

함수특성곡선 이력현상이 지반 내 모관흡수력에 미치는 영향

Effect on Matric Suction in Soils due to Hysteretic Soil Water Characteristic Curves

김 재 홍¹ Kim, Jae-Hong

황 응 기² Hwang, Woong-Ki

송 영 석³ Song, Young-Suk

김 태 형⁴ Kim, Tae-Hyung

Abstract

Soil-water characteristic curves (SWCCs), which represent a physical property in partially saturated soils, show the relation between volumetric water content and matric suction. The SWCCs exhibit hysteresis during wetting and drying, however experimental expressions used to describe SWCCs have generally ignored the hysteresis. In addition, the shape of SWCC may depend on the void ratio which is changed by soil skeleton deformations or hysteretic behavior under various loading conditions. Hence, it is necessary to understand, both empirically and analytically, the relationship between soil skeleton deformations and the SWCCs of various soils. The typical SWCCs experimentally have drying, wetting, and the second drying curve. The measurement of a complete set of hysteretic curves is severely time-consuming and difficult works, then the first drying curve of SWCC is generally determined to estimate the hydraulic conductivity and shear strength function of partially saturated soils. This paper presents the hydraulic-mechanical behavior of partially saturated soils (weathered soil and silty soil) for volume changes and hysteresis in SWCCs regarding the difference between the first drying and wetting curve.

요 지

부분포화토의 물리적 특징 중 하나인 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 모관흡수력과 체적함수비의 관계를 나타낸다. 함수특성곡선은 지반의 습윤과정과 건조과정의 이력현상을 보여줄 수 있으나, 일반적으로 함수특성곡선을 표현하는 방법은 이러한 이력현상을 무시한다. 또한 함수특성곡선의 고유한 형태는 흙의 간극비와 토립자들의 변형을 유발할 수 있는 외부의 여러 가지 하중들에 의해 언제든지 변화될 수 있다. 그러므로 여러 흙들이 가지고 있는 함수특성곡선과 토립자들 변형 사이의 관계에 대해서 실험적인 측면과 해석적인 측면의 차이점에 대해 이해가 필요하다. 실험적으로 1차 건조과정, 습윤과정 그리고 2차 건조과정으로 그려지는 전형적인 함수특성곡선들이 얻어진다. 이러한 이력현상을 갖는 함수특성곡선에서 습윤과정의 실험은 어려운 시험방법과 많은 시간소요가 필요하기 때문에 일반적으로 첫 번째 건조과정의 실험 결과를 불포화 투수계수와 전단강도 함수를 예측하기 위한 부분포화토의 물리적 특성으로 결정한다. 본 연구는 화강풍화토와 실트질 흙을 대상으로 유한요소해석 프로그램을 이용하여 부분포화토의 중요한 물리적 특성을 갖는 함수특성곡선의 1차 건조과정과 습윤과정 차이인 흙의 체적 변형과 이력현상에 대한 수리학적·역학적 흙의 거동특성을 비교·검토하였다.

Keywords : Hydraulic-mechanical behavior, Hysteresis, Partially saturated soil, Soil-water characteristic curve

1 정희원, 전북대학교 토목공학과 박사후 과정 (Post Doctor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National Univ.)

2 정희원, 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime Univ., gold-a1142@nate.com, 교신저자)

3 정희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

4 정희원, 한국해양대학교 건설공학과 부교수 (Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

체적함수비(흙의 전체 체적에서 물이 차지하는 체적)와 모관흡수력의 관계를 표현하는 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 부분포화토의 거동을 종합적으로 설명하기 위한 필수적인 전제조건이다. 특성(characteristic) 곡선이라는 의미는 어떤 흙이 유일하게 갖고 있는 하나의 고유(intrinsic)한 물리적 성질을 의미한다. 그러나 최근 많은 연구결과에 의하면 시료의 상태(건조과정과 습윤과정)와 조건(외부응력)에 따라 곡선의 분포는 달라진다. 즉, 함수특성곡선은 유일한 특징이 아닌 여러 조건에서 다양하게 분포되기 때문에 “토양수분보유곡선(soil water retention curve)”이라는 표현이 적절하다고 제안되었다(Nuth와 Laloui, 2008).

부분포화 지반에 대한 관심과 연구 증가로 인해 여러 특성 값들을 이용하여 부분포화토의 투수계수와 강도 정수를 예측하는 다양한 실험들과 이론적 연구들이 진행되고 있다(Pham 등, 2003; Nuth와 Laloui, 2008; Miller 등, 2009; Guan 등, 2010; Lu 등, 2010; Song 등, 2012). 지반공학적인 접근에서 부분포화토로 이루어져 있는 현장에서 여러 문제들을 접할 때, 침투와 응력들의 여러 조건들에 이러한 연구들을 적절히 적용함으로써 지반공학 문제들을 예측하고 해결해야 할 필요성이 대두되고 있다. Lu와 Likos(2006)는 함수특성곡선을 이용하여 모관흡수력이 불포화토의 유효응력과 전단응력에 미치는 영향을 효율적으로 나타내기 위해 유효포화도(또는 모관흡수력)와 흡입응력(suction stress)의 관계를 제시하였다. 또한 부분포화토 물리적 특성인 함수특성곡선의 여러 실험들에서 순수직응력(net normal stress)을 적용하여 응력에 따른 특성곡선의 경로를 제시하였으며 이력현상에 의한 경로를 예측하는 모델들이 제안되어져 왔다(Miller 등, 2008; Khalili 등, 2008).

Miller 등(2008)은 외부응력을 가한 상태에서 함수특성곡선에 영향을 끼치는 특징들에 대해서 다음과 같이 설명하였다. 건조과정(drying curve)과 습윤과정(wetting curve)의 함수특성곡선에서 순수직응력의 크기가 크면 클수록 간극비가 작아지므로 초기 체적함수비는 감소하고, 포화상태 흙에 처음으로 공기가 침투하는 공기함입치(air entry value)는 순수직응력이 증가할수록 커진다. 그리고, 함수특성곡선의 기울기는 순수직응력이 작으면 완만하고, 순수직응력이 커질수록 급하게 변하며, 잔류함수비는 순수직응력이 커질 때 점점 증가한다고

제안하였다.

이와 같이, 함수특성곡선은 모관흡수력의 증가에 따라 간극을 차지하고 있던 간극수가 흙 외부로 배출되는 건조과정(drying or desorption process)과 모관흡수력의 감소로 인해 물이 흙 내부로 흡수되는 습윤과정(wetting or adsorption process)의 두 가지로 나타낼 수 있으며 건조 및 습윤 함수특성곡선 사이에는 서로 다른 이력현상을 보인다. 함수특성 시험을 통해 건조 및 습윤과정의 이력현상을 측정하는 것은 상당한 시간이 소요된다. 대부분 실험은 건조과정의 함수특성곡선만을 측정하고 있으며 많은 지반공학적인 문제들에 이용하고 있다. 하지만 실제 강우에 의한 불포화사면의 침투는 습윤 과정에 해당하므로 습윤함수특성곡선을 이용하여 해석하는 것이 보다 합리적인 것으로 제안되고 있다(Ng과 Pang, 2000; Ebel 등, 2010; Ma 등, 2011).

