

## 상재하중의 영향을 고려한 불포화 풍화토의 함수특성 평가 Evaluation of Overburden Pressure on Soil-Water Retention Characteristics of Unsaturated Weathered Soils

박재영<sup>1)</sup>, Jai-Young Park, 박성완<sup>2)</sup>, Seong-Wan Park

- 1) 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook Univ.  
2) 단국대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook Univ.

**SYNOPSIS** : The purpose of this paper was to investigate the overburden effect on soil-water characteristic curve and unsaturated permeability of unsaturated weathered soils. For this, unsaturated suction and permeability tests under various overburden stress were conducted respectively. Then, the coefficient of unsaturated permeability and moisture capacity of weathered soils were estimated and compared. All these results are presented in the paper.

**Key words** : Unsaturated weathered soils, Overburden pressure, Soil-Water Characteristic Curve, Moisture capacity

### 1. 서 론

지반에서 불포화의 특징은 모세관현상과 삼투압 등에 의하여 발생하는 흡수력의 정도에 따라 물을 보유하는 자유에너지를 가진다. 이러한 흡수력에 따라 지반에서 간극수가 변화하는데 이를 정량적으로 나타내는 것이 함수특성곡선이라 하며 불포화토의 강도 및 침투특성 추정하는데 중요한 물성으로 활용되고 있다. 그러나 최근 불포화토의 이론을 활용하여 설계에 반영하는 사례가 증가하고 있으나 함수특성곡선시험 특성상 많은 시간이 소요되며, 또한 시료에 대한 현장에서의 상재하중에 의한 효과를 고려하지 않은 함수특성곡선을 보편적으로 이용하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 불포화지반의 거동을 합리적으로 평가하기 위하여 편마계열 풍화토를 대상으로 상재하중의 효과를 변화시켜 불포화 함수특성곡선의 변화를 부분적으로 관찰하였으며 이를 통하여 불포화 투수계수와 습윤 용적의 관계도 살펴보았다.

### 2. 불포화 함수특성

#### 2.1 함수특성곡선

지반에서 수분을 보유하고자 하는 능력은 함수특성곡선의 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 정의하고 있다. 그림 1에서 함수특성곡선은 임의의 흡수력을 초과할 때까지는 포화상태를 유지하는 구간인 포

화영역(saturated zone)과 흡수력의 증가에 따라 포화도가 변화하는 전이영역(transition zone), 그리고 흡수력의 증가에 일정한 함수비를 유지하는 잔류영역(residual zone)으로 구분된다(Fredlund & Xing 1994). 여기서 포화영역과 전이영역의 경계는 공기함입치(Air Entry Value)라고 하며 포화상태와 불포화상태의 경계의 흡수력을 말하며 이때의 흡수력을 초과할 때까지 흙 속의 간극 밖으로 물이 유출되지 않음을 의미한다. 따라서 공기함입치와 전이영역에서의 기울기는 함수특성곡선을 결정하는 중요한 요소이다.

또한 지반의 종류나 특성에 따라 정도의 차이는 있으나 함수특성곡선시험에서 수분이 흙 입자에 흡착되어 간극수가 증가되는 현상을 습윤과정, 그리고 수분이 흙 입자에 탈착되어 간극수가 감소하는 과정을 건조과정이라고 한다. 동일한 시료임에도 건조와 습윤과정의 경로에 따라 차이를 보이는 현상을 이력현상이라고 하며 곡선 내부의 면적이 이력크기 정도를 말한다.

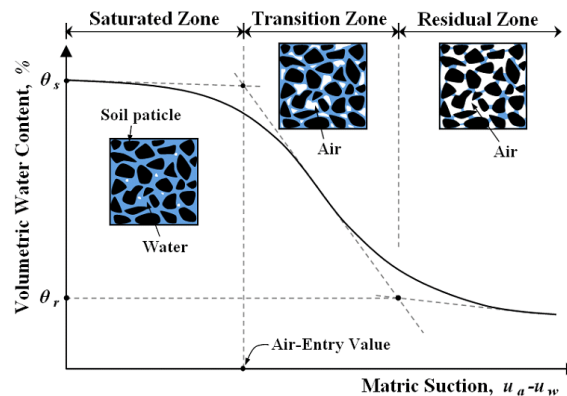


그림 1. 전형적인 함수특성곡선 (Fredlund & Xing, 1994)

