

비교상태 개념을 이용한 흙-수분 특성곡선 평가

Soil-water Characteristic Curve Assessment Using a Reference State Concept

성 상 규¹ Sung, Sang-Gyu

이 인 모² Lee, In-Mo

이 형 주³ Lee, Hyung-Joo

조 국 환⁴ Cho, Kook-Hwan

Abstract

The goal of this study is to investigate the feasibility of the reference state approach in determining the generalized soil-water characteristic curve that is essential for characterization of unsaturated soil behavior. The soil-water characteristic curves are obtained from a number of specimens of fine-grained residual soils compacted with different void ratios. Based on the experimental test results, the feasibility of using the liquid limit state as the reference state for predicting the soil-water characteristic curve is verified. Finally, through the regression analysis of experimental data using the equation of Fredlund and Xing (1994), a reliable method is proposed to predict the generalized soil-water characteristic curve of fine-grained residual soils using the liquid limit state as the reference state.

요 지

본 연구의 목적은 불포화토의 거동을 대변하는 흙-수분 특성곡선을 결정하는 데 있어서 액성한계상태를 이용한 비교상태접근법(reference state approach)의 적용 가능성을 확인하고 이를 바탕으로 하는 예측방법을 제안하는 데 있다. 세립잔적토를 사용하여 각기 다른 간극비로 다짐된 여러 개의 시료로부터 흙-수분 특성곡선을 구하였다. 실험결과를 바탕으로, 흙-수분 특성곡선을 예측하는 데 있어서 액성한계상태를 비교상태로 사용할 수 있음을 증명하였다. 마지막으로, Fredlund와 Xing(1994)이 제안한 흙-수분 특성곡선식을 사용하여 실험결과를 회귀분석 함으로서 액성한계를 비교상태로 하여 세립잔적토의 흙-수분 특성곡선을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다.

Keywords : Liquid limit, Matric suction, Prediction model, Reference state approach, Soil-water characteristic curve

1. 서 론

불포화토에서는 모세관 현상에 의해 흡인력(matric suction)이 발생하며, 이러한 흡인력은 입도분포, 흡입자의 정렬상태(구조), 함수비, 그리고 건조 및 습윤 과정 등에 의해 영향을 받는다. 특히, 입도분포와 흡의 다짐상태 등에 의해 결정되는 간극크기분포(pore-size distribution)와는 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 포화

도에 따른 흡인력의 변화는 흙-수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)으로 나타낼 수 있으며, 이 곡선은 간극크기분포(Simms와 Yanful, 2002), 투수특성(Mualem, 1976), 그리고 전단강도(Vanapalli 등, 1996)등과 같은 불포화토의 기본적인 거동을 연구하는데 있어서 실질적인 매개체 역할을 하고 있다.

흙-수분 특성곡선을 설명하기 위하여 여러 가지 경험 및 이론식이 제안되었다(McKee와 Bumb, 1987;

1 정회원, 롯데건설(주) 턴키팀, 과장 (Member, Manager, Lotte Eng. & Construction Co., Ltd., matiny@korea.ac.kr)

2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engng., Korea Univ.)

3 정회원, 삼성건설 토목영업팀, 차장 (Member, General Manager, Samsung Eng. & Construction.)

4 정회원, 고려대학교 부설 방재기술연구센터 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Res. Center for Dis. Pre. Sci. and Tech.)

Fredlund와 Xing, 1994; Agus 등, 2001; Simms와 Yanful, 2002). 실험결과를 이들 식에 의해 적합(fitting)시키면 해당 시료의 흡수분 특성곡선식을 구할 수 있게 된다. 하지만, 이것은 단순히 시험결과를 적합 시키는 수준이므로 동일한 흡일지라도 시료의 초기상태(간극비 등)가 다를 시에는 각각의 특성곡선을 구하기 위해 시간소모가 과다한 다수의 시험이 불가피하다. 이러한 제약을 극복하기 위해서 Reddi와 Poduri(1997)는 액성한계를 이용하여 세립토의 물 보유특성(water retention characteristics)을 일반화 할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 현장의 세립잔적토를 여러 가지 간극비로 압밀시킨 다수의 시료에 대해 흡수분 특성 시험을 수행하였다. 이를 통해, 세립잔적토의 흡수분 특성곡선 예측에 있어서, 액성한계를 비교상태로 사용함에 문제가 없는지 검증하였다. 또한, Fredlund와 Xing(1994)의 제안식을 이용하여 액성한계를 비교상태로 하는 세립잔적토의 흡수분 특성곡선 예측방법을 제안하였다.

2. 문헌연구

2.1 액성한계를 이용한 비교상태접근법

Nagaraj 등(1991)은 점토의 종류에 따라 액성한계(62~330%)와 그 때의 간극비는 매우 큰 폭으로 분포해도 투수계수는 약 2.6×10^{-7} cm/sec로 거의 일정함을 보였다(표 1 참조). 이와 같은 경향은 이원적인 간극(dual porosity) 시스템에 의해 설명할 수 있다. 세립토 내의 간극은 크게 미세간극(micro-pore)과 거시간극(macro-pore)으로 구분할 수 있으며, 이 중에서 미세간극은 입자의 집합체(aggregate)내에 내재하는 간극(즉, intra-aggregate pores)을 말하는 것이고, 반면에 거시간극은 입자의 집합들이나 무리(cluster)들 사이에 존재하는 간극(즉, inter-aggregate pores)을 나타내는 것이다(Wan 등, 1995).

