

편마풍화토의 다짐밀도에 따른 불포화 흡수응력 특성

Density Effect on Suction Stress Characteristics of Compacted Weathered Gneiss Soils

박 성 완¹ Park, Seong-Wan
권 홍 기³ Kwon, Hong-Gi

김 병 수² Kim, Byeong-Su
임 재 성³ Lim, Jae-Seong

Abstract

In order to examine the unsaturated shear strength characteristics of compacted weathered gneiss soils, the constant water content compression (CWCC) test was carried out. Specimens were made by static compaction under two densities conditions. The shear behavior in accordance with an initial suction obtained by varying initial degrees of saturation was evaluated. The suction could be directly measured by the use of the ceramic disk and the pore-water pressure transducer. The results of the peak shear strength from the CWCC test were examined using the relationship with M_p line from triaxial test under the saturated state, that is, by means of the suction stress which was calculated using the measured suction. In addition, the applicability of the suction stress to the unsaturated shear behaviour of compacted weathered gneiss soils was discussed by applying Suction stress-SWCC Method (SSM).

요 지

본 연구에서는 다짐된 편마풍화토의 불포화토 전단강도특성을 규명하기 위하여, Constant Water Content Compression (CWCC) 시험을 실시하였다. 두 가지 상대밀도로 구분하여 정적 다짐으로 공시체가 제작되었고, 초기 포화도를 변화 시킴으로써 초기 흡수력 및 최대전단강도가 구현될 때의 흡수력에 따른 전단거동을 살펴보았다. 흡수력은 세라믹디스크와 간극수압계의 설치에 의해 직접 측정되었고, 이 흡수력을 적용하여 흡수응력(p_s)이 추정되었다. CWCC 시험에서 얻어진 최대압축강도에 대한 결과는 삼축압축시험에서의 포화상태 파괴선(M_p Line)과의 관계, 즉 흡수력에 의해 발현된 전단강도의 변화를 흡수응력을 이용하여 살펴보았다. 또한, Kim 등(2010)이 제안한 Suction stress-SWCC Method (SSM)을 활용하여 흡수응력의 적용성에 대해 논하였다.

Keywords : Unsaturated shear strength, Constant Water Content Compression test, Suction stress, Suction stress-SWCC Method (SSM)

1. 서 론

1960년대부터 약 50년간 불포화토 전단강도의 특성

을 밝히고자 하는 연구가 주로 불포화토 삼축압축시험을 통하여 이루어져 왔고(Toll, 1990; Kohgo et al., 1993; Maatouk et al., 1995; Wheeler and Sivakmar, 1995;

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3472, Fax: +82-31-8005-3496, spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 일본 오카야마대학교 환경디자인공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Environmental and Civil Eng., Okayama Univ., Japan)

3 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Dankook Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Karube and Kawai, 2001), 이러한 가운데 기존의 불포화토 삼축압축시험을 통한 방법 이외의 다양한 실험적 접근이 시도되어 왔다(Bishop and Donald, 1961; Satija and Gulhati 1979; Shimizu and Tabuchi, 1993; Ridley 1995; Cunningham et al., 2003; Kim et al., 2010). Fredlund and Rahardjo(1993)에 의해 일축압축시험을 통한 불포화토의 비배수 전단강도에 대한 평가가 이루어진 이후, Kato et al.(2001)와 Chae et al.(2010)은 흡수력과 비배수 전단강도를 평가하기 위한 목적으로 일축압축시험을 진행하였다. 그들은 포화도와 건조단위중량의 변화를 통하여 흡수력과 포화도, 흡수응력을 포화도와 일축압축강도에 대한 관계에 대하여 정리하였고, 일축압축시험을 통해 불포화토 전단강도의 특성을 효율적으로 관찰할 수 있음을 보였다. 또한, Kim et al.(2010)은 상대적으로 짧은 배수거리로 인한 직접전단시험의 빠른 시험시간에 착안하여, 풍화토를 이용하여 불포화토 직접전단시험을 실시하였다. 이들은 포화과 불포화상태에서 얻어진 직접전단시험 결과를 활용하여 불포화상태에서의 최대전단응력과 포화상태 파괴선과의 관계, 즉 흡수력에 의한 겉보기 점착력 향에 대해 연구하였다.

일반적으로 얇은 사면이나 제방, 그리고 굴착벽면 등의 구속압이 상대적으로 낮은 상태에서 상대밀도에 따른 불포화토 전단강도 특성의 규명을 통해 현장 적용이 효율적으로 진행될 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Constant Water Content Compression(CWCC) 시험기를 이용해서, 두 가지 상대밀도로 구분되어 다짐된 편마풍화토의 초기 포화도에 따른 불포화토 전단강도특성을 규명하고자 한다. CWCC 시험에서 직접 측정된 흡수력을 적용하여 흡수응력(p_s)을 추정하고, 이를 통해 삼축압축시험에서의 포화상태 파괴선 (M_p Line)과의 관계를 조사할 것이다. 또한, Kim et al.(2010)이 제안한 Suction stress-SWCC Method(SSM)을 활용하여 흡수응력의 적용성에 대해 논한다.

2. 이론적 배경

2.1 불포화토 전단강도

불포화토 전단강도에 개념을 이해하기 위해서는 불포화토의 유효응력개념을 이해할 필요가 있다. 일반적으로 불포화토 유효응력은 Bishop(1959)에 의해 Terzaghi의 기존의 포화토 이론을 확장한 불포화토 유효응력개

념, 즉 식 (1)이 이용되어 왔다. 그 후, 불포화토 유효응력상태에 대한 연구들이 Bishop(1959)의 이론을 바탕으로 발전해 왔다. Bishop과 Blight(1963)는 $(\sigma - u_a)$ 과 $(u_a - u_w)$ 라는 두 독립상태변수를 사용하여 χ 값을 추정할 수 있다고 보고하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

여기서, σ' : 유효응력, σ : 전응력, χ : 유효응력계수, 0~1사이의 값을 갖는다, u_a : 간극공기압, u_w : 간극수압.

이러한 불포화토 유효응력개념을 바탕으로 많은 불포화토 전단강도식들이 제안되어 왔다. 대표적으로 Fredlund와 Morgenstern(1978)은 확장된 Mohr-Coulomb 파괴기준을 기준으로 앞서의 두 독립상태변수, $(\sigma - u_a)$ 과 $(u_a - u_w)$ 를 사용하여 식 (2)와 같은 불포화토 전단강도식을 제안하였다. 이들의 연구에서는 흡수력의 증가에 따라 불포화토 전단강도가 비선형적으로 증가함을 실험적 결과를 통해 보고하였다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2)$$

여기서, τ : 전단응력, c' : 유효점착력, ϕ' : 유효마찰각, ϕ^b : 흡수력 변화에 따른 전단강도의 변화를 나타내는 각도.