본 연구에서는 국내 화강풍화토의 건조 및 습윤 과정에 대한 함수특성 시험을 실시하고 실험 결과로부터 유한요소해석 프로그램에 적용하여 침투수에 의한 토립자의 거동과 지반 내부에서 변화하는 불포화 투수계수를 예측하고, 위치에 따른 모관흡수력의 변화를 평가하여 부분포화 지반의 강도에 영향을 미치는 요소와 원인들을 구체적으로 평가하는 것이다.

2. 부분포화토 함수특성실험

2.1 시험장치와 시료

함수특성곡선 시험장치는 그림 1에서와 같이 압력조절장치(pressure panel), 물저장소(water reservoir), 시료

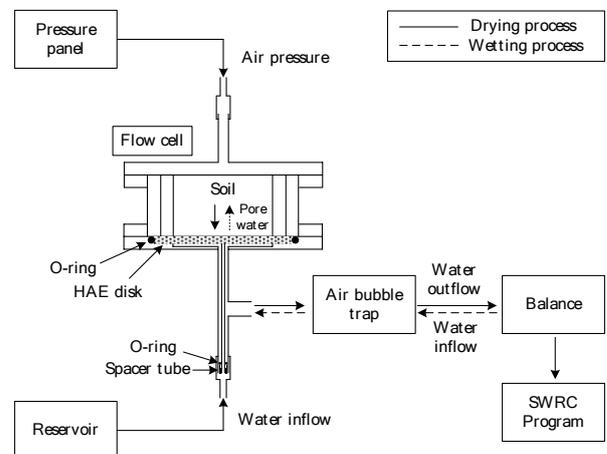


그림 1. 함수특성곡선 시험장치 모식도

포화장치(saturation system), 플로우셀(flow cell), 공기 방울트랩(air bubble trap), 측정저울(balance), 측정시스템(measurement system) 등으로 구성되어 있다. 함수특성곡선 시험장치는 Wayllace와 Lu(2012)에 의해 제안된 장비를 구축하였으며, 함수특성곡선의 이력현상을 위하여 본 연구에 필요한 실험을 수행하였다.

시험 장치는 시료에 공기압을 가하여 포화된 시료를 불포화상태로 만드는 건조과정(drying process)과 불포화 시료에 물을 주입하여 포화상태로 만드는 습윤과정(wetting process)을 재현할 수 있으며, 모관흡수력의 재하 및 제하과정에 따른 시료내 함수변화특성을 파악할 수 있다. 건조과정과 습윤과정의 함수특성곡선을 위해서, 측정저울을 통해 시료내의 유출량과 유입량을 측정하여 2가지 과정의 곡선들을 측정할 수 있고 압력조절 장치는 컴프레서에서 공급된 압력을 플로우셀에 전달하여 공기압을 조절한다. 0~300kPa 범위의 공기압력으로 간극 속에 있는 수분을 추출하는 모관흡수력으로 작용하여 비교적 빠른 시간 안에 시험을 완료할 수 있다. 주문진 표준사, 인제, 도계의 3가지 시료를 가지고 함수

표 1. 실내실험을 수행한 3가지 시료에 대한 물리적 특성

시료 물성	주문진	인제	도계
비중(G_s)	2.621	2.637	2.632
최대건조단위중량($\gamma_{d_{max}}$, kN/m ³)	15.8	17.7	-
최소건조단위중량($\gamma_{d_{min}}$, kN/m ³)	13.4	13.2	-
균등계수(C_u)	1.56	10.17	9.27
곡률계수(C_c)	0.96	1.32	1.47
소성한계(PL , %)	-	19.85	12.17
소성지수(PI , %)	-	12.54	16.18
포화투수계수(k_s , m/sec)	1.48×10^{-5}	7.19×10^{-7}	4.76×10^{-7}
통일분류법	SP	SW	SW

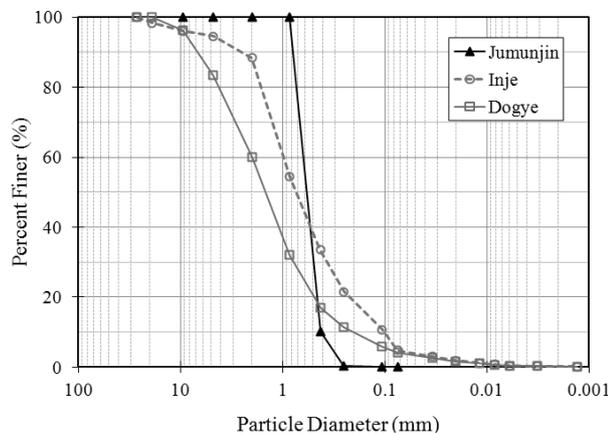


그림 2. 3가지 시료의 입도분포곡선

특성곡선의 건조과정과 습윤과정을 시간에 따른 함수비 변화를 확인하여 이력현상을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 3가지 흙 시료들은 주문진(jumunjin) 표준사와 강우시 산사태가 일어난 강원도 인제군 인제(inje)읍과 삼척시 도계(dogye)읍에서 채취한 화강풍화토이다. 각 시료의 물리적 특성들은 표 1에서와 같이 얻을 수 있었다. 그림 2는 3가지 시료의 입도분포곡선을 보여주고 있다.

2.2 이력현상의 함수특성곡선

함수특성곡선은 건조 및 습윤과정에서 동일한 모관흡수력 조건에서 서로 다른 양의 토중수를 보유하는 이력현상(hysteresis phenomenon)을 나타낸다. 잉크병 효과(ink-bottle effect)와 접촉각 효과(contact-angle effect) 그리고 습윤과 건조에 따른 흙 구조의 팽창과 수축 등이 이력현상의 대표적인 원인으로 알려져 있다(Letey 등, 1962; Laroussi와 DeBacker, 1979; Kumar와 Malik, 1990). 이러한 현상은 갇힌 공기(entrapped air)의 영향으로 인해 건조과정과 습윤과정의 포화체적함수비가 다르게 나타난다.