물의 흐름은 주로 집합체간에 존재하는 거시간극의 크기에 의해 지배를 받는 것으로 알려져 있다. 따라서, 액성한계시의 투수계수가 거의 일정한 것은 물의 흐름을 지배하는 유효 간극 크기(effective pore size) 즉, 거시간극의 크기가 액성한계상태에서 거의 일정하기 때문이다(Mitchell, 1993). 한편, Nagaraj 등(1994a)은 4가지 자연점토의 투수계수를 액성한계상태의 값으로 정규화한 간극비와 함께 도시하여 유일한 선형관계가 성립함을 보였다(그림 1 참조). 상기의 결과를 통해, 세립토의 경우는 액성한계를 비교상태(reference state)로 활용하면 여타 간극비로 형성된 흡의 물 보유 특성(water retention characteristics)뿐만 아니라 여타 공학적 특성 예측이 가능함을 짐작할 수 있다.

Reddi와 Poduri(1997)는 모래와 몬모릴로나이트 또는 카올리나이트와의 혼합체를 사용하여 흡수분 특성 시험을 실시하였다. 액성한계상태로 형성된 각기 다른 혼합체에 행해진 시험결과에 의하면, 공기유입값(air-entry value)은 0.5kPa로 혼합비율에 관계없이 거의 일정한 값

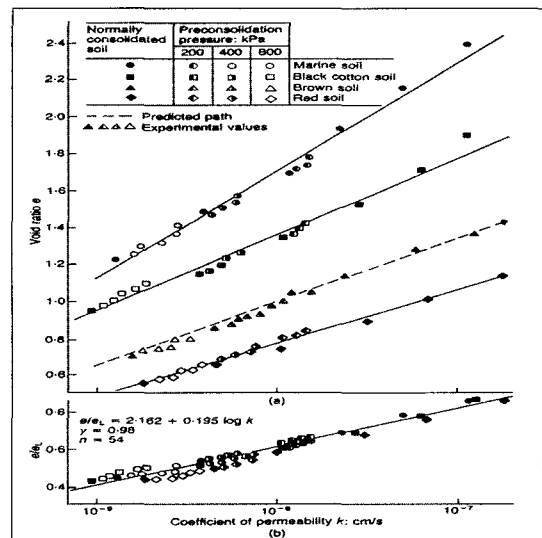


그림 1. 간극비-투수계수 관계(Nagaraj 등, 1994a)

표 1. 여러 가지 점토의 액성한계시 투수계수(Nagaraj 등, 1991)

Soil type	Liquid limit W_{LL} (%)	Void ratio at liquid limit e_{LL}	Hydraulic conductivity (10^{-7} cm/sec)
Bentonite	330	9.240	1.28
Bentonite + sand	215	5.910	2.65
Natural marine soil	106	2.798	2.56
Air dried marine soil	84	2.234	2.42
Oven dried marine soil	60	1.644	2.63
Brown soil	62	1.674	2.83

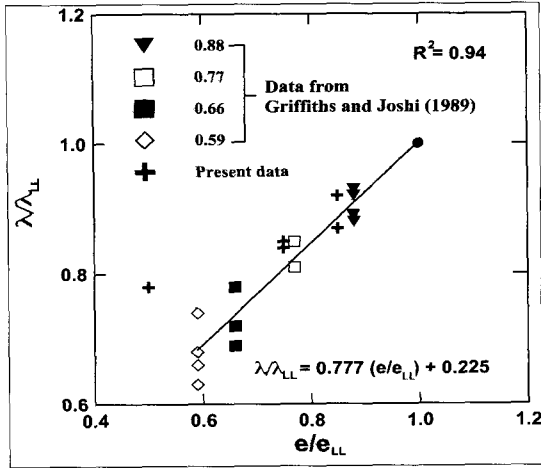


그림 2. $\lambda/\lambda_{LL} - e/e_{LL}$ 관계 (Reddi와 Poduri, 1997)

을 보였다. 이를 통해서 액성한계상태에서는 초기간극비에 관계없이 공기유입값을 결정하는 간극의 크기가 상대적으로 일정함을 보여 주었다. 또한, 액성한계상태를 비교상태로 적용하는 것에 대한 타당성을 검증하기 위하여 동일 시료를 액성한계시 간극비(e_{LL})에 대해 임의비율이 되게 압밀을 시키고, 흡수분 특성시험을 실시하여 시험결과를 Campbell(1974)이 제안한 흡수분 특성곡선 경험식(식 (1))에 의해 적합하였다.

$$\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right) = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^\lambda \quad (1)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화시의 체적함수비, ψ 는 흡인력(matric suction), ψ_a 는 공기유입값, 그리고 λ 는 적합매개변수(fitting parameter)로서 간극크기분포지수(pore-size distribution index)라고도 한다. 이 후에 λ 를 액성한계시의 값으로 정규화하고 이를 정규화한 간극비와의 관계로 도시하였다. 그 결과, 그림 2와 같은 명백한 선형관계가 성립함을 보여 주었다. 이와 같은 선형연구결과를 통해 세립토의 흡수분 특성곡선 예측에 액성한계를 이용한 비교상태접근법(reference state approach)의 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

2.2 흡수분 특성곡선 경험식

제한적인 시험을 통해 구한 흡수분 특성곡선은 경험적인 흡수분 특성곡선식에 의해 묘사할 수 있다. 기존의 연구에서 적용하였던 식 (1)은 넓은 흡인력의 범위에 걸친 S자 모양의 흡수분 특성곡선을 제대로 묘사하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 문헌연구결과 시험결

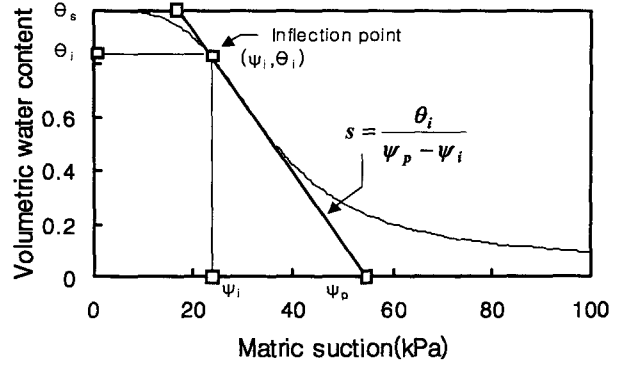


그림 3. 적합매개변수의 도식적 설명(Fredlund와 Xing, 1994)

과를 가장 정확히 묘사할 수 있는 Fredlund와 Xing (1994)의 곡선식(식 (2))을 적용하여 흡수분 특성곡선의 예측방법을 모색하였다. 선행연구결과들에 의하면, 이 곡선식이 여러 종류의 흙에 대해 가장 적용성이 우수한 것으로 알려져 있다(Leong과 Rahardjo, 1997; Sillers와 Fredlund, 2001).