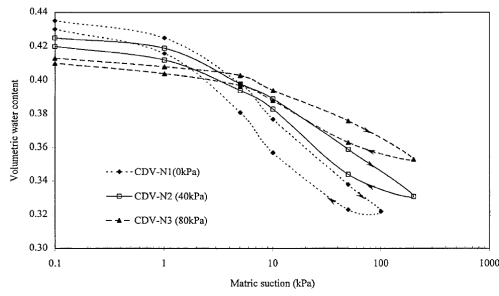
## 2.2 응력상태의 함수특성곡선

이론적으로 응력의 변화가 함수특성곡선에 영향을 줄 수 있다고 하였으며 이후 여러 실험 연구를 통하여 수직응력에 의한 영향을 분석된 바 있다(Vanapalli et al. 1999, Ng and Pang 2000, and Ho et al. 2006). 또한 그림 2와 같이 구속압의 변화도 함수특성곡선에 영향을 주고 있는데 응력이 증가할수록 함수특성곡선의 기울기는 완만해지며 공기함입치는 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다(성상규 등 2003; Hoyos 등 2006).

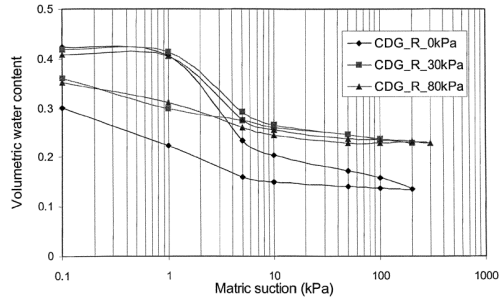
## 3. 실내시험

### 3.1 시험방법

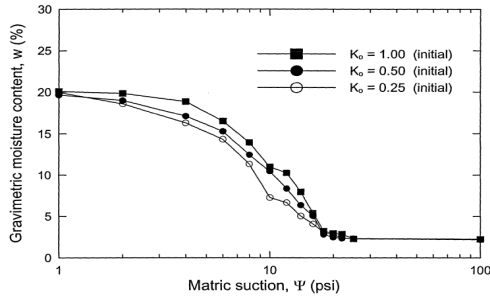
본 연구에서는 함수특성곡선의 수직 상재하중에 대한 효과를 살펴보기 위하여 Fredlund Type SWCC 장치를 활용하였으며 그림 3과 같다. 상재하중 상태에서 가압된 공기압과 배출된 간극수의 에너지 평형을 확인하여 연속적인 간극수-흡수력관계를 측정하였다. 시험에 사용된 시료는 편마계열 풍화토로 각 시편은 건조단위중량을  $1.67\text{t/m}^3$ 에 최적함수비를 적용하였고 기본물성은 표 1과 같다.



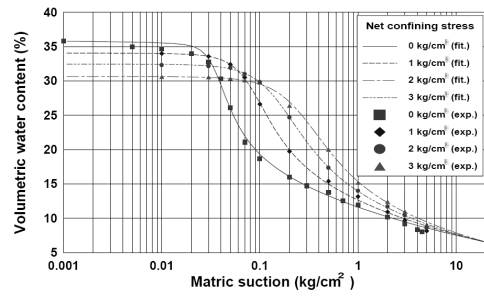
(a) Ng and Pang(2000)



(b) Ho 등(2006)



(c) Hoyos 등(2006)

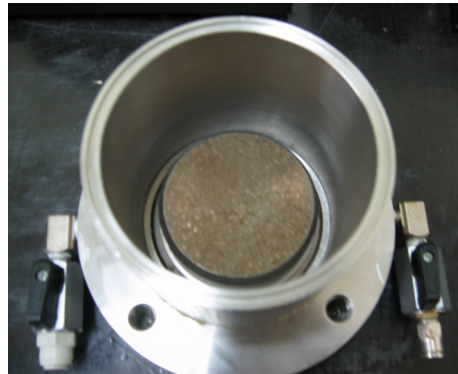


(d) 정상규 등(2003)

