

불포화 점성토의 거동예측을 위한 구성식 개발

Development of Constitutive Model for the Prediction of Behaviour of an Unsaturated Clayey Soil

송 창 섭* · 장 병 옥**
Song, Chang Seob · Chang, Pyoung Wuck

Summary

The aim of the work described in this paper is to develop a constitutive model for the prediction of an unsaturated clayey soil and to confirm the application of the model. To this end a series of suction controlled isotropic and triaxial compression tests are conducted on clayey soils.

Matric suction is controlled by the axis translation technique using high air entry ceramic disk. Total volume change, air and water volume changes are measured by the device made for the experiment. The specimens are compacted by dynamic compaction using a half of Proctor compaction energy with the water contents of 5% drier than the optimum moisture contents.

From test results, volume changes and deviator stresses are analyzed at each state and their relationships are formulated. And the application of the model to clayey soils is confirmed by the comparison between test and predicted results.

During drying-wetting and loading-unloading processes for isotropic states, the agreement between predicted and test results are satisfactory. And predicted deviator stresses are well agreed with the test results in shearing process, but volumetric strain is not well agreed with the test results in high suctions.

I. 서 론

불포화토는 물을 흡수하려는 성질을 가지고 있으며, 이러한 성질에 의하여 불포화토는 공

학적으로 여러 측면에서 포화토와는 다른 거동을 보이고 있다. 이와같이 불포화토가 물을 흡수하려는 능력을 전흡인력(total suction)이라고 하며, 전흡인력은 간극공기압과 간극수

* 충북대학교 농과대학

** 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 불포화토, 흡인력, 축변환기법, 구성식

압의 차인 흡인력(matric suction)과 흙 속의 염분, 화학물질 등의 농도차에 의한 삼투압(osmotic suction)으로 구분할 수 있다. 특히, 삼투압은 염분, 화학물질 등을 함유한 특수한 지역에서만 발생하는데 건조한 지역이나 팽창성 흙은 삼투압에 의한 영향이 큰 것으로 보고되고 있으나 일반적인 흙에서는 흡인력보다 작은 값을 나타낸다고 보고되어 있다.⁵⁾

그동안 팽창성 흙이나 붕괴성 흙에 대한 피해사례가 보고되었으나⁷⁾ 기구의 미비와 인식의 부족, 이론적인 배경의 부족 등으로 연구가 부진하였지만 최근에 와서야 불포화토에 대한 연구의 필요성을 인식하게 되었다. 또한 불포화토에서 발생하는 여러 현상을 토질공학적인 측면에서 검토하기 시작하였으나, 아직까지도 이론의 정립이 명확하지 않고 미진한 부분이 많다.⁵⁾

본 연구에서는 점성토를 사용하여 불포화 상태에서 발생하는 토질상수의 변화상태를 구명하고, 그에 따른 불포화 점성토의 거동특성을 연구하며, 실험의 결과에서 규명된 불포화 점성토의 특성을 바탕으로, 불포화토의 응력성분을 고려하고, 수정 Cam-Clay 모델을 경계조건으로 하는 불포화 점성토의 거동예측을 위한 구성식을 개발하고, 점성토에 대한 실내 실험의 결과로부터 구한 관측치와 예측치를 비교하여 이의 타당성을 검증하고자 한다.

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

시험에 사용된 시료는 어언지구의 점토(CL)를 선정하였으며, 시료의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같고, 시료의 물리적 성질은 Table-1에 나타나 있다.