이와 더불어 불포화토 전단강도의 정확한 추정을 위해 여러 제안식이 보고되었다. 주로 Mohr-Coulomb 파괴기준을 근거로 흡수력의 변화에 따라 겉보기 점착력 향의 변화추이가 공통적으로 연구되었다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Karube et al., 1996; Vanapalli et al., 1996; Kohgo et al., 2003; Lu and Likos, 2006).

2.2 흡수응력(Suction stress, p_s)

일반적으로 불포화토 연구에 있어서 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, 이하 SWCC)은 가장 중요한 기본적인 물리적 성질이며, 지반 내부의 함수량 또는 포화도와 흡수력의 관계를 나타낸다. 또한, 함수특성곡선에서는 건조 과정과 습윤 과정에서의 함수특성 차이인 이력(Hysteresis)이 발생하며, 흡의 종류에 따라 경로가 다르다. 즉, 같은 동일한 흡수력에서 건조와 습윤 경로에 따라 동일하지 않은 간극수가 존재한다. 간극수의 상태가 다르면, 간극수의 분포가 다르게 된다.

Karube와 Kato(1994)는 이와 같은 함수특성에 대해서 Fig. 1과 같이 벌크수와 메니스커스수의 개념으로 정의하고 있다. 여기서, 벌크수(bulk water)는 흙입자들의 접합으로 이루어진 공간을 차지하고 있는 간극수이고, 메니스커스수(meniscus water)는 흙입자들 사이의 접점에 존재하는 간극수를 의미한다. 포화도의 증가에 따라 벌크수는 간극을 차지하는 비율이 높아지며 메니스커스수의 비율은 감소한다. 이는 흙입자의 골격에 있어서 서로 다른 영향을 미치게 된다. 따라서, 흙입자 내부의 두 가지 간극수 형태에 따라 흡수력이 불포화토의 거동에 영향을 줄 수 있다고 생각할 수 있다. 벌크수에 의해 발생하는 흡수력은 흙입자들의 강성을 증가시키고, 음의 간극수압과 같은 작용을 통하여 흙입자들을 압축하여 체적을 감소시킨다. 메니스커스수에 의해 발생하는 흡수력은 흙입자간의 인력을 증가시키고 마찬가지로 흙입자간의 강성을 증가시킨다.

Karube 등(1996)는 메니스커스수의 영향으로 발생하는 응력 성분인 메니스커스 응력(p_m)과 벌크수의 영향으로 발생하는 응력 성분인 벌크 응력(p_b)으로 석선에 의해 유발되는 토괴의 불포화토 응력상태, 즉 흡수응력 (suction stress, p_s)을 정의하였다. 즉, 식 (3)과 같이 메니스커스 응력(p_m)과 벌크 응력(p_b)의 합으로써 흡수응력 방정식을 제안하였다.

$$p_s = p_m + p_b = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot (u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서, S_r : 포화도, S_{r0} : 잔류포화도.

이와 달리 Lu와 Likos(2006)는 불포화토의 전단강도 식을 활용하여 흡수응력 p_s 를 설명하였는데 다음식 (4)와 같이 제시하였다.

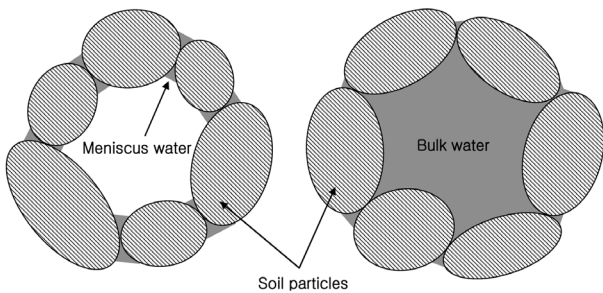


Fig. 1. Concept of meniscus water and bulk water (Karube and Kato, 1994)

$$p_s = \frac{c^s}{\tan \phi'} = \frac{\tau - c' - (\sigma - u_a) \tan \phi'}{\tan \phi'} \quad (4a)$$

$$p_s = -(u_a - u_w) \quad \text{if } (u_a - u_w) \leq 0 \quad (4b)$$

$$p_s = f(u_a - u_w) \quad \text{if } (u_a - u_w) > 0 \quad (4c)$$

여기서, c^s : 겉보기 점착력, u_a : 간극공기압, u_w : 간극수압

또한, Lu와 Likos(2006)는 함수특성곡선을 바탕으로 식 (5)와 같이 흡수응력을 제안하였다.

$$p_s = -\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \times (u_a - u_w) \quad (5)$$

여기서, θ_s : 포화체적함수비, θ : 체적함수비, θ_r : 잔류체적함수비

Karube 등 (1996)와 Lu와 Likos (2006)의 접근 방법은 다르나 두 이론에 의해 증명된 흡수응력 p_s 는 동일한 것임을 확인할 수 있다.

2.3 Suction stress-SWCC Method(SSM)

Kim 등(2010)은 일본의 풍화토를 이용하여 불포화토 직접전단시험을 실시하였다. 이들은 포화와 불포화

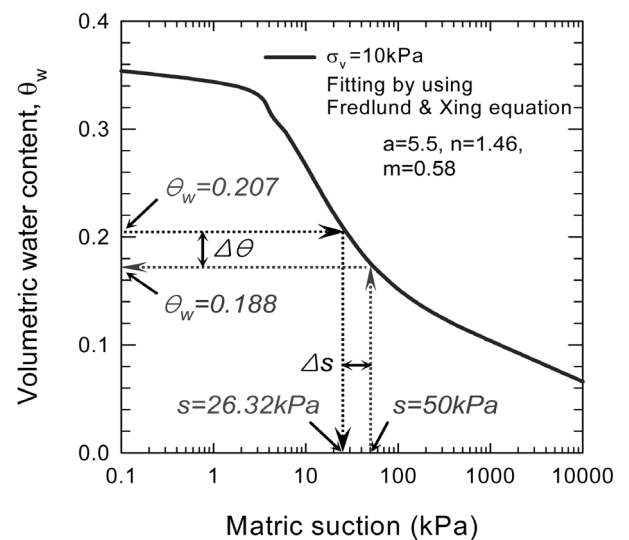


Fig. 2. Difference between the suction of the existing method and the SSM ($s=50$ kPa, $u_a=50$ kPa, $u_w=0$ kPa) (Kim et al., 2010)

