2 실험 조건

함수특성곡선은 단위중량에 따라 민감하게 변할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 시료 조성 과정에서, 화강

Table 1. Physical properties of soils

Case	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Dry unit weight (g/cm^3)	1.47	1.47	1.47	1.47
Percent finer (%)	0	10	20	30
D_{30} particle size (mm)	0.44	0.35	0.21	0.07
D_{50} particle size (mm)	0.78	0.66	0.52	0.42
D_{60} particle size (mm)	0.99	0.89	0.73	0.60
Uniformity coefficient (C_u)	5.18	24.14	9.68	8.04
Coefficient of curvature (C_c)	1.01	1.81	0.82	0.12

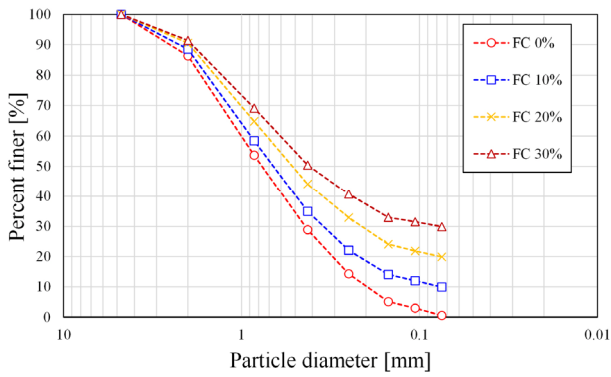


Fig. 3. Grain-size distribution curves

풍화토 시료의 건조단위중량(γ_d)을 최대한 동일하게 산정하였다. 또한, 세립분 함량에 따른 함수특성곡선 도출을 위해 각 0%, 10%, 20%, 30%의 세립분 함량을 가지는 시료 조건을 모사하였다(Lee et al., 2022). 활용된 시료의 물리적 특성과 입도분포곡선은 Table 1 및 Fig. 3과 같다. 본 실험에서는 한정된 압력을 견딜 수 있는 세라믹 디스크를 고려하여 1~300kPa까지 압력을 가하여 실험을 진행하였다.

3.3 함수특성곡선 이론식

많은 연구자로부터 불포화토의 흡-함수특성곡선을 추정하기 위해 다양한 수학적 모델이 제안되었다(Gardner, 1958; Brooks, and Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994). 본 연구에서는 다양한 이론식 중 국내 외에 보편적으로 사용되는 Gardner(1958), Fredlund and Xing(1994), van Genuchten (1980)의 이론식을 활용하여 흡-함수특성곡선을 추정하였으며, 이론식은 Table 2와 같다.

Table 2. Mathematical equation for SWCC

Reference	SWCC Equation	Notations
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + \alpha\psi^n}$	θ : volumetric water content ψ : matric suction α, n : fitting parameter
Fredlund and Xing (1994)	$\theta = C(\psi) \frac{1}{(\ln[e + (\frac{\psi}{a})^m])^m}$	θ : volumetric water content C : correction factor ψ : matric suction α, n, m : fitting parameter
van Genuchten (1980)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)^n]} \right]^{1 - \frac{1}{n}}$	θ : volumetric water content $(u_a - u_w)$: matric suction α, n : fitting parameter