2. 시험방법

공시체는 자연건조시킨 시료에서 적당량을

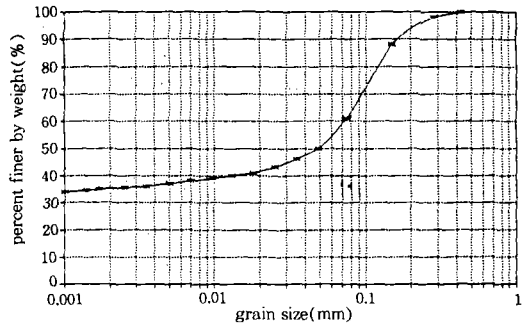


Fig. 1. Grain size distribution

Table-1. Physical properties of samples used in the test

G _s	LL (%)	PL (%)	PI	O.M.C. (%)		γ _{dmax} (kg/cm ²)		U.S.C.S
				50%	100%	50%	100%	
2.60	44	20	24	26	23	1.47	1.57	CL

계량하여 최적함수비보다 약 5% 건조한 상태가 되도록 증류수를 가하면서 혼합하여 조제된 시료를 습포로 덮어 약 24시간동안 방치하여 물과 입자가 평형상태에 이르도록 한 후, 몰드(H=37.5mm, φ=35mm)에서 Proctor 표준다짐에너지의 50%를 가하여 만들었다.

시험은 삼축압축시험기를 개조하여 사용하였으며, 구성식에 필요한 각 토질상수를 구하기 위하여 흡인력을 조절하면서 등방 및 삼축 시험을 행하였다. 또한, 공기, 시료의 체적변화 및 함수량의 변화는 별도의 기구를 제작하여 측정하였다.

흡인력은 Hilf(1956)⁸⁾에 의해 연구된 축변환기법(axis translation technique)을 사용하였다. 이 방법에 의하면 항상 정의 값을 가지는 간극공기압과 간극수압을 측정하여 흡인력을 계산할 수 있을 뿐만 아니라, 실험실에서 동일한 시료에 여러 종류의 흡인력을 재현할 수 있는 장점이 있다.

본 실험에 사용한 고압공기투과판(high air entry ceramic disk)은 공기통과압이 약 1.5kg/cm²인 것을 사용하였다.

가. 등방압축시험

등방압축시험은 2종류의 시험을 수행했는데, 먼저 흡인력이 일정한 경우, 하중의 증가 또는 감소에 따른 거동을 검토하기 위하여, 흡인력을 일정한 값으로 유지하면서 순평균응력이 증가 또는 감소할 때 체적변화를 측정하여 각각의 흡인력에 대한 체적변화율과 항복하중을 구하였다. 시료의 흡인력은 0.0~0.8kg/cm²의 범위이며, 순측압은 포화시료인 경우 3.1kg/cm²까지, 그 외 불포화 시료인 경우는 5.1kg/cm²까지 응력을 증가시켰다가 감소시키면서 시험을 행하였다.

또다른 시험은 응력이 일정할 때, 흡인력에 따른 거동을 검토하기 위한 것으로 시료의 건조-포화 과정에서 발생하는 체적의 변화를 검토하고, 각각의 순평균응력에 대한 체적변화율과 체적변화율이 바뀌는 점을 구하였다. 이 시험은 간극수압을 조절하여 흡인력의 크기를 조절하였으며, 사용된 순측압의 범위는 0.1~1.5kg/cm²이며, 흡인력의 범위는 0.0~0.8kg/cm²이다.

나. 전단시험

불포화 점성토의 전단강도를 검토하고 구성식에 필요한 토질상수를 구하기 위하여 순평균응력과 흡인력을 변화시키면서 압밀배수삼축시험을 행하였다. 흡인력이 일정한 상태에서 각각의 순평균응력하에서 전단시험을 행하여 그 때의 축차응력과 체적변화를 측정하였다.

시험은 흡인력을 일정하게 유지한 채 축력의 크기를 변화시켰으며, 흡인력의 범위는 0.0~0.8kg/cm², 순평균응력의 범위는 0.1~1.1kg/cm²이다.

Fig. 2는 등방압축시험 및 전단시험에 대한 (p, q, s)공간상의 응력경로를 나타낸 것으로, 경로 A 및 B는 등방압축시험으로 A는 일정한 흡인력하에서 축압을 변화시킨 시험이고, B는 축압을 일정하게 유지하면서 흡인력을 변화시킨 시험이다. 경로 C는 전단과정의 경

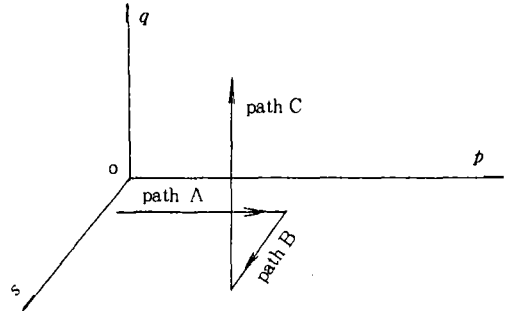


Fig. 2. Stress paths for isotropic and shear tests in (p, q, s) space

로를 나타낸 것이다.