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화시의 체적함수비, a , n , m 은 적합매개변수, 그리고 ψ 는 흡인력을 의미한다. 3개의 매개변수는 시험결과를 식 (2)를 이용하여 적합하거나 그림 3에서 나타난 것 같이 4개의 구성매개변수(constituent parameter, ψ_i , ψ_p , θ_s , θ_i)를 사용하는 도식적인 해법으로 구할 수 있다(Fredlund와 Xing, 1994). 식 (3)은 구성매개변수와 적합매개변수와의 관계식이다.

$$a = \psi_i \quad (3a)$$

$$m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (3b)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i \quad (3c)$$

$$s = \frac{\theta_i}{\psi_p - \psi_i} \quad (3d)$$

여기서, ψ_p 는 점선이 흡인력 축과 만나는 점에서의 흡인력이고, ψ_i 와 θ_i 는 곡선상의 변곡점에서의 흡인력과 체적함수비이고, θ_s 는 포화시 체적함수비를 나타낸다.

3. 시험연구

본 연구에서는 시료를 슬러리 상태로 만들고 액성한

계상태의 간극비에 대해 임의의 비율이 되게 압밀시킨 후 흡수분 특성시험을 실시하였으며, 슬러리상태로 준비된 시료에 대한 시험이 용이하고 시험 중에 발생하는 시료의 체적감소를 측정할 수 있게끔 시험 기구를 개량하였다.

3.1 시료

선행연구에서는 인위적인 배합토가 사용하였던 것과는 달리, 본 연구에서는 예측모델의 일반성을 확보하기 위하여 현장에서 채취한 3가지 종류의 화강풍화잔적토(Granite-weathered residual soils)를 사용하였다. 시료는 부산 수정동 근처의 각기 다른 3곳의 장소에서 채취하였다. 시료는 48시간동안 노 건조시킨 후 고무망치를 사용하여 잘게 부수고 10번 체로 체가름하여 직경 2mm 이상 되는 것은 제거하였다. 해당시료의 기본성질과 입도분포곡선은 각각 표 2와 그림 4와 같다. 시료 A, B 그리고 C는 각기 소성이 큰 점토(CH), 점토질모래(SC) 그리고 실트질모래(SM)로 분류되어, 시료 A와 B는 세립토의 성향을 보이고, 시료 C는 다소 조립토의 성향을 나타낸다.

3.2 시험장치

본 연구의 수행을 위해서 새롭게 도입된 압력셀 추출기(pressure cell extractor)는 기존의 압력판 추출기

표 2. 시료의 기본 물성

Soil	O.M.C (%)	Y _{d(max)} (kN/m ³)	200번체 통과량 (%)	Plasticity (%)			G _s	USCS
				LL	PL	PI		
A	17	15.79	56.0	51.5	27.0	24.5	2.70	CH
B	13	17.56	31.6	40.0	21.4	18.6	2.63	SC
C	11	18.74	17.5	27.7	23.1	4.6	2.62	SM

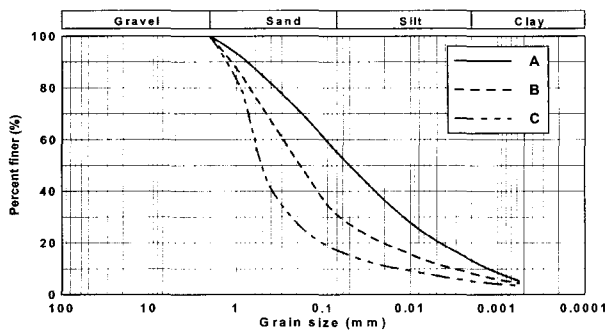


그림 4. 시료의 입도분포곡선

(pressure plate extractor)를 개량한 것으로 슬러리 상태와 같이 매우 느슨한 시료의 흡수분 특성곡선을 구하는데 용이하게끔 고안되었다. 그림 5에서 보는바와 같이 압력셀 추출기는 다공의 캡(porous cap), 시료용기(specimen container), 바닥판(base plate) 등으로 구성되어 있다. 시료용기에 느슨한 상태의 시료를 채운 후에는 캡을 씌우고 천천히 하중을 가하여 일정한 부피(φ 50mm×10mm)가 되게 시료를 압축시키고, 나사산이 새겨진 3가지 부품(screw bar, screw locks, screw nut)을 사용하여 시험기구를 조립한다. 바닥판 상부에는 1500 kPa의 공기유입값(air-entry value)을 가지는 HAED(high air-entry disk)를 삽입 후 가장자리를 접착제(epoxy)로 고정하여 완전 밀폐(sealing)시켜서 시료 내에 일정 크기의 흡인력이 형성될 수 있도록 하였으며, 디스크 하부에는 달팽이 모양의 홈(grooved water compartment)을 파서 시료내의 물을 외부로 효과적으로 배출시킬 수 있게 하였다. 조립된 압력셀 추출기는 그림 6에서 보는 바와 같이 압력실(pressure chamber)내에 거치하고 단계별로 공기압을 가하여 흡수분 특성시험을 수행하게 된다. 따라서 시료의 압축과 불포화(unsaturation)과정이 동일한 셀에서 연속적으로 이루어짐으로서 시료의 교란을 방지하였다.