그림 3-5는 각각 주문진 표준사, 인제와 도계 화강풍화토에 대한 건조 및 습윤과정의 실험 데이터와 최소제곱회귀분석을 통해 van Genuchten(1980) 모델로 곡선 맞춤한 함수특성곡선을 나타낸다. 그리고 그림 6은 문헌(Pham 등, 2003)에서 얻은 실트질 흙에 대한 건조 및 습윤과정의 함수특성곡선을 나타낸 것이다. 표 2는 각 시료에 대한 포화체적함수비(θ_s)와 잔류체적함수비(θ_r), 실험계수 값들을 건조와 습윤곡선을 구분하여 보여주고 있다. 주문진 표준사(그림 3)의 경우 4kPa의 모관흡

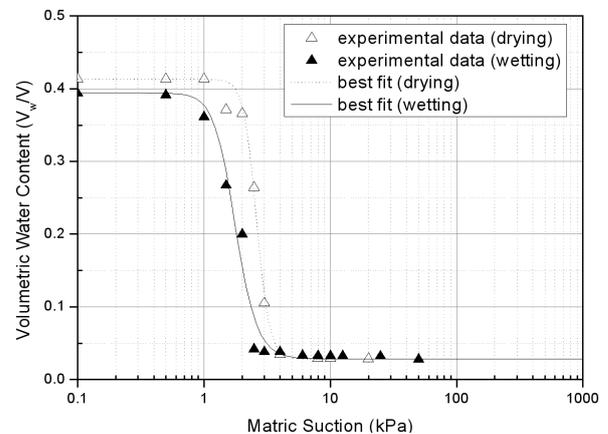


그림 3. 주문진 표준사의 함수특성곡선

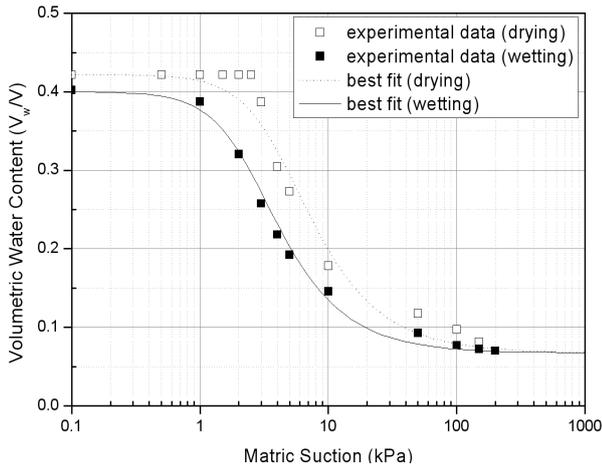


그림 4. 인제 화강풍화토의 함수특성곡선

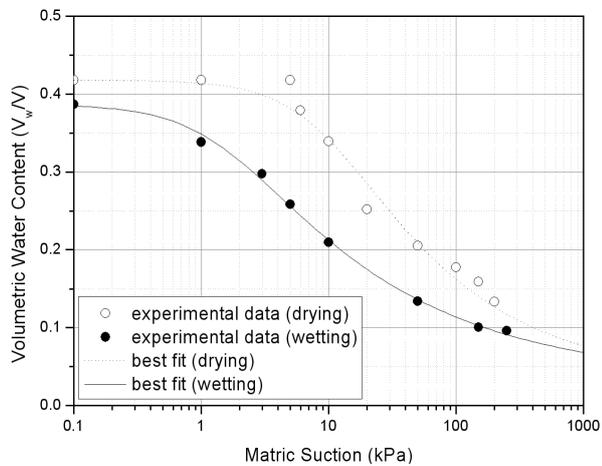


그림 5. 도계 화강풍화토의 함수특성곡선

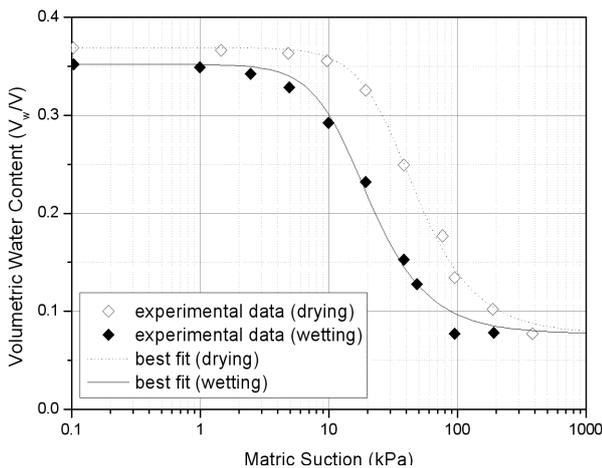


그림 6. Silt의 함수특성곡선 (Pham 등, 2003)

수력 이후 간극 내 토중수의 감소 변화가 작으며 잔류체 적함수비 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 인제 화강풍화토(그림 4)는 150kPa의 모관흡수력 이후 잔류체적함

수비 값에 수렴하였으며, 도계 화강풍화토(그림 5)는 250kPa의 모관흡수력까지 시험을 수행하였으나 완전한 잔류체적함수비에 도달하지 않아 계수 값을 추정하여 산출하였다. 세립분이 많은 실트질이나 점토질 흙에 대한 시료는 시험시간이나 장비에 대한 제약 등의 이유로 문헌(Pham 등, 2003)에서 제시한 실험값들을 이용하여 세립분의 특성을 화강풍화토와 비교하여 수치해석에 사용하였다. 문헌으로부터 가정된 시료의 물성값들은 실트질 흙에 대한 비중($G_s = 2.6$)과 일반적인 투수계수 값($k_s = 8.66 \times 10^{-8}$ m/sec)을 사용하였다.

실험이 수행된 시료들 중에서 공기함입치(air-entry value)는 도계 시료가 가장 컸으며 인제, 주문진 표준사 순으로 나타났다. 흙의 함수특성을 정의하는 유효 포화도(S_e)에 관한 식은 Mualem(1976) 모델을 바탕으로 van Genuchten(1980)이 제안한 식 (1)과 식 (2)과 같다.

$$S = S_r + S_e(1 - S_r) \quad (1)$$

$$S_e = [1 + (\alpha s)^n]^{-m} \quad (2)$$

여기에서 s 는 모관흡수력, S_r 는 잔류포화도 그리고 α , n 과 $m(=1-1/n)$ 은 함수특성곡선(SWCC)의 실험정수이다. 따라서 공기함입치인 실험계수 α 와 특성곡선 전이영역의 기울기에 해당하는 n 값¹⁾의 크기는 주문진 표준사가 가장 크고, 인제, 도계 순으로 나타났다. 시료들의 수리적 특성들은 표 2에 자세히 정리되어 있다.