III. 구성식의 개발

1. 항복곡면

불포화토의 구성식을 유도하기 위하여, 응력성분은 Jenning 등(1962)⁹⁾이 제안하고, Fredlund 등(1977)⁴⁾에 의하여 타당성이 증명된 순평균응력(net mean stress, p)과 흡인력(matric suction, s)을 사용하여 유도하였다.

가. LC(Loading-Collapse) 항복함수

응력과 흡인력에 따른 체적거동을 나타내기 위하여 등방상태의 순평균응력, $p(=\sigma_m - u_a)$ 와 흡인력, $s(u_a - u_w)$ 를 변수로 하는 (p, s)상태면에서 항복곡면을 유도하였다.

불포화 점성토의 비체적, $v(=1+e)$ 와 순평균응력, p는 대수함수 형태로 나타낼 수 있는데, 이로부터 불포화 항복응력, p_o 와 포화 항복응력, p_o^* 의 관계를 구하면 식 (1)과 같으며, 이는 흡인력이 증가할 때, 항복응력 p_o 의 값을 나타내며 (p, s)평면 상에서 항복함수곡을 의미한다. 이 식에 의하면 흡인력의 증가에 따른 항복응력 p_o 의 변화뿐만 아니라 포화 과정에서 나타나는 붕괴현상도 설명할 수 있다. 이러한 이유에서 이 항복함수를 LC(Loading-Collapse) 항복함수라 한다.

$$\frac{p_o}{p_c} = \left(\frac{p_o^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, p_c 는 기준응력, $\lambda(0)$, $\lambda(s)$ 및 κ 는 포화 및 흡인력이 s 일 때 $e-\ln p$ 곡선상의 재하 및 제하 때의 기울기를 나타낸다. 또한, $\lambda(s)$ 는 다음과 같이 포화상태의 기울기와 흡인력과의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\lambda(s) = [(1-\gamma) \cdot \exp(-\beta \cdot s) + \gamma] \dots\dots\dots (2)$$

여기서, γ 는 포화상태와 건조상태에서의 기울기의 비, s 는 흡인력, β 는 흡인력에 따른 기울기의 변화를 나타내는 상수이며, 이들은 등방압축시험의 결과로부터 구할 수 있다.

나. SI(Suction-Increase) 항복함수

흡인력의 증가에 따른 체적변화를 대수함수로 나타내면, 흡인력의 증가에 따라 체적변형률이 바뀌는 점을 구할 수 있는데, 이 점은 과거에 받았던 최대의 흡인력 s_0 가 되며 이보다 작은 흡인력에서는 탄성거동으로 회복가능한 체적변화를 나타내며, s_0 보다 큰 흡인력에서는 초기곡선을 따라 체적이 변화하게 된다.

따라서, 과거에 받았던 최대의 흡인력(항복 흡인력)인 s_0 도 다음과 같이 흡인력에 대한 항복함수로 취할 수 있다.

$$s = s_0 = constant \dots\dots\dots (3)$$

이것을 SI(Suction Increase)항복함수라 하며, 흡인력이 s_0 보다 크면 체적은 초기압축곡선을 따라 변하게 된다.

앞에서 구한 LC 및 SI 항복함수를 (p, s) 평면상에 나타내면 하나의 영역을 형성하게 된다. 이 영역에서는 체적변형의 회복이 가능하므로 탄성영역으로 볼 수 있다.

다. 경화함수(Work-Hardening)의 유도

경화함수는 (p, s) 평면상에서 응력과 흡인력

의 변화에 따른 LC 및 SI 항복함수의 위치를 결정해주며 소성체적변화로 나타낼 수 있다.