4. 실험 결과 및 분석

4.1 화강풍화토의 건조-습윤과정 함수특성곡선 산정

Fig. 4는 세립분 함량을 구분한 4개의 화강풍화토를 활용하여 모관흡수력과 체적함수비의 관계를 표현한 함수특성곡선의 건조 및 습윤과정을 산정한 것이다. 건조 및 습윤과정 모두 모관흡수력의 증가에 따라 체적함수비가 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4 내 범례는 세립분 함량을 의미하며, (a)는 건조과정, (b)는 습윤과정에 대한 실험 결과이다. 건조과정에서 세립분 함량이 증가할수록 포화상태와 불포화 상태를 구분할 수 있는 매개변수인 공기함입값이 증가하는 것으로 관찰되었다. 이는 작은 크기의 입자인 세립분의 특성인 공극 내 물의 배출을 막는 표면력이 크게 작용된 것으로 판단된다. 이러한 현상은 세립분 함량이 클수록 효과가 커지는 것으로 나타났다. 건조과정 후 습윤과정 산정 결과, 건조과정과 마찬가지로 세립분 함량에 따라 곡선 기울기의 차이가 나타났으며, 건조과정 곡선과 일치하지 않는 이력현상(hysteresis)이 확인되었다. 이력현상의 원인은 공극 내 갇힌 공기와 수분으로 인해 발생한다. 이는 비균질한 공극 내 공기가 압력저감으로 유입될 물을 흡수하는 능력을 저하시키며 이 현상은 세립분 함량이 증가할수록 크게 관찰되었다.

4.2 이론식을 활용한 함수특성곡선 추정

산정된 함수특성곡선의 가장 적합한 이론식을 파악하기 위해, Fig. 4의 흡-함수특성곡선을 활용하여 Gardner (1958), Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980) 이론식을 적용한 함수특성곡선을 추정하였다. Fig. 5는

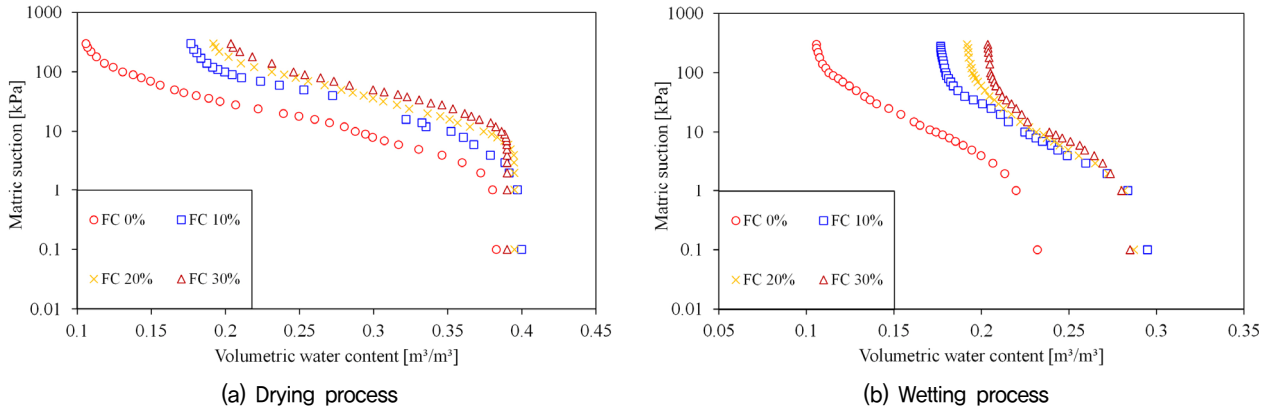


Fig. 4. Soil-water characteristic curve for all samples

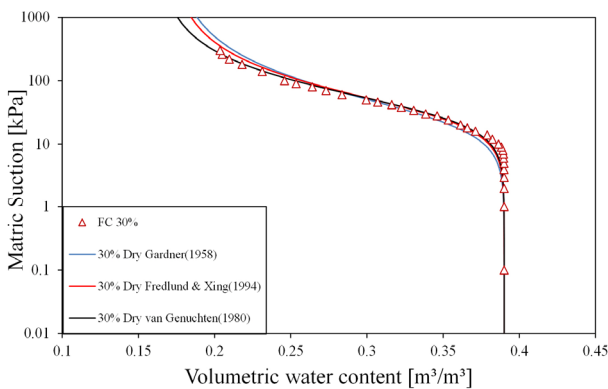


Fig. 5. Estimated drying SWCC by Gardner, Fredlund and Xing, and van Genuchten for 30% fine content soil