그림 2. 응력상태에 따른 함수특성곡선



(a) 시험기 전경



(b) 시험기 내부

그림 3. SWCC 시험장치

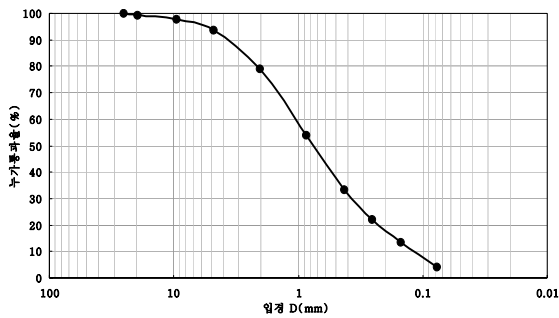


그림 4. 풍화토의 입도분포 곡선

표 1. 풍화토의 기본물성

| USCS                                   | SP-SM |
|--|-------|
| $G_s$                                  | 2.676 |
| $\gamma_{d, max}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 16.75 |
| O.M.C(%)                               | 10    |
| LL(%)                                  | -     |
| PL(%)                                  | N.P   |
| Passing No. 200 sieve(%)               | 3.7   |

본 연구에서 수직 상재하중에 대한 효과는 수직하중을 0kPa, 25kPa, 50kPa, 75kPa로 시료에 가하였고 최초 시료는 해당 응력을 시료에 가하며 약 24시간 포화 후 부피팽창을 최대로 억제시킨 후 포화후 시험에 사용하였다. 상재하중 상태에 대한 건조와 습윤과정의 흡수력 관계를 각각 획득하였으며 함수특성곡선은 Fredlund and Xing(1994)의 경험적인 모델 식으로 정량화하였는데 식 (1)과 (2)와 같다.

$$\theta = \alpha(\psi)\theta_s \left[ \frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad (1)$$

$$\alpha(\psi) = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \quad (2)$$

여기서  $\psi$ 은 흡수력이고,  $\theta$ 는 체적함수비이다.  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 계수로서 최소자승법을 사용하여 결정되며 시험결과와 근접하게 일치된 곡선을 얻을 수 있다.  $a$ 는 공기함입치,  $n$ 은 함수특성곡선의 기울기,  $m$ 은 잔류함수비와 관계하는 계수로서 불포화 특성을 알 수 있는 중요한 매개변수이다. 그리고  $e$ 는 자연로그 상수이며,  $\psi_r$ 은 잔류흡수력,  $\theta_s$  초기체적함수비,  $\alpha(\psi)$ 는 보정계수이다.

### 3.2 시험결과 분석

상재하중 상태에 대한 건조과정과 습윤과정의 함수특성곡선은 그림 5와 같다. 수직의 상재하중이 증가함에 따라 함수특성곡선의 공기함입치는 증가하고 전이영역의 기울기는 감소하여 완만해지는 경향을 보였다. 그림 6은 모델의  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 계수를 상재하중의 변화에 따라 나타낸 것이다. 공기함입치와 관계된  $a$ 계수는 증가하며, 기울기와 관계된  $n$ 계수는 감소하며, 잔류함수비와 관계된  $m$ 계수는 증가함을 보이는 데 이는 함수특성곡선의 변화 경향을 잘 나타내고 있다. 또한 건조와 습윤과정의 함수특성곡선의 이력이 상재하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

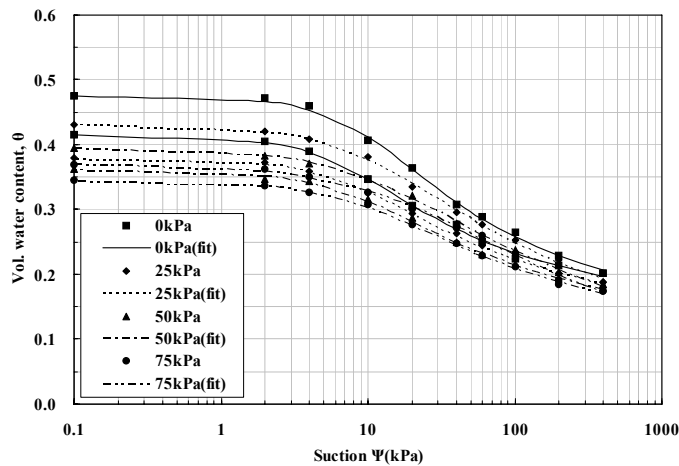


그림 5. 상재하중단계별 편마풍화토 함수특성곡선(건조-습윤곡선)