Gens 등(1989)⁶⁾과 Alonso 등(1990)²⁾은 LC 및 SI 항복함수가 전소성체적변화에 따라 변화하는 경화함수를 가정하였다. 그러나, Campos 등(1991)³⁾의 적용결과에 따르면 LC 항복함수가 실험결과와 일치하지 않으며 예측된 체적도 실험결과와 차이를 보인다고 발표하였다. 이것은 경화함수를 유도함에 있어 응력의 변화에 따른 내부의 변화를 정확하게 나타내지 못하였기 때문으로 생각된다.

본 연구에서는 Alonso 등의 결점을 보완하기 위하여 흡인력의 증가에 의한 소성체적변화는 s_0 및 p_o^* 의 증가를 유발하고, 응력의 증가에 의한 소성체적변화는 단지 p_o^* 의 증가만을 유발한다고 가정하였다. 이는 불포화 점성토의 구조가 흡인력에 의해 유지되기 때문에 흡인력의 변화는 흙의 구조에 커다란 변화를 수반하게 되는 반면, 응력의 증가에 의해서는 최대흡인력의 상태는 변하지 않고 내부구조를 조밀하게 하는 역할만 하게 되는 것을 의미한다.

이러한 조건에서 경화함수를 유도하면 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$\frac{dp_o^*}{p_o^*} = \frac{1}{\lambda(0)-\kappa} dv^p \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{ds_0}{p_{at}+s_0} = \frac{1}{\lambda_s-\kappa_s} dv_s^p \dots\dots\dots (5)$$

여기서, p_{at} 는 $s=0$ 때도 성립되기 위하여 첨가한 것으로 본 구성식에서는 대기압을 사용하였다. dv^p 는 전소성체적변화, dv_s^p 는 흡인력에 의한 소성체적변화를 나타내며, λ_s 및 κ_s 는 $e-\log s$ 곡선상의 재하 및 제하 시의 기울기를 나타낸다.

라. 구성식의 유도

삼축상태에서 구성식은 (p, s) 평면에서의

항복함수를 이용하여 구하며, 흡인력이 없는 상태 즉, 포화토의 경우는 수정 Cam-clay 모델로 접근하도록 하였다.

삼축응력상태의 구성식을 유도하기 위하여 다음과 같은 변수 즉, 전단응력 $q(=\sigma_1-\sigma_3)$ 와 변형을 상태를 나타내는 체적변형률 $\epsilon_v(=\epsilon_1+2\epsilon_3)$ 및 전단변형률 $\epsilon_s(=2/3(\epsilon_1-\epsilon_3))$ 을 도입한다.

본 연구에서는 흡인력의 변화에 따른 강도 변화를 나타내기 위하여 한계상태에서 흡인력을 고려하였으며 불포화 점성토의 거동에 관련류동칙을 적용하여 삼축상태의 구성식을 유도하였다. 흡인력의 증가는 점착력의 증가 뿐만 아니라 한계상태의 기울기, M 의 증가를 의미하며, 이는 곧 강도의 증가를 의미한다. 이러한 점착력 및 기울기의 증가는 (p, q) 평면상에서 q 축상에 절편을 가지는 것을 의미한다.

한계상태의 기울기(M) 및 절편(k)을 사용하여 (p, s) 평면상에 항복함수를 나타내면 Fig. 3(a)와 같다. 또한 앞에서 구한 LC 및 SI 항복함수를 (p, s) 평면상에 나타내면 Fig. 3(b)와 같다. 이 두 항복함수를 조합하여 (p, q, s) 의 삼차원 공간에 항복곡면을 나타내면 Fig. 4와 같으며, 이 때 곡면으로 둘러싸인 부분이 탄성영역이 된다.