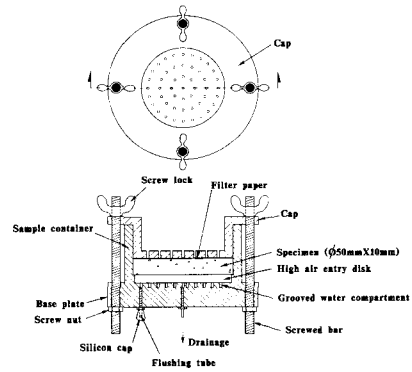


그림 5. 압력셀 추출기 모식도

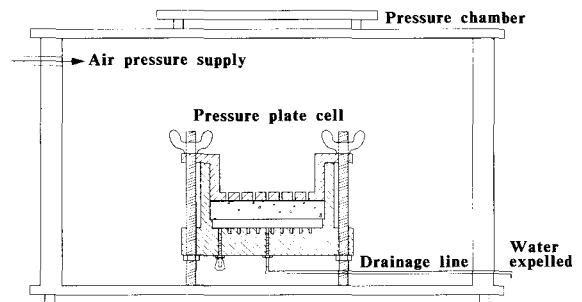


그림 6. 압력셀 거치 모식도

3.3 시료준비 및 시험과정

준비된 흙은 액성한계보다 큰 함수비가 되게 물과 잘 섞은 후 압축 후 미리 결정한 간극비의 시료로 성형될 수 있도록 일정량을 압력셀에 채운 후 압축을 시킨다. 시료는 각각의 흙에 대해 액성한계 간극비(e_{LL})의 100%, 80%, 60%, 그리고 50%가 되게 형성하였다. 압축 후 셀 내부 모든 시료의 초기 체적은 일정한 값을 가진다. 셀의 무게를 잰 후 압력실에 셀을 거치시키고 셀 바닥의 배수구(drainage)를 압력실 외부로 연결되는 튜브와 연결한다(HAED 하부의 수압은 대기압과 동일한 값을 유지, 그림 6 참조). 압력실을 밀폐시킨 후 임의의 공기압을 가하면, 시료 내에는 공기압과 대기압의 차이만큼 흡인력(matric suction)이 유발되고 이에 상응하는 함수비가 될 때까지 물이 배출되게 된다. 평형상태에 도달해서 물의 배출이 멈추면 시험을 종료하고 압력실 두껍을 열고 셀을 분리하여 무게를 재고, 시험도중 발생한 시료의 체적변화량은 일반적으로 점토의 수축실험에서 널리 사용되고 있는 수은 대체법을 적용하여 측정하였다. 압력셀의 두껍(cap)을 분리한 후 수은을 시료용기에 가득 채우고 이때 용기에 들어간 수은의 체적을 측정하여 용기 및 시험 전 시료의 체적으로부터 시험도중에 발생한 시료의 체적변화량을 구할 수 있다. 시료의 건조수축은 함수비의 변화에 지배되므로 공기압이 제거된 이후의 시료팽창(swelling)은 거의 발생하지 않았다. 기 언급한 과정을 반복하여 다른 시료에도 적용하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 건조수축이 큰 흙의 흙-수분 특성곡선

일반적으로 모래질 흙과 같은 소성이 적은 흙은 시험

도중에 큰 체적변형이 발생하지 않는다는 가정하에서 흙-수분 특성곡선을 결정한다. 하지만 점토와 같은 소성이 큰 흙이나 슬러리형태(즉, 액성한계상태에 놓여져 있는 흙)의 흙은 건조과정중에 흡인력에 의해 상당한 양의 체적변화가 발생할 뿐 아니라 이에 상응하는 간극크기 분포(pore-size distribution)도 변화하는 것으로 알려져 있다(Simms와 Yanful, 2002). 따라서, 보다 실질적인 흙-수분 특성곡선을 구하기 위해서는 시험결과 분석시 체적변화의 영향을 고려하여야 한다.

본 연구에서 사용한 흙도 건조과정에서 시료의 초기 간극비에 비해 상당량의 체적감소가 발생함을 볼 수 있었다. 그림 7은 시료 A, B, C 각각에 대한 흡인력에 따른 함수비($wG_s = V_w/V_s$, 토립자의 체적 대비 물의 체적)와 간극비(V_v/V_s , 토립자의 체적 대비 간극의 체적)의 변화를 비교하여 도시한 것이다. 이들 그림을 보면, 초기간극비가 e_{LL} 인 경우가 여타의 경우에 비해 흡인력이 30kPa 이하의 범위에서 상당한 체적감소가 발생하는 것을 볼 수 있고 초기의 낮은 흡인력 범위에서부터 함수비 곡선과 간극비곡선이 분리되어 불포화가 빠르게 진행되는 것으로 확인할 수 있다. 이는 공기압에 의해 유발되는 흡인력이 마치 구속압을 증가시키는 것과 동일한 효과를 나타내고 액성한계의 높은 함수비 때문에 시료가 슬러리 같이 거동하기 때문이다. 이에 반해 선 압밀되어 상대적으로 단단한 시료는 건조과정에서 뚜렷한 체적감소를 보이지 않을 뿐 아니라 전자보다는 다소 높은 흡인력에서부터 불포화가 진행되는 것을 볼 수 있다. 한편, 다소 조립토의 성향을 보이는 시료 C의 경우에는 다른 시료들에 비해 상대적으로 건조과정중에 수축량이 적은 것으로 나타났다.