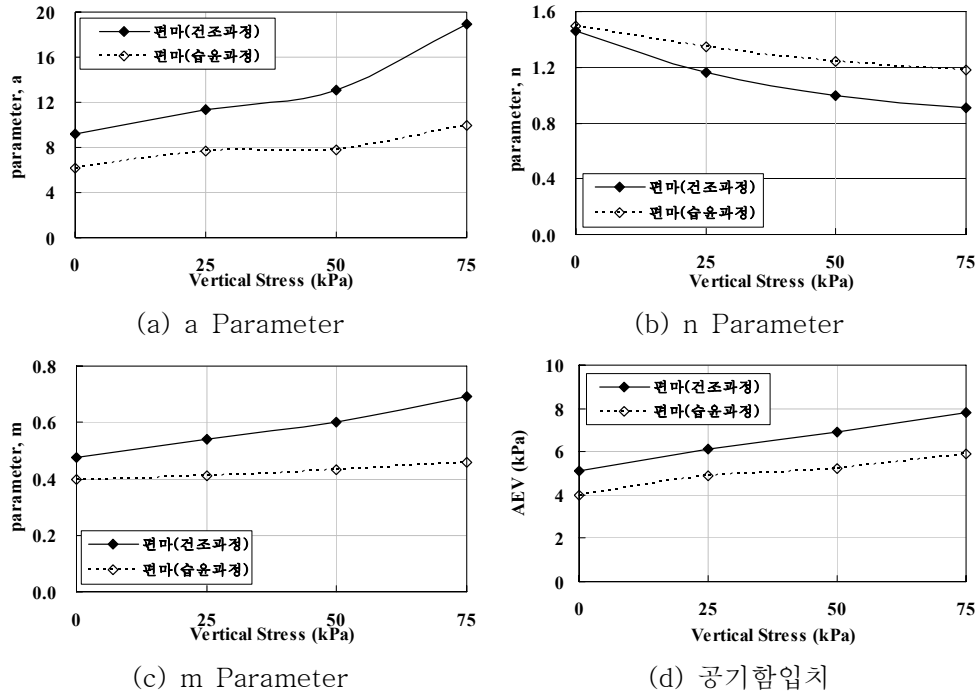


그림 6. 편마풍화토의 SWCC Parameter (Fredlund & Xing)

전체적으로 응력에 대한 함수특성곡선의 변화는 모세관현상이 지배적인 낮은 흡인력구간에서 수직 응력에 의한 간극크기의 감소에 기인하는 것으로 판단되며 전기·화학적 현상이 지배하는 높은 흡수력 구간에서는 그 변화가 미미함을 알 수 있었다.

### 3.2.2 불포화 투수계수의 추정 및 습윤용적

불포화 투수계수는 포화투수계수에 비해 그 값이 매우 작고 실험 중 불포화 상태에서의 포화도를 일정하게 유지하기가 매우 어려우며 실험치를 얻기 위해 필요한 비용과 시간이 비효율적이어서 매번 실험을 수행하는 것은 한계가 있다. 따라서 함수특성곡선을 기본으로 제안된 경험식을 활용하여 불포화 투수계수를 구하는 간접적인 방법이 이용되고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 Fredlund & Xing (1994)에 의한 함수특성곡선과 불포화 투수계수에 관한 지배 방정식을 이용하였고 식 (3)과 같다.

$$K_r = \theta^q(\psi) \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_w)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

여기서,  $K_r$  = 포화 투수계수에 대한 불포화 투수계수에 대한 비( $K_r = K_w/K_s$ )

$K_s$  = 실험에 의한 포화 투수계수

$K_w$  = 불포화 투수계수

$\Theta^a(\psi) =$  보정계수(보통  $\Theta^a(\psi)=1$ )

$b = \ln(10^6)$

$\Theta' =$  불포화 체적함수비( $\Theta$ )를 모관흡수력( $\psi$ )에 대해 미분한 값

$y =$  모관흡수력( $\psi$ )을 대수(logarithm)로 나타낸 변수

$\Theta_s =$  포화 체적함수비

$\psi_{aev} =$  공기함입치(Air entry value)

Rowe Cell 시험장치를 이용하여 단계적으로 상재하중을 증가시켜 수직방향의 포화투수시험을 수행한 결과는 표 2와 같다. 이 결과를 바탕으로 편마풍화토의 상재하중단계에 따른 함수특성곡선 결과를 식 (3)에 적용하여 불포화투수계수를 간접적으로 추정하였다.