상태에서 얻어진 직접전단시험 결과를 활용하여 불포화상태에서의 최대전단응력과 포화상태의 파괴선과의 관계, 즉 석선에 의한 전단강도의 증분을 나타내는 걸 보기 점착력항(Δc)에 대해 연구하였다. Fig. 2는 셀내부 공기압 50kPa, 간극수압 0kPa(즉, 대기압상태)과 연직응력 10kPa의 조건하에서의 SSM과 기존의 방법 사이의 흡수력 차이에 대한 하나의 예를 보이고 있다. 그림에서, 수분특성곡선을 추정하기 위해 Fredlund와 Xing (1994)가 제안한 모델을 사용하였으며, 이 모델에 관련된 계수들로서 a는 공기함입치와 관련된 계수(5.5), n는 함수특성곡선의 기울기와 관계하는 곡선계수(1.46), 그리고 m은 잔류함수비와 관계하는 곡선계수(0.58)가 사용되었다. 여기서, Suction stress-SWCC Method(SSM)는 불포화토 직접전단시험에서 측정된 공시체 내부의 수분량으로부터 계산된 체적함수비($\theta_w=0.207$) 또는 포화도를 이용하여, Fig. 2에서 보이듯 수분특성곡선(SWCC)의 Y축의 체적함수비 항에서 공시체의 흡수력 값($s=26.32\text{kPa}$)을 얻는 방법이다. 이는 지금까지 일반적으로 이용되어 온 기존의 방법에서는 흡수력이 50kPa에 대해 체적함수비가 $\theta_w=0.188$ 이라는 값과 비교하면, 각각 석선값과 체적함수비값에서 차이(Δs , $\Delta\theta_w$)를 보이게 된다. 그들은 전단상자의 공시체 아래 부분에서 측정되는 흡수력이 전단과정 중, 공시체 중간의 전단면에서의 흡수력을 대표하지 못한다고 판단하였다. 이는 전단면의 흡수력이 간극공기압과 간극수압에 의해 일정하지 않다는 것을 뒷받침하고 있다. 따라서, 그들은 전단면에서 흡수력 추정을 위해 SSM을 제안하였고, 간단히 정리하면, SSM은 체적함수비를 기준으로 전단면상의 흡수력을 추정하는 방법으로써, 공시체로부터 측정된 체적함수비 또는 포화도를 토대로 흡수력을 SWCC로부터 결정한다.

또한, 흡수응력(p_s)은 식 (3)을 사용하여 측정된 포화도와 얻어진 흡수력으로부터 계산될 수 있다. 흡수응력 값의 추정은 불포화토 전단강도를 추정할 수 있는 가능성을 보여주었으며, Vanapalli 등 (1996)에 의해 제안된 불포화토 전단강도식을 바탕으로 식 (6)은 식 (7)로 재배열될 수 있다. 이들 연구의 결과로, 연직응력과 최대전단강도의 관계에서 흡수응력을 유효 구속응력으로 적용함으로써 불포화토 전단강도가 포화상태의 파괴선과 일치한다는 것을 알았다.

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan\phi' + s \cdot \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) (\tan\phi')$$

$$= c' + \sigma \cdot \tan\phi' + p_s \cdot \tan\phi' \quad (6)$$

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan\phi' + \Delta c \quad (7)$$

3. 실내시험

3.1 시험재료

본 시험에서는 경기도 북부지역 사패산 터널부근 절토 사면부에서 채취한 편마풍화토를 사용하였다. 다음 시료의 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 다짐시험, 입도분포시험 등의 기본 물성 시험을 실시하였고, 삼축압축시험(CU-TC)을 통하여 점착력과 내부마찰각을 구하였다. Fig. 3은 편마풍화토의 입도분포곡선을 나타내고 있으며, Table 1은 편마풍화토의 기본물성을 나타내고 있다. 또한 편마풍화토의 불포화 특성을 알아보기 위해 최대건조밀도 기준 상대밀도 90%와 95%의 조건으로 함수특성 시험을 실시하였고, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

시료의 함수량과 흡수력의 관계에 대해 추정하기 위해 63.5mm의 직경과 35mm의 높이의 시료를 이용하여 포화과정 후 건조경로로 구하였다. 시험결과를 토대로 식 8과 같이 Fredlund와 Xing(1994)이 제안한 3계수 비선형 모델로 적용하였다. Fig. 4에서는 F&X로 축약하여 표현하고 있다.

$$\theta = C(\psi) \left\{ \frac{\theta_s}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right\} \quad (8)$$

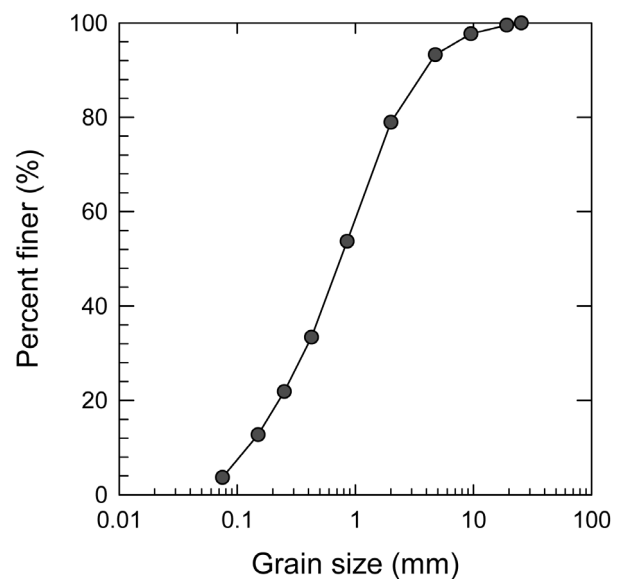


Fig. 3. Grain size distribution curve of weathered Gneiss

Table 1. Properties of weathered Gneiss

Contents		Properties
Particle density, ρ_s (g/cm ³)		2.676
Passing ate #No.200 (%)		3.7
USCS		SP-SM
Liquid limit, (%)		-
Plastic limit, (%)		N.P
Max. dry density, $\gamma_{d \max}$ (g/cm ³)		16.70
Permeability coefficient, K_s (cm/sec)		2.03×10^{-4}
$D_r=90\%$	Cohesion, c (kPa)	0
	Angle of internal Friction, ϕ' (°)	35.2
$D_r=95\%$	Cohesion, c (kPa)	0
	Angle of internal Friction, ϕ' (°)	35.5

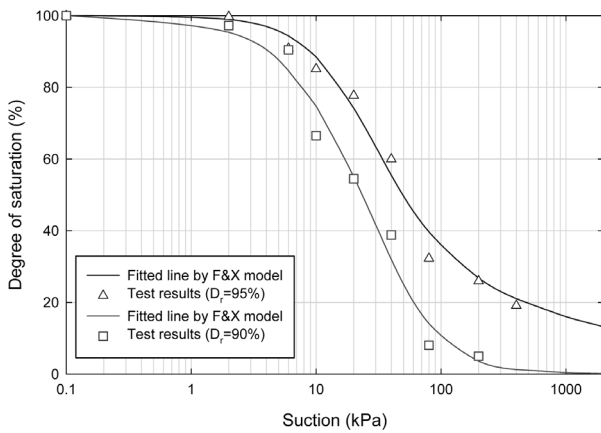


Fig. 4. Soil water characteristic curves of weathered Gneiss

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]} \quad (9)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화시 체적함수비, a 는 공기함입치와 관련된 계수, n 은 함수특성곡선의 기울기와 관계하는 곡선계수, m 은 잔류함수비와 관계하는 곡선계수이다. 또한, $C(\psi)$ 는 보정계수이고, ψ_r 는 잔류체적함수비 θ_r 에 대응하는 흡수력을 의미한다.