Fig. 3에서 흡인력이 $s(=constant)$, 기울기를 M , p 축상의 절편을 p_s , q 축상의 절편을 k 라 하면 항복함수는 다음과 같다.

$$f = q^2 - M^2(p + p_s)(p_o - p) = 0 \quad \dots\dots (6)$$

여기서, M 과 p_s 는 다음 식으로부터 구할 수 있으며, 이는 c 및 ϕ 에 따라 달라진다. 또한, c 및 ϕ 는 흡인력에 영향을 받는데 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$c = C_f \cdot \tanh(C_r \cdot s) \quad \dots\dots\dots (7)$$

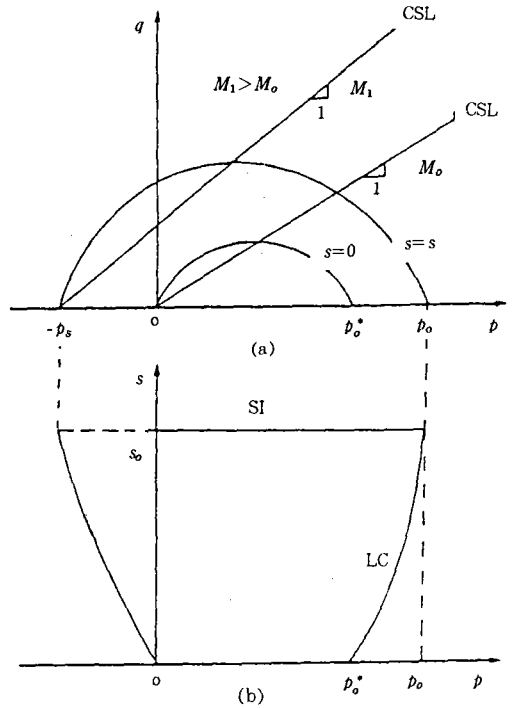


Fig. 3. Yield loci in (p, q) and (p, s) planes
 (a) yield loci in (p, q) plane.
 (b) LC-SI yield loci in (p, s) plane

$$\phi = \phi_o \{1 + C_m \cdot \tanh(C_r \cdot s)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서, s 는 흡인력, ϕ_o 는 포화상태의 내부 마찰각이며, C_f , C_r 및 C_m 는 흙의 종류에 따라 달라지는 토질상수이다.

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$k = \frac{6c \cdot \cos \phi}{3 - \sin \phi} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$p_s = -\frac{k}{M} \quad \dots\dots\dots (11)$$

관련류동칙이 성립하는 것으로 가정하면 소성포텐셜은 항복함수군과 같은 형태를 취하게 되므로 다음과 같다.

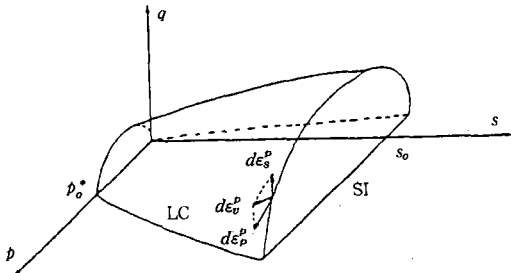


Fig. 4. Yield surface in (p, q, s) space

$$g = f = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \dots (12)$$

소성변형률은 현재의 응력상태에서 소성포텐셜에 연직방향으로 증가하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon_v^p = \Lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial p} \dots (13)$$

$$d\epsilon_s^p = \Lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial q} \dots (14)$$

식 (6), 식 (12), 식 (13) 및 식 (14)로부터 경화법칙과 한계상태의 소성전단변형을 이용하여 소성체적 및 전단변형을 구하면 다음과 같다.

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda(s) - \kappa}{vp_0} \left\{ \frac{M^2(2p - p_0 + p_s)}{M^2(p + p_s)} dp + \frac{2q}{M^2(p + p_s)} dq \right\} \dots (15)$$

$$d\epsilon_s^p = \frac{\lambda(s) - \kappa}{v} \frac{2q}{p_0 M^4 (p + p_s) (2p - p_0 + p_s)} (M^2(2p - p_0 + p_s) \cdot dp + 2q \cdot dq) \dots (16)$$