표 2. 편마풍화토의 포화투수계수( $K_s$ , cm/sec)

| 구 분                  | 상 재 하 중 (kPa)         |                       |                       |                       |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                      | 0                     | 25                    | 50                    | 75                    |
| 편마풍화토 $k_s$ (cm/sec) | $1.78 \times 10^{-4}$ | $1.52 \times 10^{-4}$ | $1.37 \times 10^{-4}$ | $1.31 \times 10^{-4}$ |

추정결과는 상재하중의 영향을 잘 나타내기 위해 semi-log그래프 이용하여 그림 7과 8에 나타내었다. 결과 편마풍화토의 투수계수는 상재하중의 증가에 따라 전체 흡수력 구간에서 상대적으로 더 낮은 불포화 투수계수 값을 갖는 경향을 보이며 건조과정보다 습윤과정의 경우 흡수력의 증가에 따라 투수계수가 감소하는 변화가 많음을 알 수 있다.

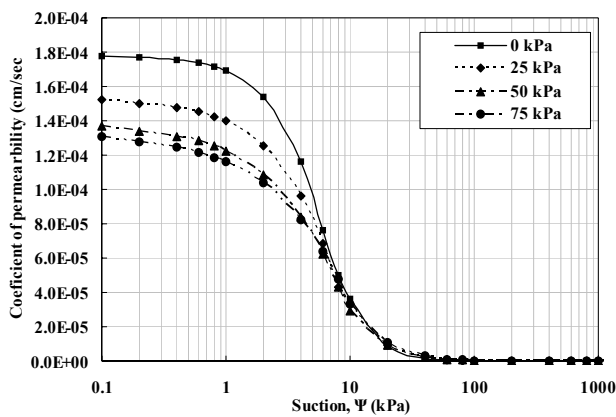


그림 7. 편마풍화토 불포화 투수계수(건조과정)

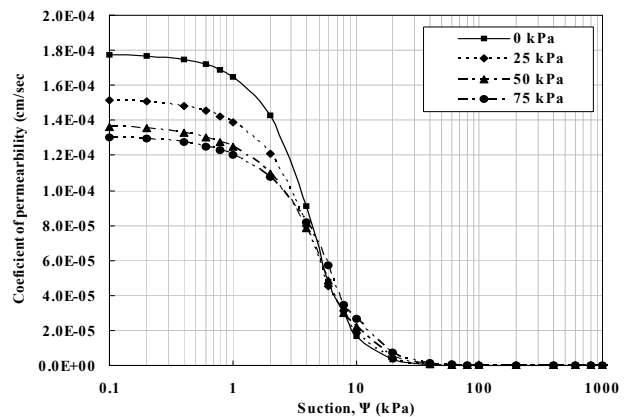


그림 8. 편마풍화토 불포화 투수계수(습윤과정)

또한 단위흡수력 당 체적함수비의 변화는 습윤용적(specific moisture capacity)으로 나타낼 수 있는데 식(4)와 같다. 함수특성곡선의 모양은 비선형적인 특징을 가지므로 흡수력에 따른 함수비의 변화를 나타내는 이러한 관계는 불포화토의 부정류 흐름의 파악 있어서 매우 중요하다.

$$\alpha(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial h_m} \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 체적함수비이며  $h_m$ 은 흡수력(수두, cm)이다. 식 (4)를 이용하여 각 하중단계에 따른 함수특성곡선으로부터 습윤용적을 산정한 결과는 그림 9와 10과 같다. 편마풍화토의 건조과정과 습윤과

정에 대한 습윤용적을 흡수력과 체적함수비로 도시하였다. 습윤용적의 크기는 단위 흡수력당 함수비의 변화가 크고 작음을 나타내는데 건조과정보다는 습윤과정에서 이러한 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 상재하중이 증가할수록 습윤용적의 감소를 보이는데 이는 평균적인 간극의 크기감소로 인해 단위 흡수력 당 함수비의 변화가 작아지는 것으로 판단된다.