그림 8은 시료 A, B, C 각각에 대한 흙-수분 특성곡선을 체적변화를 고려한 것과 그렇지 않은 것을 비교하여 나타낸 것이다. 체적변화를 고려한 곡선이 보다 높은 공

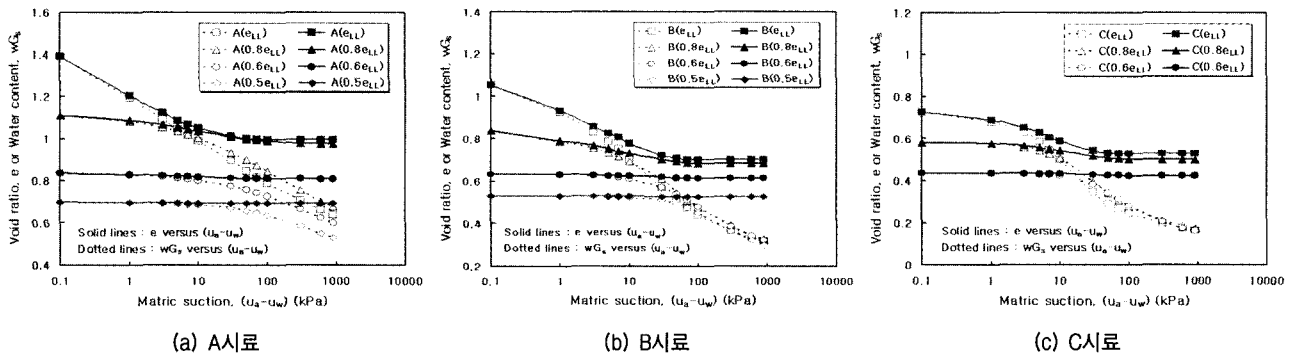


그림 7. 간극비 또는 함수비와 흡인력과의 관계

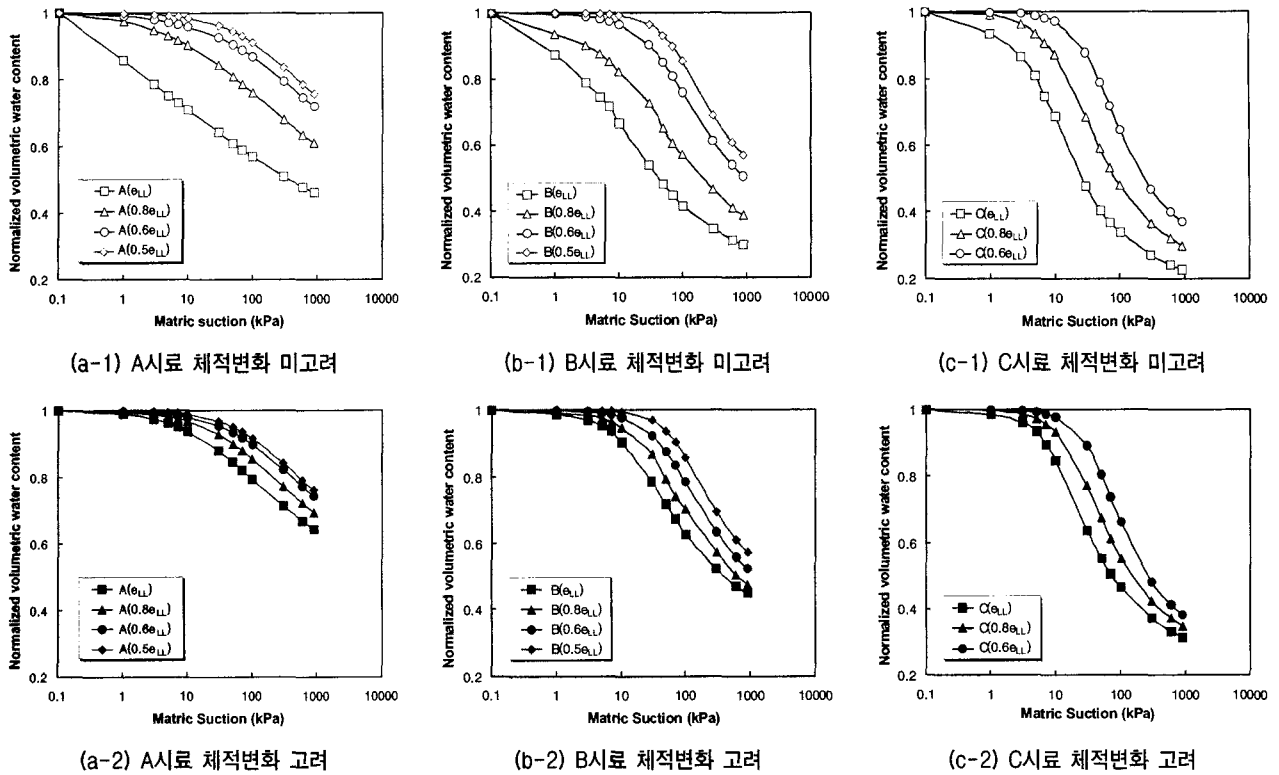


그림 8. 체적변화를 고려한 흙-수분 특성곡선 비교

기유입값과 낮은 흡인력의 범위에서 완만한 기울기를 보인다. 더욱이 체적변화를 고려하지 않은 곡선들은 그들 간의 간격이 넓은 반면 고려한 경우에는 상당히 간격이 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 이러한 경향은 점토성분이 상대적으로 많은 A 시료의 경우 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이러한 결과들은 건조수축이 큰 흙의 대한 흙-수분 특성곡선을 결정시에는 체적변화를 보정하는 것이 중요함을 부각시킨다.