세립분 함량 30% 시료의 3가지 수학적 모델을 적용한 예시를 나타낸다. 그림에서 나타나는 바와 같이 함수특성곡선의 형태는 모관흡수력과 체적함수비에 의해 S자형 곡선을 나타낸 형태로서 비선형적인 관계가 나타나는 것으로 확인되었다. 이론식에 의한 함수특성곡선은 실험 결과와 유사한 개형을 나타내어 비교적 잘 부합하였으며 이 결과는 표에 표기된 상관계수(R^2)를 통해 설

명이 가능하다(Table 3). Gardner(1958)의 이론식에 의한 곡선은 경향을 확인할 순 있으나 다른 이론식에 비해 다소 낮은 결정계수 값이 도출되었다.

반면, Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980) 이론식에 의한 곡선은 실험 결과와 잘 부합하였으며, 이 중 van Genuchten(1980) 이론식이 상관계수가 대부분 0.99이상으로 산출되어 본 연구 내 실험 결과와 가장 일치되는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 실험 결과에 대한 van Genuchten(1980) 이론식의 인자인 파라미터를 분석하였다. van Genuchten(1980) 이론식의 파라미터는 α , n 이며 각 변수는 곡선의 변화와 관련되어 있다. 변수 α 는 공기함입값과 관련된 계수이며, n 은 변곡점 경사와 관련된 계수이다.

Fig. 6은 van Genuchten(1980) 이론식이 활용된 함수특성곡선이다. 건조과정과 습윤과정 모두 이론식이 활용되었으며, 이 그림을 통해 파라미터를 포함한 다양한 계수를 추정할 수 있다. 또한, 실험 결과와 van Genuchten(1980)의 이론식이 잘 부합하는 것이 관찰되었다.

Fig. 7은 Fig. 6을 활용하여 추정된 다양한 파라미터

Table 3. Correlation coefficients of various SWCC equation

Test	Fine contents (%)	R^2		
		Gardner	Fredlund & Xing	van Genuchten
Dry	0	0.988	0.992	0.997
	10	0.980	0.994	0.997
	20	0.973	0.991	0.996
	30	0.964	0.986	0.994
Wet	0	0.949	0.981	0.995
	10	0.953	0.974	0.984
	20	0.967	0.986	0.993
	30	0.965	0.989	0.986