식 (15), 식 (16) 및 탄성변형식을 결합하여 불포화토의 전단에 따른 응력 및 체적거동을 예측할 수 있는 구성식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{vp} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3G} \end{bmatrix} + \frac{\lambda(s) - \kappa}{vp_0} \frac{1}{M^2(p + p_s)}$$

$$\begin{bmatrix} M^2(2p - p_0 + p_s) & 2q \\ 2q & \frac{(2q)^2}{M^2(2p - p_0 + p_s)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dp \\ dq \end{pmatrix} \dots (17)$$

IV. 구성식의 적용

1. 등방거동의 예측

점성토를 사용하여 행한 등방압축시험 결과 및 건조-포화시험 결과로부터 구한 토질상수를 정리하면 Table-2 및 Table-3과 같다.

Table-2. Soil parameters for prediction of volumetric behaviours (from loading-unloading test)

soil type	$\lambda(0)$	κ	γ	β	p_c (kg/cm ²)	p_0^* (kg/cm ²)
CL	0.130	0.011	0.680	8.50	0.018	0.35

Table-3. Soil parameters for prediction of volumetric behaviours (from ldrying-wetting test)

soil type	λ_s	κ_s	s_0 (kg/cm ²)
CL	0.045	0.009	0.416

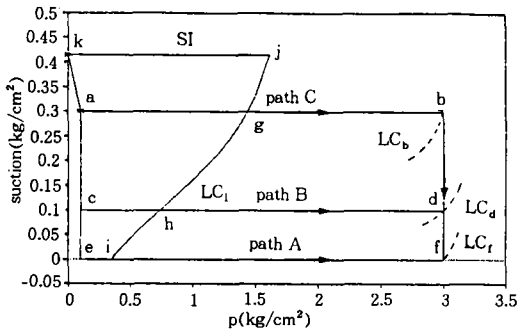
가. 흡인력의 감소 및 하중의 증가에 따른 체적의 예측

불포화 상태에 있는 시료가 흡인력이 감소하고 하중이 증가하여 최종 도달하는 응력상태는 같더라도 응력경로가 서로 다른 경우에 발생하는 체적거동을 예측하여 실험결과와 비교하였다.

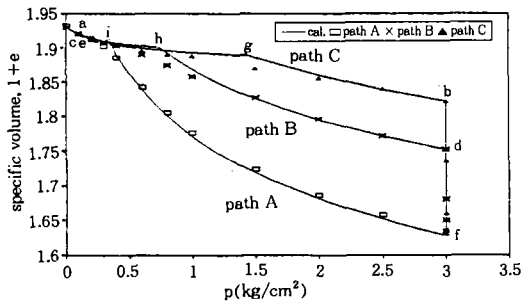
Fig. 5(a)는 점 a에서 출발하여 흡인력의 크기 또는 하중의 크기가 다른 상태를 거쳐 점 f에 도달하는 동안의 응력경로를 (*p, s*)평면에 나타내고 있다. Fig. 5(b)는 각각의 응력경로에서 발생하는 비체적의 변화양상을 구성식에 의하여 계산된 결과와 시험결과를 비교한 것이다.

응력경로 A는 점 a→e→f의 과정이며, 경로 B는 a→c→h→d→f의 과정, 경로 C는 a→b→f의 과정을 통하여 흡인력 및 하중이 변화하면서 최종 f점에 도달하게 된다. 여기서, o-i-j-k로 이루어진 부분은 초기의 탄성영역을 표시한다.

각 점의 순평균응력 및 흡인력의 상태는 Table-4와 같다.



(a) Stress paths



(b) Variation of specific volume with net mean stress

Fig. 5. Comparison between tested and predicted results for clayey soil under isotropic stress change