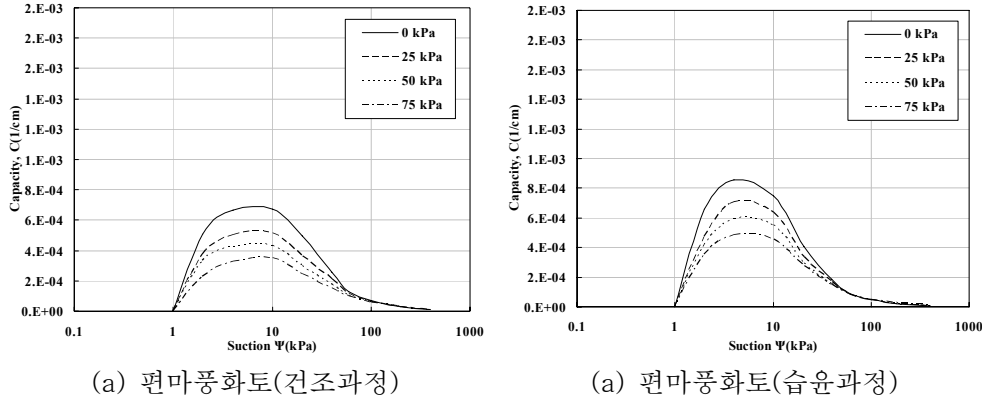


그림 9. 편마풍화토의 흡수력에 대한 습윤용적

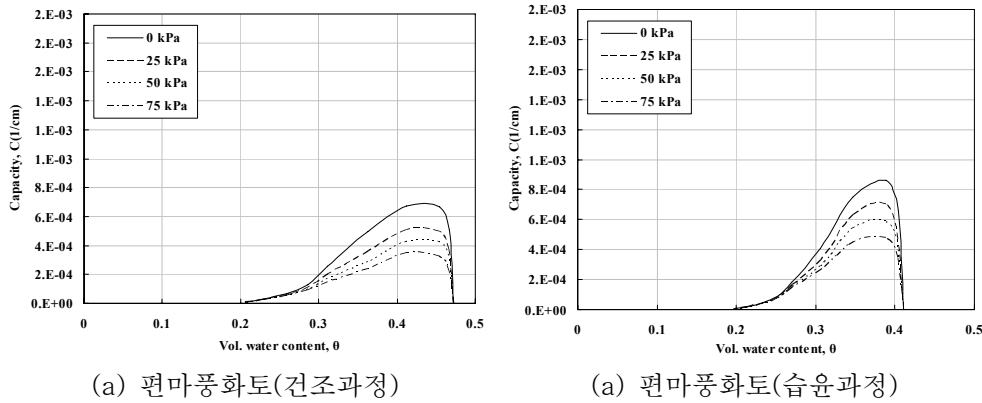


그림 10. 편마풍화토의 체적함수비에 대한 습윤용적

#### 4. 종합

풍화토를 대상으로 상재하중을 변화하여 함수특성곡선 시험을 실시한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 수직응력이 증가할수록 공기함입치는 증가하며 흡수력 전이구간에서의 곡선의 기울기는 완만해지는데 주로 모세관현상이 지배적인 낮은 흡수력구간에서 수직응력에 의해 간극크기분포의 감소로 함수특성곡선이 크게 변화함에 기인하고 있다.
- (2) 건조과정과 습윤과정의 함수특성곡선을 통해 이력을 확인한 결과 상재하중이 증가함에 따라 이력의 크기는 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 응력증가에 따라 함수특성곡선식의 a와 m계수는 증가함을 보이고 n계수는 감소하고 있는데 각각 공기함입치의 증가와 기울기의 감소를 잘 표현하고 있다.
- (4) 상재하중의 증가에 따라 풍화시료의 불포화 투수계수는 전체 흡수력 구간에서 상대적으로 더 낮은 불포화 투수계수 값을 갖는 경향을 보였으며 습윤용적은 감소하는 경향을 나타내었다.

## 참고문헌

1. 성상규, 이인모 (2003), "화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향", 한국지반공학회 논문집, 제19권, 2호, pp.27-38.
2. Fredlund, D. G. and Xing, A.(1994). "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical journal, Vol. 31, No. 4, pp. 521~532.
3. Ho, K. M. Y., Ng, C. W. W., Ho, K. K. S. and Tang, W. H.(2006), "State-dependent Soil-water Characteristic Curves of Weathered Soils", ASCE, Geotechnical Special Pub. No.147, pp.1302-1313.
4. Hoyos, L. R., Takkabutr, P. and Puppala, A. J.(2006), "A Modified Pressure Plate Device for SWCC Testing under Anisotropic Stress States", ASCE, Geotechnical Special Pub. No.147, pp. 1753-1763.
5. Ng, C. W. W. and Pang, Y. W.(2000a), "Experimental Investigation of the Soil-water Characteristics of a Volcanic Soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, No.6, pp.1252-1264.
6. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G. and Pufahl, D. E. (1999), "The Influence of Soil Structure and Stress History on the soil-water characteristics of a compacted till" *Géotechnique*, Vol.49, No.2, pp.143-159.