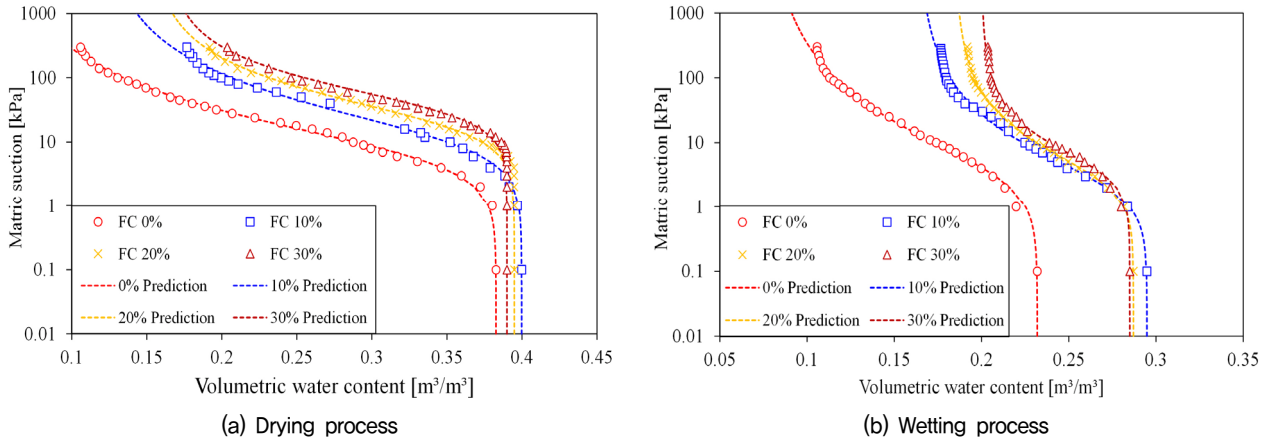


Fig. 6. Soil-water characteristic curve for all samples

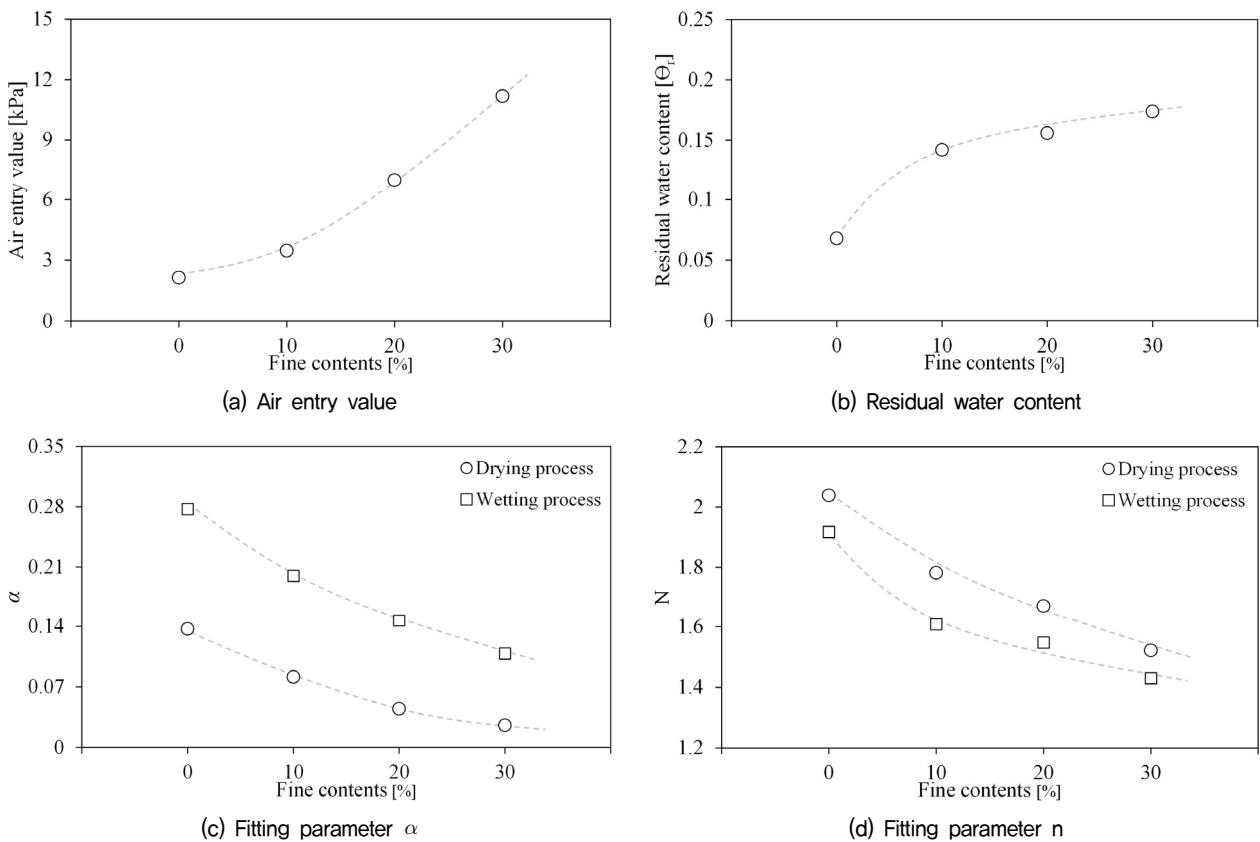


Fig. 7. Parameters of Van Genuchten (1980) for all samples

를 의미한다. (a)는 공기 함입값, (b)는 잔류체적함수비, (c)는 파라미터 α , 그리고 (d)는 n 을 추정할 결과이다. 추정 결과, 공기 함입값은 세립분 함량 변화에 따라 2.14kPa에서 11.17kPa로 뚜렷한 증가 경향을 나타내 세립분 함량이 많이 함유되면서 공기 함입값의 수치가 커지는 것을 알 수 있다. 잔류체적함수비는 세립분 함량 증가에 따라 0.068에서 0.1738로 증가 경향이 확인되었다. 세립분 함량에 따라 공기함입값 및 잔류함수비가 증가하는 이유는 모관흡수력 내 지배적으로 작용된 표면력이 영향을

미치는 것으로 판단되며, 세립분 함량 및 간극 크기에 따라 초기 모관흡수력에서 더 큰 모관력이 발생하고, 세립분 입자의 높은 흡착력에 의해 많은 수분이 입자 내에 유지된 것으로 판단된다. 이는 흙 입자의 곡률 반경이 세립분에 따라 변화하며 간극 크기 분포와 연관된 것으로 판단된다(Jung and Jang, 2016). 그리고 건조 및 습윤 과정에 대한 van Genuchten(1980) 이론식의 파라미터인 α 는 건조과정에서 0.1372~0.0258, 습윤과정에서 0.2775~0.1088로 나타나 건조과정보다 습윤과정으로 추정된

α 가 더 크게 확인되어, 두 과정의 차이를 확인하였다. n 은 건조과정에서 1.918~1.43, 습윤과정에서 2.039~1.522으로 추정되었다. 두 파라미터가 다른 것은 건조 및 습윤과정의 이력현상으로 인해 그래프 경향에 차이가 발생하고, 건조과정은 작은 간극을 통해 물이 배수되고, 습윤과정은 큰 간극을 통해 물이 흡수되는 효과인 잉크병 효과(Ink-bottle effect)가 반영된 것으로 추정된다. 