따라서, 본 연구에서는 편마풍화토의 함수특성곡선으로부터 비선형 계수 a , n , m 을 상대다짐도별로 얻을 수 있었다. 상대다짐도 90%의 경우, $a=40.63$, $n=1.14$, $m=4.24$ 이고, 상대다짐도 95%의 경우, $a=17.87$, $n=1.60$, $m=0.96$ 이다.

3.2 Constant Water Content Compression(CWCC) 시험기

본 연구에서 이용된 Constant Water Content Compression (CWCC) 시험기는 불포화도 상태에서의 흡수력과 체적

변화를 측정하기 위해 기존의 일축압축장비를 수정한 것이다(Kwon and Park, 2011). 이 시험장치에는 세라믹 디스크(공기함입치: 500kPa)를 설치되었으며, 시료하단 부에서의 간극수압 측정을 통하여 공시체의 흡수력 변화를 측정할 수 있다. 세라믹디스크는 설치 전, 탈기수를 채운 용기에 넣어 진공펌프를 이용하여 24시간이상 약 -100kPa의 압력을 가하여 포화시킨다. 세라믹디스크를 설치 후, 세라믹디스크의 포화유무는 세라믹디스크 표면의 물기를 제거를 통해 순간적으로 간극수압 수치의 변화 값이 30kPa이상이면, 포화상태로 간주한다. 따라서, 세라믹디스크가 완전히 포화된 후 실험을 실시하였기 때문에 간극수압계로부터 측정된 간극수압의 변화를 공시체의 흡수력 변화로 해석이 가능하다. 또한 삼축압축시험기 형태로 셀 내부를 물로 완전히 채우며 이중관 뷰렛에 연결되어 있고, 수위의 변화로부터 외관과 내관의 수 두 차를 인식하는 차압계를 이용하여 전단 시 공시체의 체적변화를 측정할 수 있다. 여기서 이중관 뷰렛은 대기 상태로 개방하여 구속압의 영향을 최소화한다. 공시체와 상부 캡 사이에는 금속 다공판이 설치되어 공시체의 간극공기압을 대기압 상태로 유지할 수 있도록 한다.

전단 시 공시체의 전단변위는 LVDT를 사용하여 측정하며, 압축강도는 셀 윗부분에 설치된 하중센서를 통하여 측정한다. 따라서 압축시험을 수행하는 동안 하중, 변위, 간극수압, 그리고 체적변화를 측정하여 간극비의 변화, 포화도 그리고 흡수력의 변화를 알 수 있다.

3.3 시험방법

공시체는 No.10체(2.0mm)를 통과한 시료를 사용하

Table 2. Initial condition of each soil sample

D_r	No.	γ_{di} (kN/m ³)	w_i (%)	e_i	S_{ri} (%)
90%	1	15.01	11.76	0.79	40.03
	2	14.99	14.71	0.79	50.07
	3	14.99	17.50	0.79	59.66
	4	14.98	20.50	0.79	69.71
	5	14.96	23.63	0.79	80.26
95%	6	15.73	10.44	0.69	40.49
	7	15.80	13.25	0.69	51.10
	8	15.80	15.78	0.69	60.95
	9	15.86	17.82	0.69	69.53
	10	15.86	20.47	0.69	79.74

Note: γ_{di} : Initial dry density, w_i : initial water content, e_i : initial void ratio, S_{ri} : initial degree of saturation.

여 Table 2와 같이 두 가지 조건의 건조단위중량 및 5가지 조건의 함수비 범위의 다양한 초기포화도로 제작하였다. 즉, 초기 흡수력상태에 따른 압축거동을 확인하기 위해 인위적으로 적용하였다. 공시체는 50mm의 직경과 100mm의 높이를 갖도록 3층 정적 다짐으로 제작되었다. 일정한 건조단위중량에 5가지의 초기 포화도 조건으로 제작하였기 때문에, 대상 별 다른 정적 다짐에너지를 부여하였다. 제작된 공시체는 항온 및 항습상태에서 밀봉 후 24시간 보관하여 일정 함수비를 유지할 수 있도록 하였고, 이 후 시험에 이용하였다. 공시체를 거치하기 전 포화된 세라믹디스크의 표면에 수분량을 증감시켜 간극수압계의 반응을 확인하고, 모든 배수라인을 완전히 포화시키는 작업을 실시한다. 공시체를 거치한 후 멤브레인으로 공시체와 캡부분을 고정하며, 고무링을 이용하여 밀폐시킨다. 이후, 공시체의 올바른 체적 변화 측정을 위하여 셀 내부에 물을 완전히 채운다. 이때 상부 캡 부분은 대기압 상태로 유지할 수 있도록 열

어둔다. 본 시험은 압밀 과정이 생략되고 부피변화에 따라 간극공기의 출입만 가능한 비배수-배기의 방식이며, 0.1mm/min의 속도로 전단을 하였다.

3.4 시험결과

두 가지의 상대밀도와 초기 포화도 5가지의 조건으로 제작된 공시체에 대한 CWCC시험을 실시하였고, 각 조건에 따른 응력-변형률 곡선은 Fig. 5에서 보이고 있다. 그림에서 초기포화도에 따라 압축강도 및 변형거동이 달라짐을 볼 수 있다. 이 그림에서 최대압축강도상태, 즉 파괴상태에서 얻어진 결과는 Table 3에 정리하였다. Fig. 6은 초기포화도에 따른 초기흡수력과 파괴시 포화도와 흡수력의 관계를 보이며, 각각의 수분특성곡선을 삽입하여 비교하였다. 그림으로부터 공시체의 흡수력이 높은 포화도 구간과 포화도가 높아질 수록 수분특성곡선과 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 초기