4.2 액성한계상태에서의 물 보유 특성의 유사성

앞의 문헌연구에서 언급한 바와 같이 조립토와 점토

의 혼합체는 각기 액성한계상태에서 물보유 특성이 매우 유사하다고 알려져 있다(Reddi와 Poduri, 1997). 이는 구성성분의 종류와 비율에 따라 혼합체의 미세구조(microscopic structure)는 다소 다르다 하더라도 물보유 특성을 좌우하는(공기유입값을 결정하는) 거시적극기는 거의 일정하기 때문이다. 본 연구에서 사용한 자연 시료도 비슷한 경향을 보였다. 표 3은 본 연구에서 구한 액성한계상태에서의 공기유입값과 Reddi와 Poduri(1997)의 연구결과를 함께 나타낸 것이다. 이 표를 보면, 본 연구에서 사용한 3가지 시료는 모래, 실트 그리고 점토의 구성비율이 선행연구에서 적용한 인공적인 혼합체에 비해 매우 다양함에도 불구하고 액성한계상태에서

표 3. 여러 시료의 액성한계에서의 공기유입값 비교

Soil	액성한계(W_{LL}) (%)	200번체 통과량 (%)	점토 함유량 (%)	간극비 (e_{LL})	공기 유입값 (kPa)
A	51.5	56.0	13.4	1.4	0.5
B	40.0	31.6	8.5	1.1	0.6
C	27.7	17.5	5.2	0.7	0.8
*20%K + 80%S	16.0	20.0	20.0	0.4	0.5
*30%K + 70%S	18.0	30.0	30.0	0.5	0.5
*20%M + 80%S	64.0	20.0	20.0	1.7	0.48
*30%M + 70%S	98.0	30.0	30.0	2.6	0.45

* : Reddi and Poduri(1997)의 시험결과, K : kaolinite, M : montmorillonite, S : Ottawa sand

의 공기유입값이 선행연구결과의 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 이것은 공기유입값을 결정하는 가장 큰 간극의 크기가 액성한계상태에서 거의 유사하다 것을 암시하는 것으로 세립토를 함유한 소성질(plastic soil) 흙은 액성한계를 비교상태로 활용할 수 있음을 입증하는 것이다.

한편, 시료 C는 여타시료에 비해 다소 높은 0.8kPa 정도의 값을 보이는데, 이는 다른 시료에 비해 상대적으로 점토 함유량과 소성지수가 낮아 조립토의 성향을 보임으로, 간극크기분포와 구조가 세립토와는 다소 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 세립토에 대한 비교상태 접근법의 적용가능성 평가

액성한계상태의 값으로 정규화한 공기유입값(ψ_a/ψ_{aLL})과 역시 액성한계상태의 값으로 정규화한 간극비(e/e_{LL}) 간의 관계를 그림 9에 나타내었다. 이 그림에는 Reddi와 Poduri(1997)에 의한 시험결과도 비교하였다. 이 그림을 보면, 정규화한 공기유입값과 정규화한 간극비간에는 뚜렷한 역의 선형관계가 성립하는 것을 볼 수 있다.

간극크기분포지수(pore-size distribution index, λ)를 결정하기 위하여 그림 8의 (a-2), (b-2), 그리고(c-2) 상에 표시한 시험결과들을 Campbell(1974)이 제안한 식 (1)에 의해 적합하였다. 정규화한 지수와 간극비의 관계는 그림 10에 나타내었다. 이 그림에는 Griffiths와 Joshi(1989)와 Reddi와 Poduri(1997)에 의한 연구결과들도 함께 도시하였다. 낮은 e/e_{LL} 에서 이전의 연구결과에 비해 본 연구의 결과가 낮은 분산정도를 보였다. 이것은 체적변화

를 보정하였기 때문이다. 이 그림을 보면, 정규화한 지수와 간극비 간에는 흙의 종류에 관계없이 유일한 선형관계가 성립함을 알 수 있다.

위의 결과를 통해 자연상태의 세립토에 대한 흙수분 특성곡선 평가시 비교상태접근법의 사용이 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만, Campbell(1974)에 의해 제안된 식은 흙수분 특성곡선을 정확하게 묘사하지 못하기 때문에 본 연구에서는 적절하게 흙수분 특성곡선의 평가할 수 있는 경험식을 사용하였다.

4.4 세립토의 흙수분 특성곡선 평가

본 연구에서는 Fredlund와 Xing (1994)에 의해 제안된 식 (2)가 비교상태접근법에 의한 흙수분 특성곡선의 평가를 위해 적용되었다. 첫 번째 단계로, 시험결과를 식 (2)로 적합하여 적합매개변수(a, n, m)를 구한 후 이를 액성한계시의 값으로 정규화하고 정규화한 간극비와의 수식적인 관계를 정립하기 위해 다수의 회귀분석 작업을 수행하였으나 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이는 식 (2)의 적합매개변수의 수가 많고 이들 값이 매우 민감하게 변화하기 때문이다. 따라서 이들과 식 (3)의 관계를 가지는 구성매개변수(constituent parameter, $\psi_s, \psi_p, \theta_s, \theta_p$)들을 도입하게 되었다. 식 (3)을 이용하여 구한 구성매개변수들을 정리하면 표 4와 같다. 또한, 액성한계시의 값($\psi_{sLL}, \psi_{pLL}, \theta_{sLL}, \theta_{pLL}$)으로 정규화한 구성매개변수와 간극비와의 관계는 그림 11에 나타내었다. 이 그림을 보면 정규화한 구성매개변수들과 정규화한 간극비 간에는 명백한 선형관계가 성립하는 것을 알 수 있다. 따라서, 액성한계상태에서의 구성매개변수(ψ_{sLL} ,