따라서, 실제 지반 침투 현상과 유사한 습윤과정은 건조과정과 명확한 차이가 존재하는 것이 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 화강풍화토의 세립분 함량에 따른 흡-함수특성곡선 분석이 수행되었다. 함수특성곡선을 측정을 위해 GCTS SWC-150 장비를 활용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산출하였으며, 산출된 곡선에 대해 적합한 이론식을 추정하기 위해 Gardner(1958), Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980) 이론식을 활용하여 상관계수를 분석하였다. 이를 기반으로 화강풍화토의 세립분 함량에 따른 불포화 특성을 고찰하였으며, 본 연구의 결론은 아래와 같다.

- (1) 건조단위중량이 유사한 화강풍화토에 대하여 세립분 함량에 따른 함수특성곡선을 추정하였다. 추정 결과, 세립분 함량이 증가할수록 모관흡수력에 따른 간극 내 수분 유출량의 완만한 변화가 관찰되었다. 그 이유는 세립분의 특성인 작은 입자 크기로 인해 세립분의 함량이 많을수록 낮은 투수계수를 가지고 있기 때문으로 사료된다.
- (2) 함수특성곡선을 산출한 결과를 토대로 Gardner(1958), Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980) 이론식에 의한 함수특성곡선을 추정하였고, Gardner(1958)의 이론식은 어느 정도 경향이 확인되었으나 실험 결과와 다소 상이하였으며, Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980) 이론식에 대한 함수특성곡선의 경우 실험 결과에 대해 잘 부합하였다. 이 중 산출된 결과에 가장 적합한 van Genuchten(1980) 이론식을 활용하여 함수특성곡선의 파라미터를 산출하였다. 파라미터는 일반적으로 사용되는 건조과정과 실제 강우현상과 유사한 방법인 습윤과정을 진행하였으며, 두 과정에 대한 파라미터는 다르게 산출되었다. 불포화 지반 현장의 거동은 습윤과정

인 물이 유입이 발생하므로 수치해석 시에 습윤곡선 활용을 지향해야 할 것으로 사료된다.