3. 수치해석 알고리즘

3.1 부분포화토 구성방정식

3상으로 구성되어 있는 흙을 토립자(n^s), 물(n^w), 공기(n^a)의 요소들로 구분하는 체적비($1 = n^s + n^w + n^a$)를 근간으로 하는 mixture theory(Coussy, 2004; de Boer, 2005)가 부분포화토 구성방정식의 시작이다. 부분포화토의 미지수는 토립자의 변위(u)와 내부에서 발생하는 간극수압(p_w)으로 이루어져 있으며, 이를 구하기 위해 두 가지 지배방정식이 필요하다. 변위와 간극수압을 계산하기 위해 사용하는 평형방정식(balance equation)으로, 부분포화토 내 물의 이동은 흙 입자의 움직임에 종속되기 때문에 흙 입자에 대한 평형방정식(balance of linear

1) 체적비(n)와 실험계수(n)의 기호를 구분하였다.

표 2. 시료의 함수특성곡선 실험상수들

함수특성곡선(SWCC)		θ_s	$\theta_r(S_r)$	α (kPa ⁻¹)	n	m	R^{2^*}
주문진	건조(Drying)	0.414	0.028(0.068)	0.393	8.855	0.887	0.995
	습윤(Wetting)	0.394	0.028(0.071)	0.598	5.462	0.817	0.984
인제	건조(Drying)	0.422	0.067(0.159)	0.231	2.083	0.520	0.989
	습윤(Wetting)	0.400	0.067(0.168)	0.404	2.125	0.529	0.993
도계	건조(Drying)	0.418	0.032(0.077)	0.100	1.469	0.319	0.978
	습윤(Wetting)	0.387	0.032(0.083)	0.643	1.353	0.261	0.997
Silt	건조(Drying)	0.369	0.077(0.209)	0.031	2.332	0.571	0.997
	습윤(Wetting)	0.352	0.077(0.219)	0.070	2.352	0.575	0.993

*최소자승법의 결정계수(R^2)이며 '1'에 가까울수록 정확한 값을 찾는다.

momentum), 식 (3)과 부분포화도 내 물의 흐름을 파악하여 간극수압을 계산할 수 있는 평형방정식(balance of mass of the water), 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다 (Borja, 2004).

$$\text{DIV} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$-n \frac{\partial S}{\partial s} \dot{p}_w + S \text{DIV} \mathbf{v} = -\text{DIV} \tilde{\mathbf{v}}^w \quad (4)$$

3상으로 이루어진 흙의 전체 밀도 역시 $\rho = \rho^s + \rho^w + \rho^a$ 로 나타낼 수 있다. 중력가속도 벡터를 \mathbf{g} 라고 할 때, 표면적인 Darcy 속도벡터(superficial Darcy velocity of water), $\tilde{\mathbf{v}}^w$,와 선형등방 탄성체(linear isotropic elasticity)로 가정한 지반의 유효응력을 다음 식 (5)과 (6)로 표현할 수 있다(van Genuchten, 1980; Coussy, 2004).

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\epsilon}^e : \boldsymbol{\epsilon} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}^w = k_w(S_e, n)(-\nabla p_w + \rho^{wR} \mathbf{g}) \quad (6)$$

부분포화도의 유효응력($\boldsymbol{\sigma}'$)을 $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \bar{p} \mathbf{1}$ (positive in tension)처럼 표현한다면 모관흡수력과 관련된 유효응력 계수 관계식은 $\bar{p} = p_a - \chi(p_a - p_w)$ 으로 표현된다. S_e 는 유효포화도, 간극수압은 p_w 로 간극공기압은 p_a 로 표현되지만, 본 연구에서는 지반공학적인 간극공기압은 대기압 상태로 간주하여 $p_a = 0$ 으로 가정하여 계산되어진다. 여러 문헌조사에 따르면 지반공학적인 실험에서 간극공기압을 고려하지 않았을 때($p_a = 0$), 수치해석 결과와 더욱더 일치함을 보인다(Laloui 등, 2003). 식 (3)과 (4)에서 DIV(divergence)는 ∇ 를 의미하고, 표면적인 Darcy 속도벡터 $\tilde{\mathbf{v}}^w$ 는 실제 물의 속도(\mathbf{v}_w)와 흙 입자 속도($\mathbf{v} = \mathbf{v}_s$)의 차이로 $\tilde{\mathbf{v}}^w = n^w(\mathbf{v}_w - \mathbf{v})$ 으로써 표현된다.

식 (5)은 탄성 영역에서 유효응력($\boldsymbol{\sigma}'$)을 표현하기 위해 탄성계수와 변형률의 관계를 나타내며, 여기에서 탄성계수는 $\boldsymbol{\epsilon}^e = \lambda \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2\mu \mathbf{I}$ (Lamé parameters = λ, μ) 기울기로 표현할 수 있고, 변형률 $\boldsymbol{\epsilon} (= \text{sym} \nabla \mathbf{u})$ 는 대칭조건으로 볼 수 있다. k_w 는 부분포화도의 투수계수이고, ρ^{wR} 는 물의 실제 밀도이며 체적비의 관계로 표현하면 $\rho^w = n^w \rho^{wR}$ 와 같다. 시간에 따른 침투와 지반의 응력 계산에 필요한 간극률과 전체밀도는 식 (7)과 (8)에서와 같이 사용되어진다.

$$n_{n+1} = \frac{n_n + \Delta \epsilon_v}{1 + \Delta \epsilon_v} \quad \text{and} \quad \Delta \epsilon_v = \text{tr}(\Delta \boldsymbol{\epsilon}) \quad (7)$$

$$\rho = [1 - n(\mathbf{d})] \rho^{sR} + n(\mathbf{d}) S(\boldsymbol{\theta}) \rho^{wR} \quad (8)$$

여기에서 침투 또는 외부 하중에 의해 변화하는 간극률은 체적변형률($\Delta \epsilon_v$)의 함수이며, 부분포화된 전체 밀도(ρ)는 시간에 따른 간극률과 포화도($n^w = n(\mathbf{d}) S(\boldsymbol{\theta})$)에 따라 결정된다.

일반적으로 흙 내부에서 간극수의 흐름은 Darcy의 법칙이 사용된다. 그러나 포화도에서 상수인 투수계수는 불포화도에서 포화도 또는 모관흡수력에 따라 변하게 된다. 실내실험에 의한 많은 경험식들이 제안되지만 본 연구에서 사용하는 부분포화 투수계수 방정식은 아래와 같다(van Genuchten, 1980; Coussy, 2004).

$$k_w(S_e, n) = \frac{l^2}{\eta_w} \delta(n) k_{rw}(S_e), \quad \delta(n) = \frac{n^3}{(1 - n^2)} \quad (9)$$

$$k_{rw}(S_e) = \sqrt{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (10)$$

여기에서 k_{rw} 는 부분포화도의 상대투수계수(relative permeability)이며 유효포화도에 따라 0~1까지의 비율을 갖는다. Kozeny-Carman의 관계식은 간극률 변화($\delta(n)$)를

설명하며, l^2 은 흙 간극 구조에 따른 정수(m^2), η_w 는 물의 점성계수 그리고 m 은 van Genuchten 함수특성곡선의 실험정수를 의미한다.