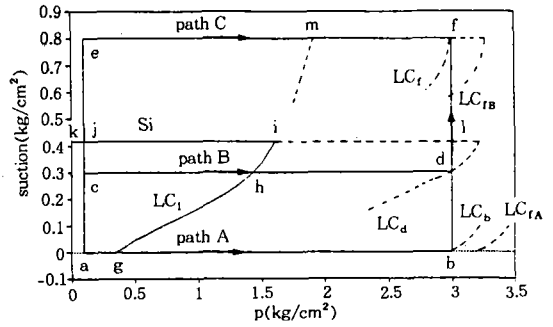
Table-4. Net mean pressure and suction of each stress path (prediction of specific volume during loading and wetting)

paths	path A			path B				path C		
	a → e → f			a → c → d → f				a → b → f		
p(kg/cm ²)	0.1	0.1	3.0	0.1	0.1	3.0	3.0	0.1	3.0	3.0
s(kg/cm ²)	0.3	0.0	0.0	0.3	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.0

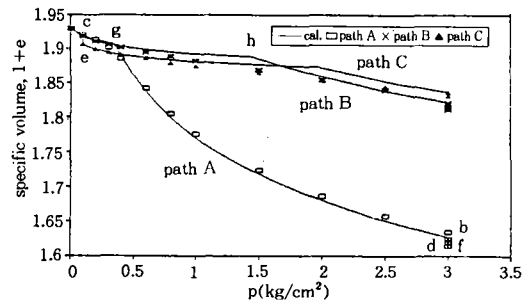
나. 흡인력의 증가에 따른 체적의 예측

흡인력의 증가(건조과정)에 따른 체적의 변화를 검토하기 위하여 Fig. 6(a)와 같은 응력경로를 채택하여 실험결과와 구성식에 의한 예측결과를 비교하였다.

응력경로 A는 a→b→f과정, 응력경로 B는 a→c→d→f과정, 응력경로 C는 a→e→f의 과



(a) Stress paths



(b) Variation of specific volume with net mean stress

Fig. 6. Comparison between tested and predicted results for clayey soil under suction changes

Table-5. Net mean pressure and suction of each stress path (prediction of specific volume during drying)

paths	path A			path B				path C		
	a → b → f			a → c → d → f				a → e → f		
p(kg/cm ²)	0.1	3.0	3.0	0.1	0.1	3.0	3.0	0.1	0.1	3.0
s(kg/cm ²)	0.0	0.0	0.8	0.0	0.3	0.3	0.8	0.3	0.8	0.8

정을 나타내며 각 경로는 점 a에서 출발하여 최종의 점 f상태에 도달하게 된다.

Table-5는 각 점에서의 순평균응력 및 흡인력의 상태를 나타낸다.

이상의 예측결과와 실험결과의 비교를 통하여, 유도된 구성식은 불포화토에서 흡인력이 증가하거나 감소하는 경우, 등방응력이 증가 또는 감소하는 경우에 발생하는 체적변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 불포화 점성토가 포화과정에 이르는 동안 발생하는 체적의 변화는 응력경로가 다르더라도 일정하지만, 건조과정에서 발생하는 체적의 변화는 응력경로에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

3. 전단에 따른 거동의 예측

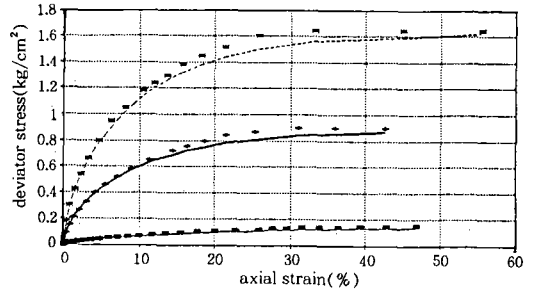
구성식을 이용하여 예측한 결과와 실험을 통하여 얻은 응력 및 체적변화의 결과를 비교하였다.

Table-6은 예측에 사용된 각 토질상수이다.