- (3) 본 연구에서 국내 화강풍화토의 불포화 특성인 함수특성분석의 건조 및 습윤과정을 통하여 추정하였다. 추정 결과, 흡의 구조적 특징인 입도분포 및 세립분 함량이 함수특성곡선에 영향을 미치며, 세립분 함량이 많을수록 잔류함수비와 공기함입값이 크고, 습윤과정은 건조과정 이후 공극 내 내포하는 수분이 물의 흐름에 영향을 주기 때문에 건조과정에 비해 모관흡수력 변화에 의한 체적함수비의 변화율이 적은 것으로 판단되며, 이 영향은 세립분 함량이 많을수록 증가 경향이 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제시된 세립분 함량에 따른 건조 및 습윤과정의 함수특성곡선 및 파라미터는 향후 국내 사면의 불포화 특성 규명에 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2023) 지원을 받아 작성되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964), Hydraulic Properties of Porous Media, *Colorado State University (Fort Collins)*, Hydrology Paper, 3, March.
2. Campbell, G.S. (1974), A Simple Method for Determine Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, *Soil Science*, Vol.117, pp.311-314.
3. Cho, S.H. (2012), The Void Ratio Estimation of Unsaturated Soils by Using Elastic Wave Velocities, Korea University, Masters dissertation.
4. Fisher, R.A. (1926), On the Capillary Force in an Ideal Soil, *Journal Agr. Science*, Vol.16, No.3, pp.69-82.
5. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York, pp.544.
6. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), Equations for the Soil-water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp. 521-532.
7. Gardner, W.R. (1958), Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table, *Soil Science*, Vol.85, No.4, pp.228-232.
8. GCTS Testing Systems, SWC-150. (1994), Arizona Tempe.
9. Godt, J.W., Baum, R.L., and Chleborad, A.F. (2006), Rainfall Characteristics for Shallow Landsliding in Seattle, Washington. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.31, No.1, pp.97-110.
10. Hillel, D. (1982), *Introduction to Soil Physics*. Academic Press.