$$\int_B \nabla \mathbf{w} : [\boldsymbol{\sigma}' - \chi p_w \mathbf{1}] dv = \int_B \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{g} dv + \int_{\Gamma_t} \mathbf{w} \cdot \mathbf{t}^\sigma da \quad (11)$$

$$\int_B \eta w \frac{\partial S}{\partial s} (-\dot{p}_w) dv + \int_B \eta S \text{DIV} v dv - \int_B (\nabla \eta) \cdot \tilde{\mathbf{v}}^w dv = \int_{\Gamma_s} \eta S^w da \quad (12)$$

3.2 유한요소 방정식과 초기조건들

유한요소 해석을 위한 전구역(whole domain, B)을 부분포화 영역이라고 가정한다면, 가중잔류항법(method of weighted residuals)을 적용하여 흙의 변위와 간극수압을 계산할 수 있는 식 (11)과 (12)처럼 비선형 약형(coupled nonlinear weak form)을 다음과 같이 유도할 수 있다(Hughes, 1987).

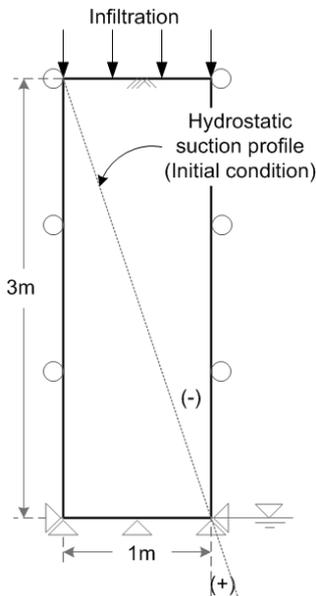


그림 7. 유한요소해석의 불포화지반의 초기조건과 경계조건

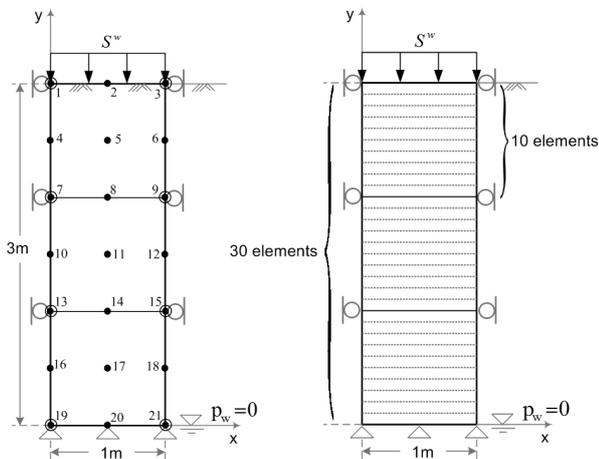


그림 8. 유한요소해석을 위한 mesh 조건과 elements

여기에서 \mathbf{w} 는 변위(\mathbf{u})를 위한 가중함수(weighting function), \mathbf{t}^σ 는 외부하중 벡터, η 는 간극수압(p_w)을 위한 가중함수, S^w 는 침투수를 나타낸다.

그림 7은 유한요소해석에서 부분포화지반으로 구분하는 초기조건과 경계조건을 나타낸다. 요소의 윗 상단은 지표면으로써 침투수와 외부응력을 적용시킬 수 있으며, 요소의 바닥에 지하수위가 위치하며 모관흡수력의 초기조건은 선형으로 증가하는 이상적인 형태로 가정하였다. 그림 8은 부분포화지반을 여러 요소들로 나누어 정확한 결과 값을 구하기 위해 3개부터 30개의 요소(element)들로 세분화시켜 이력현상에 의한 지반내부 모관흡수력의 결과들을 비교하여 정확한 결과들을 제시하였다. 부분포화 지반 내에서 물의 흐름은 침투수 크기에 상관없이 계산되어진 시료의 부분포화 투수계수 크기에 따라 흐르기 때문에 수치해석 과정에서 지반에서 일정한 흐름을 묘사하기 위해서 시료의 포화투수계수보다 큰 침투수를 사용하였다. 표 3은 수치해석상에 적용한 각 시료에 대한 물리적 특성을 보여준다.

하나의 요소에서 계산한 값을 누적하여 전체 요소에서 발생하는 값들은 행렬형태로 계산된다. 2개의 미지수(\mathbf{u} , p_w)를 연계한 비선형 약형(coupled nonlinear weak form)에 형상함수(shape function)를 적용함으로써, 행렬함수(matrix form) 형태로 유한요소 방정식으로 식 (13)과 (14)와 같이 표현한다.

표 3. 유한요소해석에 사용된 흙의 물리적 특성

탄성계수(λ)	$29 \times 10^9 \text{Pa}$
전단계수(μ)	$7 \times 10^9 \text{Pa}$
흙 알갱이의 실제 밀도(ρ^{sR})	2700kg/m^3
물의 실제 밀도(ρ^{wR})	1000kg/m^3
공기 실제 밀도(ρ^{aR})	1.2kg/m^3
포화 투수계수(인제, κ)	$7.19 \times 10^{-14} \text{m}^2$
포화 투수계수(도계, κ)	$4.76 \times 10^{-14} \text{m}^2$
포화 투수계수(Silt, κ)	$1.00 \times 10^{-14} \text{m}^2$
침투수(인제, S^w)	$7.2 \times 10^{-7} \text{m/sec}$
침투수(도계, S^w)	$4.8 \times 10^{-7} \text{m/sec}$
침투수(Silt, S^w)	$1.1 \times 10^{-7} \text{m/sec}$
물의 점성계수(η_w)	$10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$
중력가속도	9.807m/sec^2

$$\bigwedge_{e=1}^{n_d} (c^e)^T [f_e^{d,INT}(d^e, \theta^e) - f_e^{d\theta,INT}(\theta^e) = f_e^{d,EXT}(d^e, \theta^e)] \quad (13)$$

$$\bigwedge_{e=1}^{n_d} (\alpha^e)^T [k_e^{\theta d,INT}(\theta^e) \cdot d^e - k_e^{\theta 1,INT}(\theta^e) \cdot \dot{\theta}^e - f_e^{\theta 2,INT}(d^e, \theta^e) = f_e^{\theta,EXT}] \quad (14)$$

여기에서 $\bigwedge_{e=1}^{n_d}$ 는 유한요소(e)들의 누계를 계산하기 위한 연산자, c^e 와 α^e 는 각각 유한요소 절점(node)에서 변위와 간극수압의 가중함수(w^h, η)를 위한 값들, d^e 와 θ^e 는 요소 절점에서의 변위와 간극수압 벡터들이다. 각 요소(element)들이 가지고 있는 내력(internal force)과 외력(external force) 벡터들의 평형조건에 의하여 계산 값들을 누적시키면 비선형 포물선 미분방정식(coupled nonlinear parabolic first order ordinary differential equation)을 전체 요소에 대해 식 (15)와 같은 행렬 형태로 표현 할 수 있다.