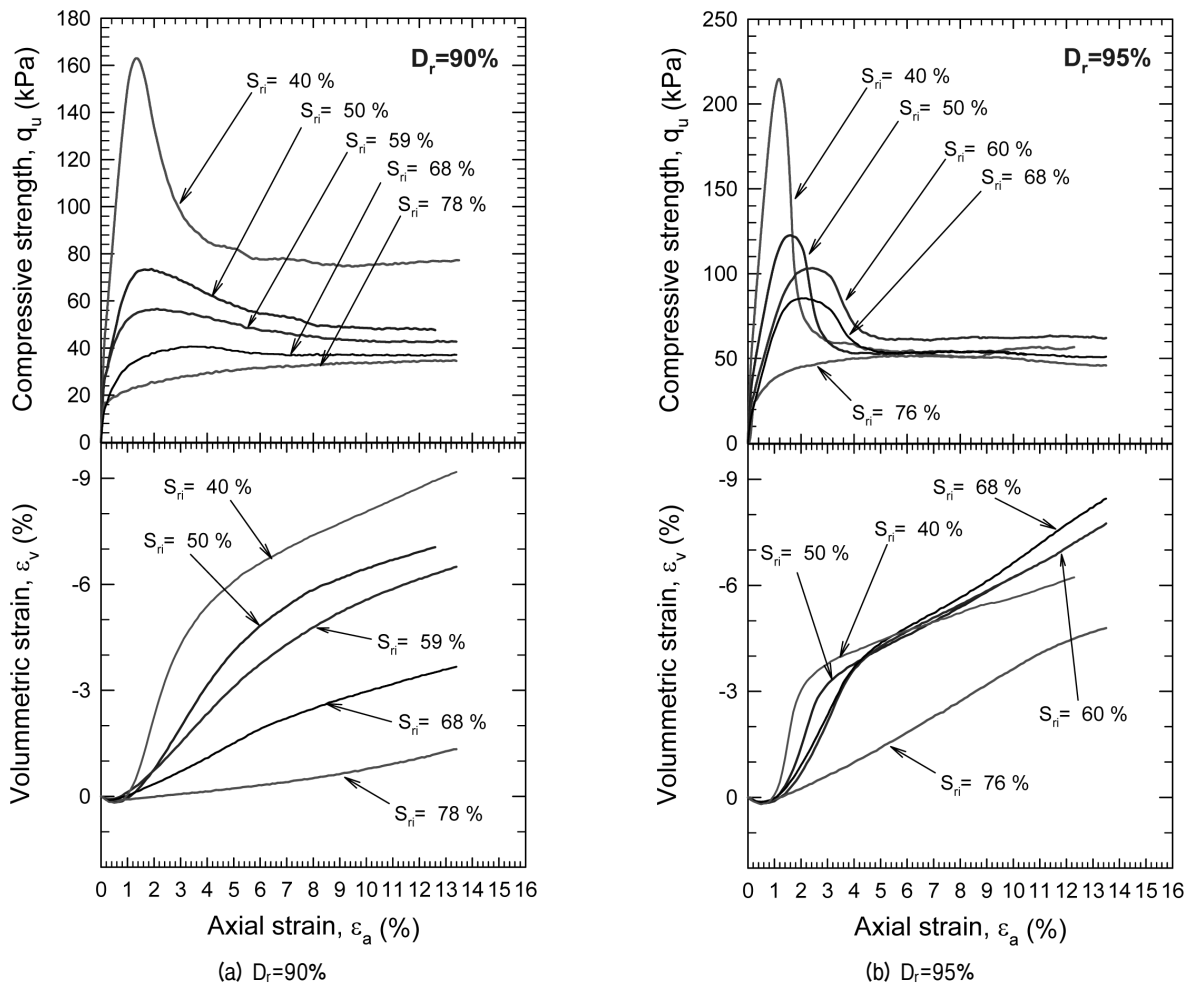


Fig. 5. Strain-stress curves according to the initial degree of saturation

Table 3. Properties of each condition at failure

D_r	No.	q_{uf} (kPa)	e_f	S_{rf} (%)	p_{sf} (kPa)
90%	1	163.3	0.80	39.5	37.9
	2	73.9	0.80	49.5	23.4
	3	56.7	0.80	58.7	12.0
	4	40.9	0.80	68.3	6.0
	5	35.0	0.81	78.1	4.9
95%	6	215.1	0.70	40.1	38.3
	7	122.9	0.71	50.3	35.6
	8	103.4	0.71	59.5	32.3
	9	85.7	0.70	67.9	21.6
	10	51.9	0.72	76.0	9.1

Note: q_{uf} : Max. compressive strength, e_f : void ratio at failure, S_{rf} : degree of saturation at failure, p_{sf} : suction stress at failure

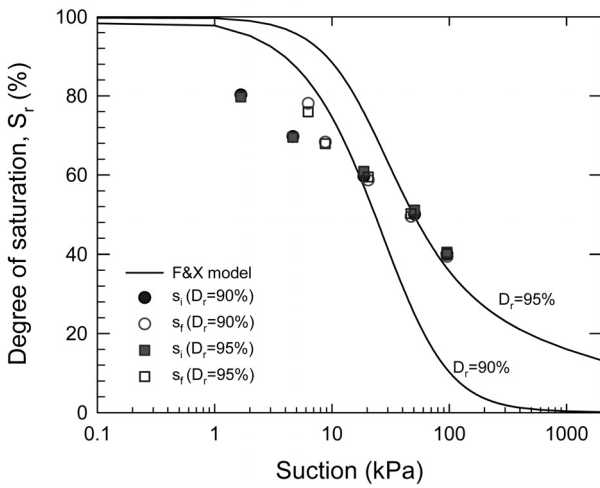


Fig. 6. Initial suction and suction at failure according to the degree of saturation

포화도가 높을수록 흡수력 값이 작아지고 있으며, 흡수력 변화의 경향은 초기 밀도 차이에 따라 달라짐을 알 수 있다. 이는 상대밀도가 작아지면서 입자들간의 간극의 크기가 커져, 이로 인하여 흡수력이 크게 발현되지 못하기 때문이다. 또한 초기 흡수력과 파괴시 흡수력의 변화는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

한편, 축변환기법을 통하여 얻은 Fig. 4의 SWCC와 흡수력을 직접 측정한 CWCC의 초기 포화도에 따른 흡수력이 다소 차이가 발생하였는데 다짐된 흙의 비균질성과 측정방식의 차이가 원인이라 판단된다. 건조과정에서 측정한 흡수력과 공시체로부터의 초기 흡수력 측정값과의 비교는 흡수력 측정을 통한 불포화도 판단강도를 추정하여 현장적용하는데 있어 어느 정도의 정확도를 갖는 실내실험이 행해지는가를 파악하는데 기준이 될 것이므로 중요하다. 또한, Fig. 7의 초기포화도와와