- New York, USA.
11. Hwang, W.K., Kang, K.M., Kim, T.H., and Song, Y.S. (2012), Effect of Soil Structure on Soil-Water Characteristic in Unsaturated Soil, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.2, pp.33-42.
 12. Jeong, S.S., Choi, J.Y., and Lee, J.H. (2009), Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.1, pp.1-9
 13. Josip, P., Željko, A., Sabation, C., and Matej, M. (2018), Soil-water Characteristic Curve of Residual Soil from a Flysch Rock Mass, *Hindawi*, Vol.2018, 6297819.
 14. Jung, J. and Jang, J. (2016), Soil-water Characteristic Curve of Sediments Containing a Polyacrylamide Solution, *Geotechnique Letters*, Vol.6, No.1, pp.89-94.
 15. Jung, Y.S., Sa, H.D., Kang, S., Oh, S.B., and Lee, J.S. (2015), Soil Water Characteristic Curve Using Volumetric Pressure Plate Extractor Incorporated with TDR System, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.8, pp.17-28.
 16. Kim, J.S. (2007), Stability Analysis of Slopes in Unsaturated Soil based on the Soil Water Characteristic Curve, Kyonggi university, Masters dissertation.
 17. Kim, J.H., Yoo, Y.J., and Song, Y.S. (2021), The Influence of Fitting Parameters on the Soil-Water Characteristics Curve in Stability Analysis of an Unsaturated Natural Slope, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.31, No.2, pp.165-178.
 18. Kim, Y.M., Lee, K.W., and Kim, J.H. (2013), Influence of Soil Characteristic and Rainfall Intensity on Matric Suction of Unsaturated Weathered Soil Slope. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.3 pp.1017-1025.
 19. Kim, Y.S., Kim, J.H., Lee, J.K., and Kim, S.S. (2013), A Study on Soil Slope Stability Design Considering Seepage Analysis, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.135-147.
 20. Lee, S.B., Ryou, J.E., and Jung, J.W. (2022), Soil Water Characteristic Curve Analysis of Weathered Granite Soils with Various Fine Content, *Journal of the Korean society of hazard mitigation*, Vol. 22, No.6, pp.247-253.
 21. Lee, Y. S. and Yoon, S. H. (2015), Influence of Antecedent Rainfall in Stability Analysis of Unsaturated Soil Slope, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.35, No.5, pp.1073-1082.
 22. Lee, J.H., Hwang, B.S., and Cho, W.J. (2018), Unsaturated Soil Properties of Compacted Soil at Sub-zero Temperature, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.19, No.3 pp.5-18.
 23. Lim, S.Y. and Lyu, T.J. (2008), The Analysis of Permeability Coefficient and the Evaluation of Equations of Permeability Coefficient for an Unsaturated Soils, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.1, pp.5-13.
 24. 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*, Vol.162, pp.22-32.
 25. Lumb, P. (1962), Effect of Rainstorms on Slope Stability, *Proceedings of Symposium on Hong Kong Soils, Hong Kong*, pp.73-87.
 26. Lumb, P. (1975), Slope Failures in Hong Kong, *Proceedings of Symposium on Hong Kong Soils, Hong Kong*, pp.1-20.
 27. Moon, S.J. (2010), Soil Water Characteristic Curve of Sandy Soils with Different Grain Size Distribution, Yeungnam university, Masters dissertation.
 28. Moon, H.D. and Kim, D.M. (2011), Unsaturated Soil-Water Characteristics Curve with Silt Contents for Nak-Dong River Sand. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.2, pp.23-33.
 29. Malaya, C. and Sreedeeep, S. (2010), A Study on Wetting Soil-water Characteristic Curve of a Sandy Soil, *Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz*
 30. Ng, C.W.W. and Shi, Q. (1998), A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage, *Computers & Geotechnics*, Vol.22, No.1, pp.1-28.
 31. Oh, S. and Kim, S. (2021), An Interpretation of Soil Water Retention Curves of Weathered Soils Using Micro-Membrane, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.1, pp.17-27.
 32. Pham, H.Q. and Fredlund, D.G. (2004), New Apparatus for the Measurement of the Soil-water Characteristic Curves. *Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec, Quebec City, Canada.*
 33. Qian, Z., Harianto, R., Alfredo, S., Guoliang, D., and Yanjun, D. (2020), Estimation of the Wetting Scanning Curves for Sandy Soils, *Engineering Geology*, Vol.272, 105635.
 34. Shin, B.W., Lee, B.J., Lee, J.K., and Kang, J.B. (2003), Soil-water Characteristics of Unsaturated Decomposed Granite Soils, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.4, No.1, pp.49-58.
 35. Shin, S.B. (2010), Effect of Silt Content for Soil Water Characteristic Curve of Nak-dong River Sand, Kyungpook national university, Masters dissertation.
 36. Song, Y.S. and Hong, W.P. (2011), Analysis of Slope Stability with Consideration of the Wetting Front and Groundwater Level during Rainfall, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.21 No.1, pp.25-34.
 37. Song, Y.S., Chae, B.G., and Lee, J.T. (2016), A Method for Evaluating the Stability of an Unsaturated Slope in Natural Terrain during Rainfall, *Engineering Geology*, Vol.210, pp.84-92.
 38. 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.
 39. 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, pp.379-392.

Received : January 17th, 2024

Revised : February 4th, 2024

Accepted : February 4th, 2024