$$C(D) \dot{D} + F^{INT}(D) = F^{EXT}(D) \quad (15)$$

여기에서,

$$D = \begin{bmatrix} d \\ \theta \end{bmatrix}, \quad \dot{D} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$C(D) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K^{\theta d,INT}(\theta) - K^{\theta 1,INT}(d, \theta) \end{bmatrix}$$

$$F^{INT}(D) = \begin{bmatrix} F^{d,INT}(d, \theta) - F^{d\theta,INT}(\theta) \\ -F^{\theta 2,INT}(d, \theta) \end{bmatrix}$$

$$F^{EXT}(D) = \begin{bmatrix} F^{d,EXT}(d, \theta) \\ F^{\theta,EXT} \end{bmatrix}$$

Backward Euler 방법을 이용한 내제적방법(fully-implicit time integration)을 통해 위와 같은 행렬방정식을 Newton-Raphson 방법을 사용하여 미지수인 변위와 간극수압을 계산할 수 있으며, 식 (16)과 (17)로 다시 표현된다.

$$C(D_{n+1}) \dot{D}_{n+1} + F^{INT}(D_{n+1}) = F^{EXT}(D_{n+1}) \quad (16)$$

$$C(D_n) \dot{D}_{n+1} + K(D_n) D_{n+1} = F^{EXT}(D_n) \quad (17)$$

여기에서 행렬방정식은 Newton-Raphson 방법에 의해 선형화된 형태로 현재 시간 단계(t_{n+1})에서 해석이 수행되며 내력에 대해서 $F^{INT}(D_{n+1}) \approx K(D_n) D_{n+1}$ 임을 가정할 수 있다. 결과적으로 수리학적 역학적인 흙의 거동을 비선형 접근 방법인 내제적 방법으로 결과를 도출하였다(Kim, 2010).

4. 이력현상에 의한 모관흡수력 결과

강우침투에 의한 부분포화 지반 내에서 발생하는 모관흡수력의 변화를 확인하기 위해서 4가지 시료(주문진 표준사, 인제와 도계 화강풍화토, 실트)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 대한 결과는 침투수에 의해 토립자의 거동을 동시에 해석하고 함수특성곡선의 이력현상에 대한 차이점을 확인하고자 결과들을 비교하였다. 일반적으로 부분포화토의 물리적 특성으로 사용하고 있는 1차 건조과정의 함수특성곡선과 이력현상이 발생하는 습윤과정의 함수특성곡선 차이에서 발생하는 지반 내부의 모관흡수력 변화와 지반거동을 확인하였다. 여기에서 주문진 표준사의 함수특성곡선 실험 결과를 토대로 유한요소해석을 한 결과, 모관흡수력에 따른 체적함수비의 급격한 변화의 영향으로 Newton-Raphson 방법으로 수행하는 반복적인 수렴결과에서 종종 error들이 발생하여 적절한 결과를 얻지 못하였다.

그림 9는 인제와 도계 화강풍화토와 실트질 흙을 대상으로 침투수 및 흙의 자중에 의해 지표면에서 발생한 수직변위를 보여준다. 각 시료의 포화체적함수비(V_w/V)가 작아질수록 지반의 초기 단위중량이 커 지표면에서의 변위가 비교적 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 가장 작은 포화체적함수비를 갖는 실트질 흙에서 큰 변위를 보였으며, 인제 화강풍화토의 경우에 가장 큰 포화체적함수비에서 상대적으로 작은 변위가 발생하고 있다. 그리고, 해석 결과는 불포화토의 유효응력계수 χ 를 유효포화도(S_e)로 대입하여 수치해석을 수행하였다. 유효응력계수는 침투와 변위 또는 강도에 연계된 함수이기 때문에 투수계수와 전단강도를 예측하는 함수특성곡선

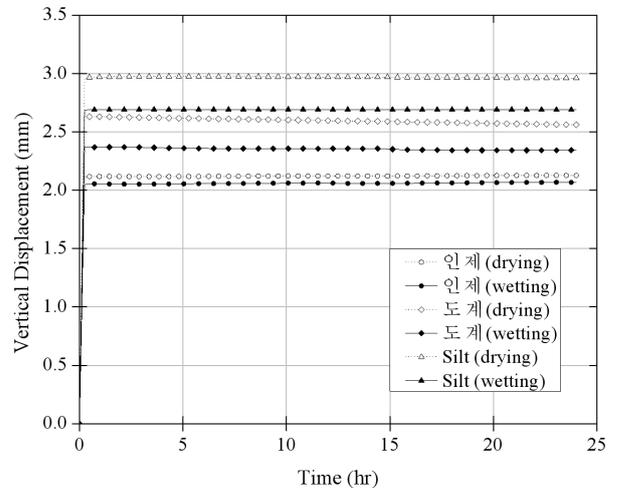


그림 9. 각 시료에 침투에 의한 지표면의 수직변위

의 이력현상은 침투에 의한 변위의 차이가 불포화토 유효응력에 관련이 있다(김재홍 등, 2011). 해석 결과 지반 내부로 흐르는 물의 침투는 포화투수계수의 크기에 따라 변화하는 경향이 달라진다. 초기조건으로 정한 포화투수계수는 간극률의 함수이며 다음과 같은 식 (18)로 구성된다.

$$k_s = \frac{l^2}{\eta_w} \frac{n^3}{(1-n^2)} = \frac{\kappa}{\eta_w} \quad (18)$$

여기에서 k_s 는 포화투수계수, κ 는 흙의 종류마다 다른 토립자의 고유 투수계수(intrinsic permeability of soil skeleton)로써 간극률 함수로 표현된다. 수치해석 상에서 포화투수계수인 토립자 고유의 투수계수(κ)는 흐르는 액체(수치해석에서 물)의 점성계수(η_w)의 특성과 침투(또는 외부하중)에 따른 간극률의 변화와 시간에 따라 변화한다. 그림 10-12에서 보여주는 불포화 투수계수의 변화는 초기 불포화 투수계수 값과 침투수 크기에 따라 습윤과정과 건조과정의 투수계수의 변화는 다양하였다. 각기 다른 투수계수와 포화체적함수비의 차이 때문에 일관된 경향을 찾기는 어려웠다. 따라서 건조와 습윤과정의 투수계수 변화는 항상 일치하지 않고 침투수의 크기에 따라 시간에 따른 변화 모습도 달랐다.