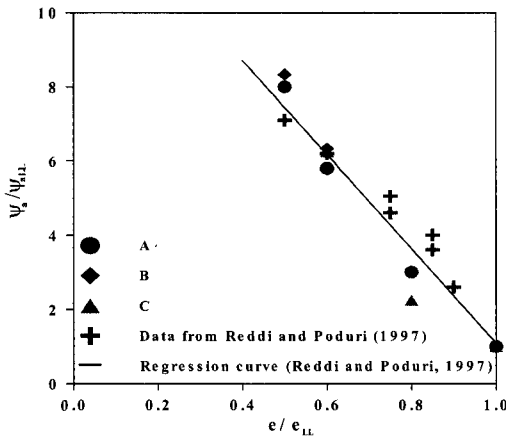


그림 9. $\psi_a/\psi_{aLL} - e/e_{LL}$ 관계

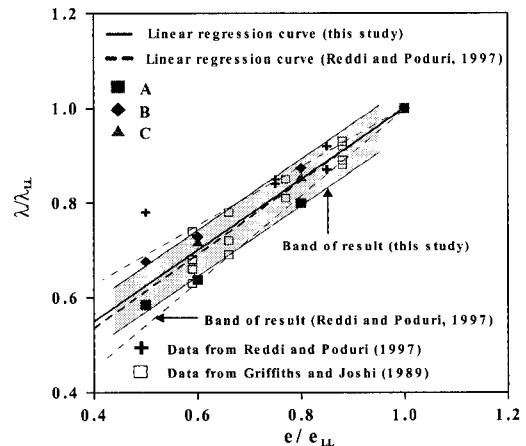


그림 10. $\lambda/\lambda_{LL} - e/e_{LL}$ 관계

표 4. 흙-수분 특성곡선의 구성매개변수

Soil	e/e_{LL}	ψ_i (kPa)	ψ_p (kPa)	θ_s (%)	θ_i (%)
A	1.0	21.9125	363.90	58.14	52.31
	0.8	46.0754	770.88	52.58	47.59
	0.6	76.2318	1352.21	45.53	41.54
	0.5	88.7243	1583.52	41.08	37.81
B	1.0	14.7864	136.51	51.32	44.59
	0.8	27.6611	247.65	45.62	39.53
	0.6	49.0261	430.30	38.78	33.99
	0.5	58.3427	529.17	34.60	30.28
C	1.0	9.7782	62.06	42.05	35.68
	0.8	19.3711	122.85	36.73	31.23
	0.6	38.4079	231.83	30.33	25.90

ψ_{pLL} , θ_{sLL} , θ_{iLL})를 알 수 있다면 선형회귀곡선식으로부터 해당 시료의 흙-수분 특성곡선의 예측이 가능하게 된다.

액성한계상태의 구성매개변수는 두 가지 방법에 의해서 구할 수 있다. 첫 번째 방법은 액성한계상태의 시료에 대해 직접적으로 흙-수분 특성시험을 수행하는 방법이고, 두 번째 방법은 액성한계상태의 구성매개변수와 흙의 특성치(soil index property)간의 경험적인 상관관계로부터 간접적으로 도출하는 방법이다. 본 연구에서

후자의 방법을 모색해 본 결과, 그림 12에서 보는 바와 같이 200번체 통과율(P200)과 $\theta_{iLL}/\theta_{sLL}$, ψ_{pLL}/ψ_{iLL} , 그리고 ψ_{iLL} 간에 상관성이 우수한 선형관계를 발견할 수 있었다. θ_{sLL} 은 해당 흙의 체적-질량(volume-mass)관계에 의해 어려움 없이 구할 수 있기 때문에 나머지 구성매개변수도 그림 12의 관계식에 의해 쉽게 구할 수 있다. 다만, 이와 같은 경험적인 접근법은 다수의 시험자료들을 그 바탕으로 하기 때문에 끊임없는 자료의 축척과 입증은 전제로 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 액성한계상태의 구성매개변수가 일단 구해지면, 그림 11의 선형관계식으로부터 특정한 간극비를 가지는 흙의 구성매개변수를 구할 수 있다. 이어서, 식 (3)에 의해 흙-수분 특성곡선의 적합매개변수들을 구하고, 마지막으로 적합매개변수와 식 (2)에 의해 시료의 흙-수분 특성곡선을 획득할 수 있다.