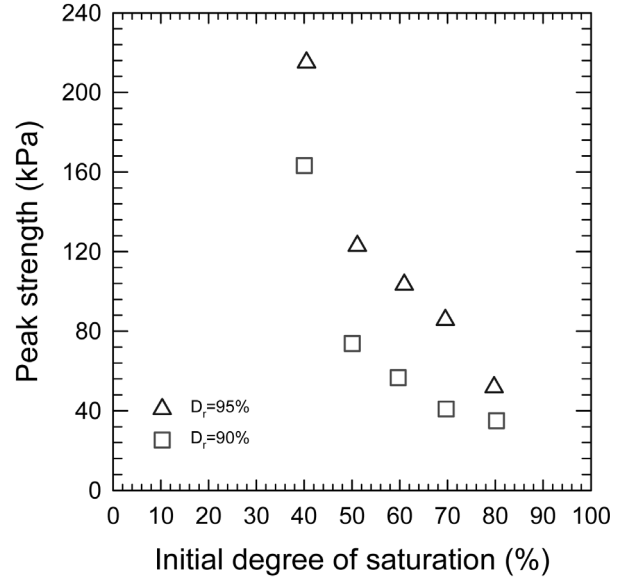


Fig. 7. Peak strength according to the initial degree of saturation

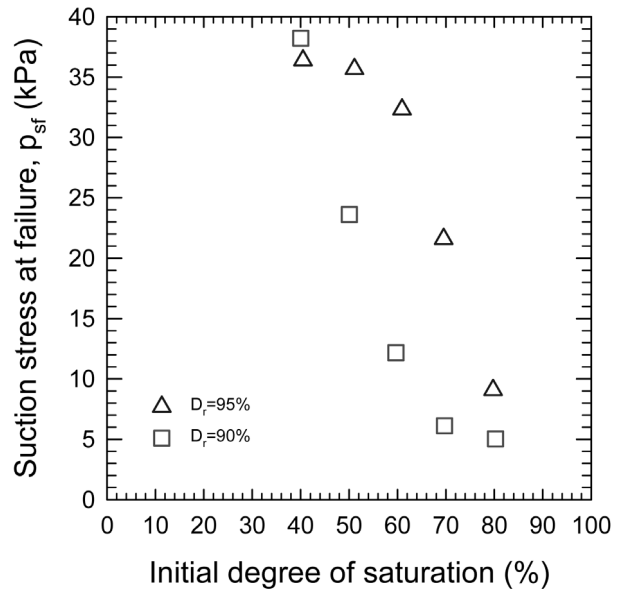


Fig. 8. Relationship between the initial degree of saturation and suction stress at failure

최대압축강도의 결과를 보이고 있다. 초기포화도 40%를 기준으로 포화도가 증가할수록 최대압축강도가 점점 작아지는 경향을 보이고 있다. 결국 일정 포화도보다 습윤할 때, 즉 흡수력이 작을수록 상대적으로 압축강도가 작아진다는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 초기포화도에 따른 흡수응력의 변화를 알 수 있는데, 흡수력의 경향과 비슷하게 상대밀도별 흡수응력의 변화폭이 달라짐을 알 수 있다. 또한, 초기포화도 40%에서 초기흡수력이 상대밀도 90%가 95%의 값보다 약간 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 상대밀도가 클수록 흡수력값

이 크다. 이는 초기포화도 40%지점부터 본 연구에서 측정하는 일반적인 방식으로는 공시체 본래의 흡수력값을 측정하는데 한계가 있음을 보여준다. 이러한 한계를 갖는 원인은 공동화현상(Cavitation phenomenon; Baker와 Frydman, 2009)이 발생하기 때문이며, 본 연구에서의 흡수력측정 시스템상에서는 흡수력 100kPa의 측정 한계치를 갖는다. 따라서, 상대밀도 95%의 초기흡수력값의 측정이 실패했음을 의미한다. 추후 이 흡수력 한계치를 측정할 수 있는 시스템으로 발전시킬 필요성이 있다고 판단된다.

한편, Fig. 5에서 상대밀도에 관계없이 최대흡수능력이 초기포화도 40%에서 최대압축강도의 최대치를 나타내는 것으로 보아, 흡수능력이 불포화토의 압축강도와 밀접한 관계에 있다는 점을 알 수 있다. 따라서, CWCC 시험에서 직접 측정된 흡수력과 흡수능력을 이용하여, 초기상태 포화도에 따른 불포화토 전단강도특성을 파악할 수 있을 것이다.

4. 흡수능력 적용성에 대한 평가

본 연구는 포화토와 불포화토 전단강도 사이의 관계를 규명하는 연구중의 하나로써, 흡수능력에 의해 발현되는 유효구속응력 요소를 찾고자 한다. 앞서 설명한 흡수능력은 이러한 유효구속응력을 효과적으로 표현할 수 있는 것으로 평가되고 있다. Fig. 9와 Fig. 11은 (p, q) 공간

에서 밀도별 최대압축강도 상태에 대한 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 평균 주응력($p=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$)축에 유효구속응력 성분으로서 두 가지의 흡수능력 ‘ p_s ’과 ‘ $2p_s$ ’를 각각 적용하여 비교 및 평가하였다. 그림과 같이 상대밀도와 관계없이 두 배의 흡수능력($2p_s$)을 적용한 상태에서 포화상태에서의 파괴선에 도달함을 알 수 있다. 여기서, $\sin\phi'=(3M/(6+M))$ 의 관계로부터 Table 1의 삼축시험결과를 이용하여 $D_r=90\%$ 의 경우, $q=Mp=1.43p$, $D_r=95\%$ 의 경우, $q=1.44p$, q 는 축차응력($\sigma_1-\sigma_3$)이다. 이 결과로부터 CWCC 시험을 통하여 일정한 조건 하에서의 최대압축강도, 즉 흡수능력에 의해 발현되는 강도증가에 대한 역학적 추정이 가능함을 알 수 있다.

한편, Fig. 10과 Fig. 12에서는 잔류상태에서의 (p, q) 공간에 대한 관계를 표현하였다. 최대압축강도에서는 두 배만큼의 흡수능력을 적용한 경우가 포화상태의 파괴선과 일정한 관계를 나타내었지만, 잔류강도에서는 흡수능력(p_s)을 적용하였을 때, 상대밀도와 관계없이 포화상태에서의 파괴선(M_p line)에 도달함을 알 수 있다. 이러한 결과는 CWCC 시험을 통하여 일정한 조건 하에서의 불포화토 잔류강도, 즉 불포화토의 한계상태에 대한 해석의 실마리를 제공하고 있음을 알 수 있다(예, Toll, 1990; Wheeler와 Sivakmar, 1995). 잔류상태의 강도는 한계상태의 응력상태를 나타내는 지표로서, 잔류상태의 응력상태에 대해 유효구속응력으로서 흡수능력을 적용함으로써 포화상태의 파괴선과 일정한 관계를 보였다.

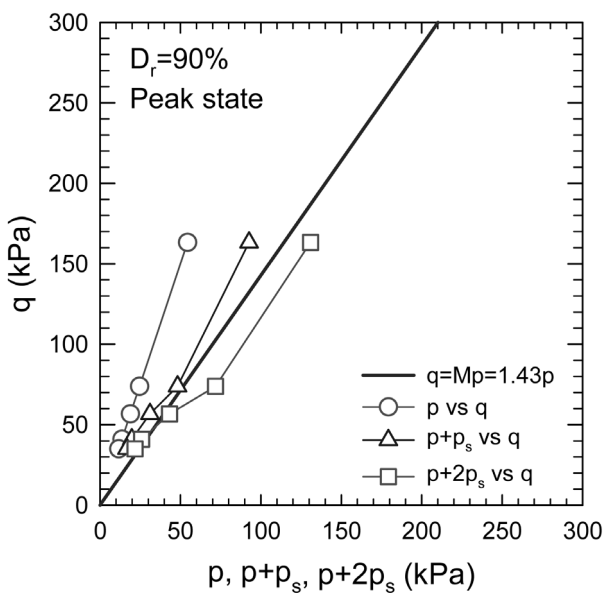


Fig. 9. Relationship between $(p, p+p_s, p+2p_s)$ and q at peak state ($D_r=90\%$)