그림 13-15는 유한요소해석 요소들을 나타낸 그림 8에서 지하수위 높이를 기준으로 볼 때 각각 3, 2, 1m 위에 위치한 절점 1, 7, 13(또는 3, 9, 15)에서 얻은 시간에 따른 모관흡수력의 변화를 보여준다. 모관흡수력의 감소 경향에서 인제와 도계 시료는 침투수에 의해 지표면(3m 지점)에서 급격하게 감소하고 포화체적함수비가 작은 습윤과정의 경우 시간에 따라 포화되는 모습을 보였지만, 건조과정은 시간에 따라 불포화 상태로 유지되고 있음을 알 수 있다. 투수계수의 변화하는 경향과 마찬가지로 함수특성곡선의 이력현상에 따른 지반의 모관흡수력의 경향도 상대적인 차이를 보이고 있다. 화강 풍화토와 다르게 세립분이 많은 실트질 지반에서는 침투수에 의한 포화 진행속도가 느리기 때문에 포화되지 않고 지반 내 모관흡수력을 여전히 유지하고 있음을 알 수 있었다. 투수계수가 작을수록 불포화 침투속도가 느려지면서 건조과정과 습윤과정의 이력현상이 불포화 지반 내에서 뚜렷한 차이가 있었다. 그림 13-15에서 공통적으로, 침투가 일어나는 지표면 부근에서 모관흡수력의 차이를 볼 수 있으나, 2m와 1m 지점에서 건조와

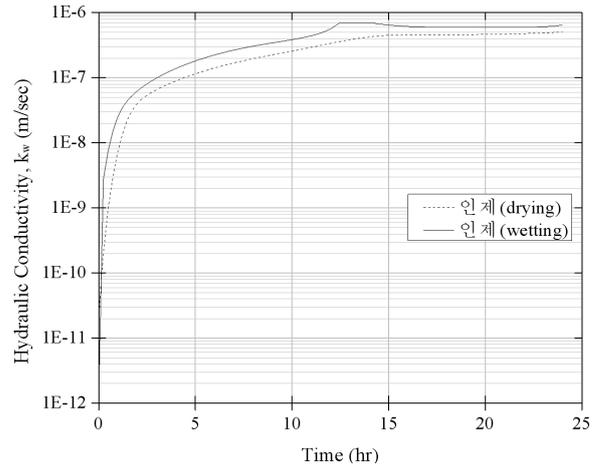


그림 10. 인제 화강풍화토 지표면에서 불포화 투수계수 변화

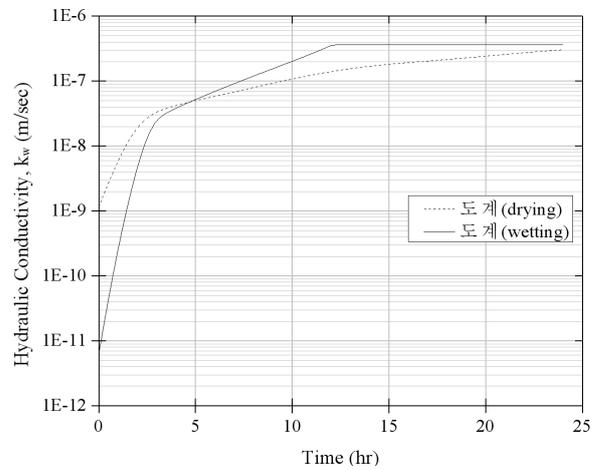


그림 11. 도계 화강풍화토 지표면에서 불포화 투수계수 변화

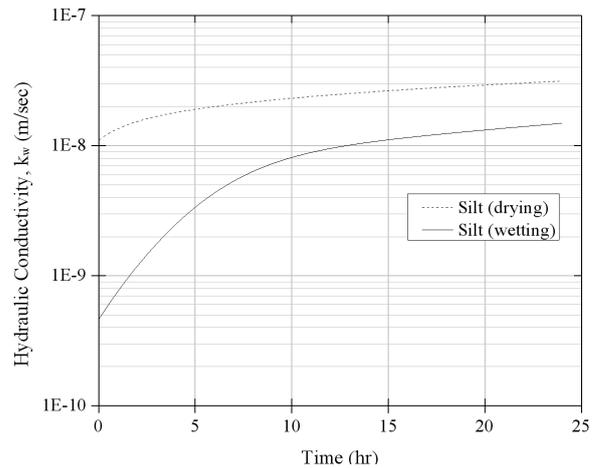


그림 12. Silt 지표면에서 불포화 투수계수 변화

습윤과정에 따른 이력현상의 차이점은 1일 동안의 침투 해석 시간으로는 불포화 강도의 변화가 거의 없었다. 3m지점 결과에서 matric suction 값이 0 이하로 낮아지는 현상은 불포화 지반의 강도가 없다는 것을 의미하며,

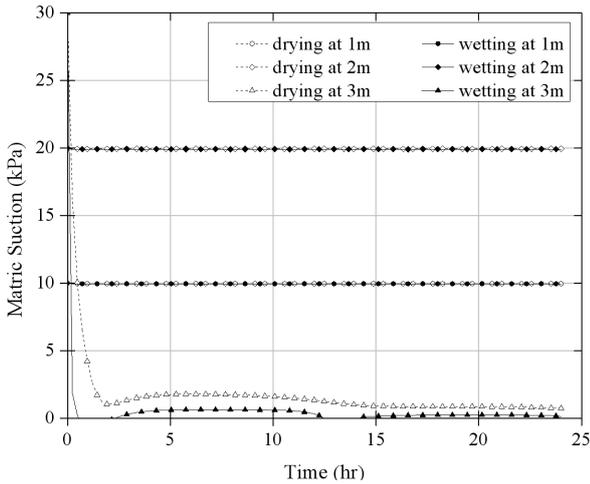


그림 13. 지반 내 위치별 시간에 따른 모관흡수력 변화(인제)

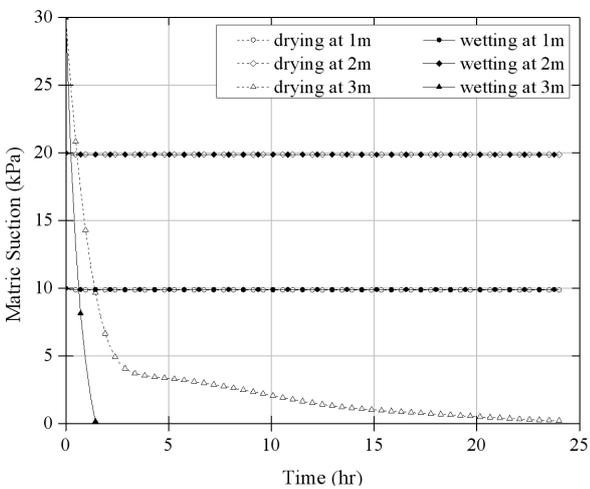


그림 14. 지반 내 위치별 시간에 따른 모관흡수력 변화(도계)