5. 결론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 사용한 잔적토는 흡인력의 작용에 의

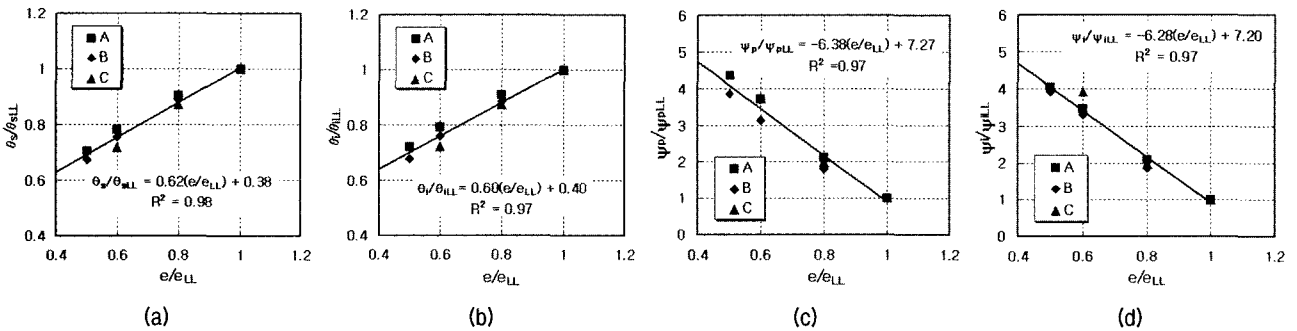


그림 11. 정규화한 구성매개변수들과 정규화한 간극비와의 관계

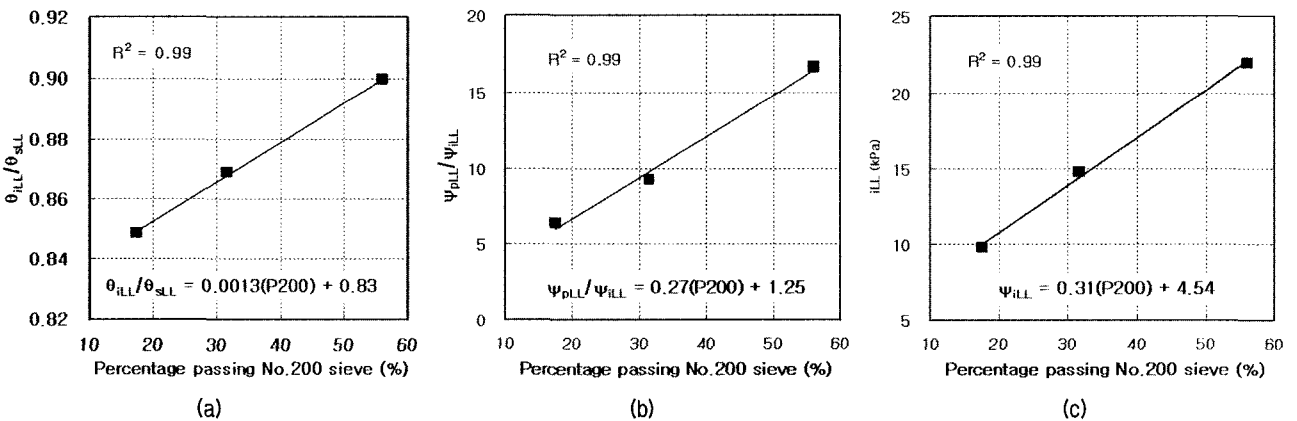


그림 12. (a) $\theta_{iLL}/\theta_{sLL}$, (b) ψ_{pLL}/ψ_{iLL} , (c) ψ_{iLL} 과 P200과의 관계

참고 문헌

- 해 상당한 체적감소가 발생하였고 이를 보정한 흙수분 특성곡선이 그렇지 아니한 곡선에 비해 공기유입값 높고 기울기가 완만해지며, 초기간극비가 다른 여타곡선간의 간격이 줄어들고 상관성이 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 건조축이 큰 흙의 흙수분 특성곡선 평가시에는 체적감소를 보정해 주는 것이 타당함을 알 수 있다.
- (2) 현장에서 채취한 세립잔적토의 액성한계시 공기유입값이 선행연구(Reddi와 Poduri, 1997)에서 점토광물-모래 혼합체를 대상으로 하여 구한 결과와 유사하게 평가되었다. 이는 액성한계상태에서는 각각의 미세구조는 다르다 하더라도 공기유입값을 결정하는 간극의 크기는 거의 일정하다는 것을 증명하는 것으로 이 상태에서는 세립토들 간의 물 보유특성이 매우 유사함을 입증하는 것이다.
- (3) 본 연구의 시험결과에 의하며, 액성한계상태의 값으로 정규화한 간극크기분포지수(λ/λ_{LL})와 간극비(e/e_{LL}) 간에는 흙의 종류(인위적인 혼합체와 자연상태의 흙)에 관계없이 선형적인 관계가 성립됨을 볼 수 있었다. 이를 통해서, 세립토의 경우에는 액성한계를 비교상태로 하여 다른 간극비에서의 흙수분 특성곡선의 예측하는 비교상태접근법의 타당성이 입증되었다.
- (4) 본 연구에서는 비교상태접근법을 적용시 보다 정확한 흙수분 특성곡선의 예측을 위해 기존의 경험식(Campbell, 1974)보다 곡선을 보다 적절히 묘사할 수 있는 Fredlund와 Xing(1994)의 경험식을 사용하였으며, 이 경험식의 적합매개변수(a, n, m)들과 수식적인 관계가 있는 구성매개변수(constituent parameter, $\psi_s, \psi_p, \theta_s, \theta_p$)들을 도입하였다. 연구결과, 액성한계상태의 값($\psi_{sLL}, \psi_{pLL}, \theta_{sLL}, \theta_{pLL}$)으로 정규화한 구성매개변수들과 정규화한 간극비 간에 우수한 선형관계가 성립하는 것을 발견할 수 있었고, 마지막으로 액성한계를 비교상태로 하여 일반화된 흙수분 특성곡선을 예측할 수 있는 경험적인 방법을 제안하였다.

1. Agus, S. S., Leong, E. C., and Rahardjo, H. (2001), "Soil - water characteristic curves of Singapore residual soils", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, pp.285-309.
2. Campbell, G. S. (1974), "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data", *Soil Science*, Vol.117, pp.311-314.
3. Fredlund D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil - water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.521-532.
4. Griffiths, F. J., and Joshi, R. C. (1989), "Change in pore size distribution due to consolidation of clays", *Géotechnique*, Vol.43, No.2, pp.333-336.
5. Leong, E. C., and Rahardjo, H. (1997), "Review of soil - water characteristic curve equation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, pp.1106-1117.
6. McKee, C. R., and Bumb, A. C. (1987), "Flow-testing coalbed methane production wells in presence of water and gas", *SPE Formation Evaluation*, (Dec.), 599-608.
7. Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of soil behavior*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
8. Mualem, Y. (1976), "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resour. Res.*, Vol.12, pp.513-522.
9. Nagaraj, T. S., Pandian, N. S., and Narasimharaju, P. S. R. (1991), "An approach for prediction of compressibility and permeability behavior of sand-bentonite mixtures", *Indian geotechnical Journal*, Vol.21, No.3, pp.271-281.
10. Nagaraj, T. S., Pandian, N. S., and Narasimharaju, P. S. R. (1994a), "Stress state-permeability relations for overconsolidated clays", *Géotechnique*, Vol.44, No.2, pp.349-352.
11. Reddi, L. N., and Poduri, R. (1997), "Use of liquid limit state to generalize water retention properties of fine-grained soils", *Géotechnique*, Vol.47, No.5, pp.1043-1049.
12. Sillers, W. S., and Fredlund D. G. (2001), "Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.1297-1313.
13. Simms, P. H., and Yanful, E. K. (2002), "Prediction soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions", *Géotechnique*, Vol.52, No.4, pp.269-278.
14. 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.
15. Wan, A. W. L., Gray, M. N., and Graham, J. (1995), "On the relations suction, moisture content and soil structure in compacted clays", *Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils*, Paris, pp.215-222.

(접수일자 2004. 5. 31, 심사완료일 2004. 7. 5)

감사의 글

본 연구는 교육부의 BK21 사업에 의해 이루어진 결과로써 당 기관에 감사를 드린다.