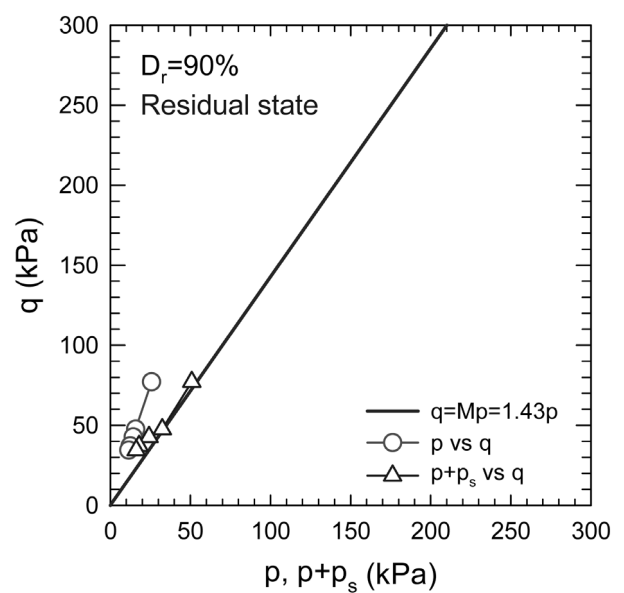


Fig. 10. Relationship between $(p, p+p_s, p+2p_s)$ and q at residual state ($D_r=90\%$)

따라서, 이는 포화상태의 파괴선과 석션응력 관계를 이용한다면, 불포화도 한계상태의 응력상태를 규정할 수 있는 가능성이 있음을 말하고 있다.

끝으로, 전단면의 흡수력을 추정하기 위해 Kim 등 (2010)이 제안한 SSM을 통하여 앞서 평가한 흡수응력의 적용성에 대해 검토해 보았다. 편마풍화토의 SSM적용을 위해 Fig. 4의 함수특성곡선을 활용하여 흡수력을 추정하였고, 이를 바탕으로 흡수응력을 산출하여 (p, q) 공간상에 적용하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 상대밀도별 SSM 적용결과를 보

이고 있다. 전단면에서의 흡수력을 추정해야 하므로 최대압축강도가 발휘되는 상태를 대상으로 적용하였다. 처음 (p, q) 공간의 관계에서는 포화상태의 파괴선에 도달하지 않고 있으며 일정한 기울기로 간격이 점점 벌어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 흡수응력(p_s)을 고려하였을 경우, 포화상태의 파괴선과의 거리가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 두 배의 흡수응력($2p_s$)을 적용하였을 경우, 상대밀도와 관계없이 초기 포화도가 높을수록 포화상태의 파괴선과 일정한 관계를 보이고 있다. 따라서 비록 편마풍화토에 대한 한정적인 CWCC시험 결

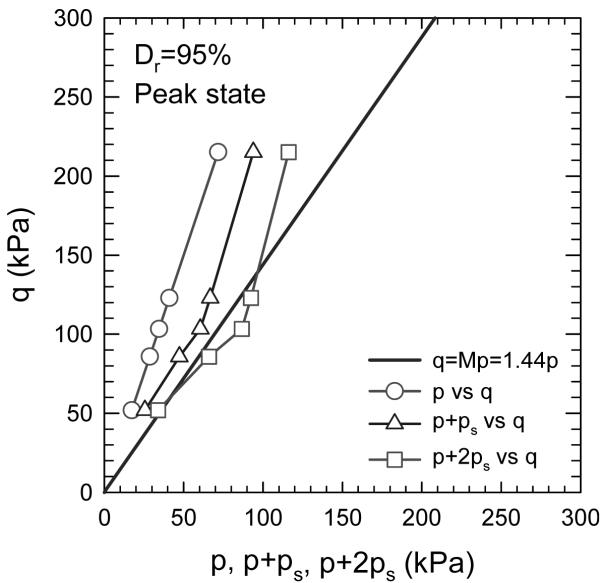


Fig. 11. Relationship between $(p, p+p_s, p+2p_s)$ and q at peak state ($D_r=95\%$)

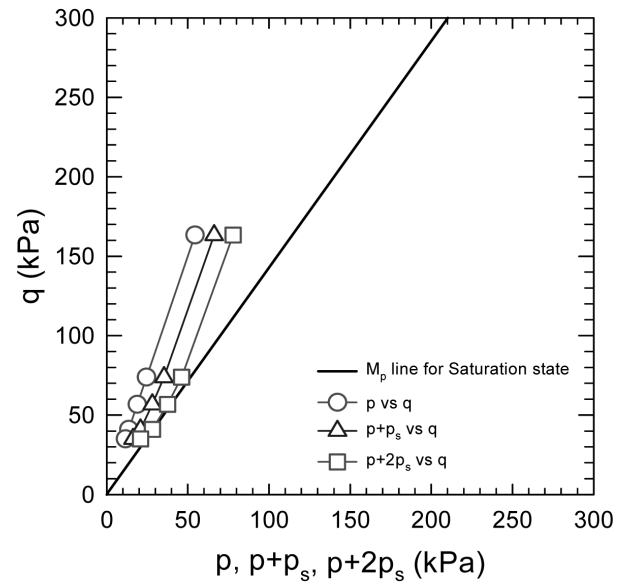


Fig. 13. Results after applying the suction stress on the basis of the SSM ($D_r=90\%$)

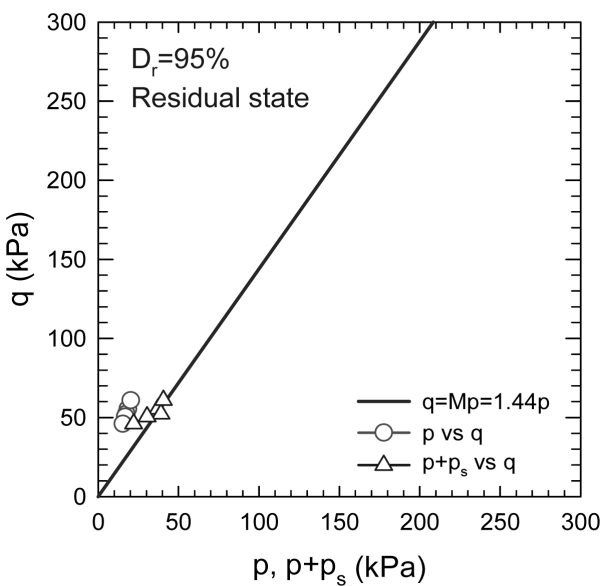


Fig. 12. Relationship between $(p, p+p_s, p+2p_s)$ and q at residual state ($D_r=95\%$)