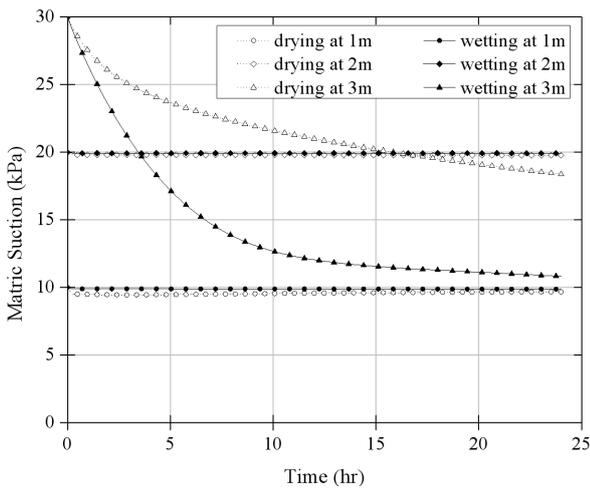


그림 15. 지반 내 위치별 시간에 따른 모관흡수력 변화(Silt)

포화된 이후 정수압의 크기와 위치의 결과는 파악하지 못하여 0 이하의 값은 표시하지 않았다.

5. 결론

부분포화토 물리적 특성으로 함수특성곡선의 건조과정을 일반적으로 적용하지만, 습윤과정으로 얻어지는 함수특성곡선의 수리학적 특성은 또다른 이력현상이 발생된다. 물의 침투로 인하여 지표면 변형과 포화체적 함수비 변화가 지반 내 모관흡수력의 차이를 나타내며, 부분포화 지반의 적절한 해석을 위하여 조건에 따른 적절한 사용이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 침투수에 의해 지반 변형을 고려하는 유한요소해석 프로그램을 이용하여 이력현상으로 인한 함수특성 차이점을 확인하기 위해 지표면의 수직변위, 불포화 투수계수의 변화 그리고 지반 내부의 모관흡수력 변화를 화강풍화토와 실트질 시료를 대상으로 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 이력현상을 갖는 함수특성곡선의 차이점은 실험 첫 단계에서 얻을 수 있는 건조과정 곡선과 다음단계인 습윤과정 곡선에서 포화체적함수비가 일치하지 않아 발생하는 문제에서 야기된다. 추가적으로 발생하는 이력현상은 van Genuchten 방정식의 α 계수(공기 함입치)의 차이가 크게 발생하는 도계 화강풍화토에서 차이가 크게 나타난다.
- (2) 유한요소해석 프로그램에서 상대투수계수(k_{rw})는 유효포화도의 함수로 이루어져 있고, 포화투수계수(k_s)는 간극률의 함수로 구성된다. 따라서 포화도 역시 간극률에 따라 변화되는 변수이므로 시간에 따른 불포화 투수계수의 변화는 이력현상에서 나타나는 포화체적함수비 차이에서 불포화 특성이 크게 좌우된다.
- (3) 함수특성곡선의 이력현상에 대한 차이는 부분포화 지반의 침투 상황에 따라 적용에 대한 구분이 필요하지만, 불포화 투수계수와 전단강도를 예측하기 위한 시료의 물리적 특징이기 때문에 지반 조건에 따른 적절한 함수특성곡선의 선택은 지반강도 해석에 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-355-D00068).

참고문헌

- 김재홍, 김유성 (2011), 부분포화토의 침투와 흡의 거동에 따른 유효응력 계수 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제27권, 12호, pp. 117-126.
- Borja, R.I. (2004), "Cam-Clay Plasticity. Part V: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.193, pp.5301-5338.
- Coussy, O. (2004). *Poromechanics*, John Wiley and Sons, New York, pp.45-51, 157-168.
- de Boer, R. (2005). *Trends in Continuum Mechanics of Porous Media: Theory and Applications of Transport in Porous Media*, Springer.
- Ebel, B.A., Loague, K., Borja, R.I. (2010), "The impacts of hysteresis on variably saturated hydrologic response and slope failure," *Environmental Earth Sciences*, Vol.61, No.6 pp.1215-1225.
- Guan, G.S., Rahardjo, H. and Leong, E.C. (2010), "Shear Strength Equations for Unsaturated Soil under Drying and Wetting," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.4, pp.594-606.
- Hughes, T.J.R. (1987). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, Dover, New Jersey.
- Khalili, N., Habte, M.A. and Zargarbashi, S. (2008), "A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hysteresis," *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.872-889.
- Kim, J. (2010), "Plasticity modeling and coupled finite element analysis for partially-saturated soils," Ph.D. Thesis, University of Colorado at Boulder, US.
- Kumar, S. and Malik, R.S. (1990), "Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture," *Soil Science*, Vol.150, No.6, pp.883-888.
- Laloui, L., Klubertanz, G. and Vulliet, L. (2003), "Solid-liquid-air coupling in multiphase porous media," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.27, No.3, pp.183-206.
- Laroussi, C.H. and Debacker, L.W. (1979), "Relations between geometrical properties of glass bead media and their main $\psi(\theta)$ hysteresis loops," *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 43, pp.646-650.
- Letey, J., Osborn, J. and Pelishek, R.E. (1962), "Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand," *Soil Science*, Vol.93, pp.149-153.
- Lu, N., Godt, J.W. and Wu, D.T. (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil," *Water Resources Research*, Vol.46: W05515.
- Lu, N. and Likos, W. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
- Ma, K.C., Tan, Y.C., and Chen, C.H. (2011), "The influence of water retention curve hysteresis on the stability of unsaturated soil slopes," *Hydrological Processes*, online.
- Miller, G.A., Khoury, C.N., Muraleetharan, K.K., Liu, C and Kibbey, T.C.G. (2008), "Effects of soil skeleton deformations on hysteretic soil water characteristic curves," *Water Resources Research*, Vol.44, W00C06.
- Mualem, Y. (1976), "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media," *Water Resource Research*, Vol.12, pp.513-522.
- Ng, C.W.W. and Pang, Y.W. (2000), "Influence of Stress State on Soil-Water Characteristics and Slope Stability," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.2, pp. 157-166.
- Nuth, M. and Laloui, L. (2008), "Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils," *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.835-844.
- Pham, H.Q., Fredlund, D.G. and Barbour, S.L. (2003), "A practical hysteresis model for the soil-water characteristic curve for soils with negligible volume change," *Geotechnique*, Vol.53, No.2, pp. 293-298.
- van Genuchten, M. (1980), "Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.35-53.
- Wayllace, A. and Lu, N. (2012), "A Transient Water Release and Imbibitions Method for Rapidly Measuring Wetting and Drying Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity Functions," *Geotechnical Testing Journal*, Vol.35, No.1, pp.103-117.

(접수일자 2012. 3. 8, 심사완료일 2012. 4. 14)