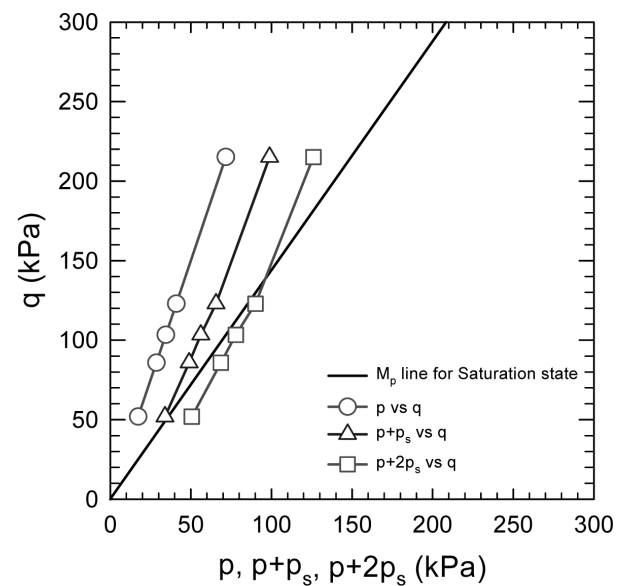


Fig. 14. Results after applying the suction stress on the basis of the SSM ($D_r=95\%$)

과를 대상으로 적용한 한계가 있지만, SSM을 통해 얻은 흡수응력의 적용을 통해 불포화토 전단강도 특성을 파악하는데 활용 가능성이 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Constant Water Content Compression (CWCC)장치를 활용하여 다짐상태 편마풍화토에 대한 불포화토 전단강도 특성을 유효구속응력 요소로서 흡수응력(p_s)의 적용을 통해 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 불포화토 공시체의 초기 포화도 조건에 따라 강도의 증감을 확인하였다. 또한, 밀도가 높고 포화도가 낮아질수록 흡수력의 영향이 최대압축강도의 증가에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
- (2) 상대밀도에 따라 초기 포화도별 흡수력의 변화를 확인하였고, 입자간의 간극이 커지면서 흡수력의 변화폭이 커짐에 따라 흡수응력의 크기에 대응하는 것으로 나타났다. 결국 흡수응력의 크기가 최대압축강도에 영향을 미친다고 판단할 수 있다.
- (3) 불포화토 공시체의 파괴시 응력상태가 (p, q) 공간에서 포화상태의 파괴규준과 비교하여 상대밀도와 관계없이 두 배의 흡수응력($2p_s$)만큼 차이가 있음을 알 수 있었고, 잔류강도의 거동에서는 흡수응력(p_s)만큼 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 CWCC 시험을 통하여 최대압축강도와 잔류강도상태에 대한 추정이 가능하며, 이를 통하여 불포화토 한계상태에 대한 해석의 실마리를 제공하고 있다고 판단된다.
- (4) 함수특성곡선에서 체적함수비를 통하여 전단면에서의 흡수력을 추정하는 Suction stress-SWCC Method (SSM)을 이용하여 CWCC 결과에 대한 흡수응력(p_s)의 적용성을 평가하였다. 이를 통해, SSM으로부터 얻은 흡수응력의 적용이 불포화토 전단강도 특성을 파악하는데 있어 활용 가능성을 보였다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-

0075914). 지원에 감사합니다.

참고 문헌

1. Baker, R. and Frydman, S. (2009), "Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations", *Engineering Geology*, Vol.106, pp.26-39.
2. Bishop, A.W. (1959), "The principle of effective stress", *Tecnisk Ukeblad*, 39: 859-863.
3. Bishop, A. W. and Blight G. E. (1963), "Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated Soils", *Geotechnique*, Vol.13, pp.177-197.
4. Bishop, A.W. and Donald, I.B. (1961), "The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus", *Pro. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Paris, Vol.1, pp.13-21.
5. Chae, J.G., Kim, B.S, Park, S.W., and Kato, S. (2010), "Effect of suction on unconfined compressive strength in partly saturated soils", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.14, No.3, pp.281-290.
6. Cunningham, M.R., Ridley, A.M., Dineen, K., and Burland, J.B. (2003), "The mechanical behavior of a reconstituted unsaturated silty clay", *Geotechnique*, Vol.53, No.2, pp.183-194.
7. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress state variables for unsaturated soils", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.103, pp.447-466.
8. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
9. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & sons, New York.
10. Karube, D. and Kato, S. (1994), "An Ideal unsaturated soil and the Bishop's soil. Proceeding of 13th International Conference", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, Vol.1, pp.43-46.
11. Karube, D., Kato, S., Hamada, K., and Honda, M. (1996), "The Relationship between the mechanical behavior and the state of pore-water in unsaturated soil", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.535, No.III-34, pp.83-92.
12. Karube, D. and Kawai, K. (2001), "The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils", *Geotech. Geological Eng.*, Vol.19, pp.211-241.
13. Kato, S., Yoshimura, Y., Kawai, K., and Sunden, W. (2001), "Effects of suction on strength characteristics of unconfined compression test for a compacted silty clay", *Geotechnical Engineering Journal, JSCE*, Vol.687, pp.213-218.
14. Kohgo, Y., Nakano, M., and Miyazaki, T. (1993), "Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils", *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63.
15. Kim, B.S., Shibuya, S., Park, S.W., and Kato, S. (2010), "Application of suction stress for estimating unsaturated shear strength of soils using direct shear testing under low confining pressure", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.47, No.9, pp.955-970.
16. Kohgo, Y., Nakano, M., and Miyazaki, T. (1993), "Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils", *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp. 49-63.
17. Kwon, H.G. and Park, S.W. (2011), "Suction stress and unconfined compressive strength of compacted unsaturated silty sands", *Journal*

- of the Korean Geotechnical Society, Vol.27, No.8, pp.31-37. (In Korean)
18. Lu, N. and Likos, W. L. (2006), "Suction stress characteristics curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
 19. Maatouk, A., Leroueil, S., and Rochelle, P.L.A. (1995), "Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil", *Geotechnique*, Vol.45, No.3, pp.465-477.
 20. Nishimura, T. and Fredlund, D. G. (2000), "Unconfined compressive strength of a silty soil and kaolin below the residual state", *Advances in Unsaturated Geotechnics*, GSP No.99, ASCE, pp. 262-274.
 21. Ridley, A.M. (1995), "Strength-suction-moisture content relationships for kaolin under normal atmospheric conditions", *Unsaturated soils*, Balkema, Vol.1, pp.645-651.
 22. Satija, B.S. and Gulhati, S.K. (1979), "Strain rate for shear testing of unsaturated soil", *Pro. 6th Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Singapore, pp.83-86.
 23. Sheng, D., Zhou, A., and Fredlund, D. G. (2011), "Shear strength criteria for unsaturated soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.29, No.2, pp.145-159.
 24. Shimizu, S. and Tabuchi, T. (1993), "Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests", *Soils and foundations*, Vol.33, No.3, pp.28-39.
 25. Toll, D.G. (1990), "A frame work for unsaturated soil behavior", *Geotechnique*, Vol.40, No.1, pp.31-44.
 26. 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.
 27. Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. (1995), "An elasto-plastic critical state framework for un-saturated soil", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.35-53.
- (접수일자 2012. 11. 14, 수정일 2013. 3. 28, 심사완료일 2013. 7. 22)