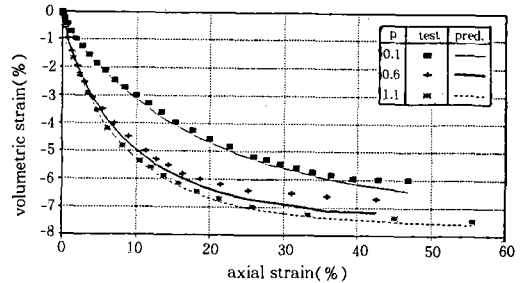
Table-6. Soil parameter for shear stress and volume change

soil thpe	C _f	C _r	C _m
CL	0.38	2.50	0.19

Fig. 7은 포화시료(s=0.0 kg/cm²)일 때, Fig. 8은 흡인력이 0.1kg/cm²인 경우 전단변형에 따른 축차응력과 체적변형률을 실험결과와 예측결과를 비교한 것이다. 그림(a)는 각각의 순평균응력에 대하여 축변형률에 따른



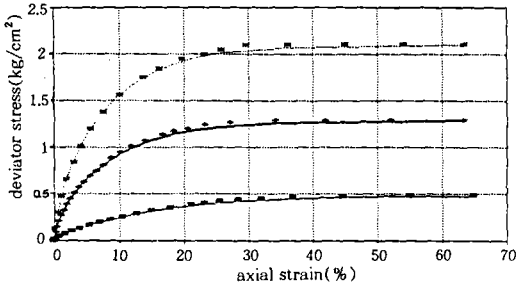
(a) Deviator stress



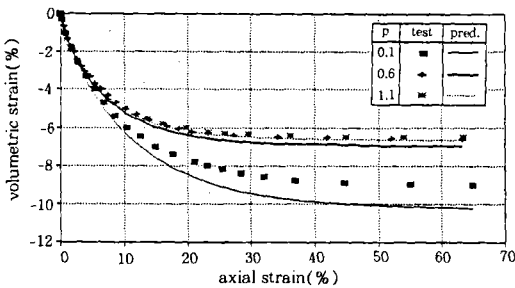
(b) Volumetric strain

Fig. 7. Comparison between measured and predicted results for saturated clayey soil

축차응력을 비교한 것이고, 그림(b)는 축변형률에 따른 체적변형률을 비교한 것이다. 그림에서 축차응력은 예측결과와 실험결과가 잘 일치하고 있다. 그러나, 불포화 시료가 저축압 상태에서는 체적변형률은 차이를 보이고 있는데 이는 구성식의 유도과정에서 주안점을 흡인력의 변화에 따른 체적변화에 두고 포화시의 경계조건으로 택한 수정 Cam-clay모델이 다이러턴시 현상을 나타내지 못하기 때문으로 생각된다. 그러나, 이러한 차이에도 불구하고 본 구성식에 의한 예측결과는 포화상태와 불포화 상태의 체적변화 경향을 잘 나타내고 있으므로 토질상수의 보정이나 다이러턴시에 대한 부분을 추가하면 불포화 점성토의 전단에 따른 거동예측에 정확성을 기할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Deviator stress



(b) Volumetric strain

Table-8. Comparison between measured and predicted results for unsaturated clayey soil($s=0.1\text{kg/cm}^2$)

V. 요약 및 결론

불포화 점성토의 거동을 예측하기 위하여 순평균응력과 흡인력을 고려하여 구성식을 유도하였으며, 등방압축시험과 삼축압축시험을 행한 결과를 이용하여 이의 타당성을 검증하였다. 불포화 점성토의 거동을 분석하고, 유도된 구성식을 적용한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 구성식의 유도과정에서 가정한 경화함수는 실험의 결과와 잘 일치하므로, 순평균응력과 흡인력에 의한 불포화토의 거동을 예측하는 경화함수로 사용될 수 있음이 입증되었다.
2. 순평균응력과 흡인력을 응력성분으로 하고, 수정 Cam-Clay 모델을 경계조건으로 하는 불포화토의 거동을 예측할 수 있는 구성식

을 유도하였다.

3. 등방상태에서 유도된 구성식을 적용한 결과, 불포화 점성토에서 흡인력이 증가하거나 감소하는 경우 또는 등방응력이 증가 또는 감소하는 경우에 발생하는 체적변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한, 불포화 점성토가 포화과정에 이르는 동안 발생하는 체적의 변화는 응력경로가 다르더라도 일정하지만, 건조과정에서 발생하는 체적의 변화는 응력경로에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 삼축상태에서 축차응력은 구성식에 의한 예측결과와 실험결과와 잘 일치하여 불포화 점성토의 전반적인 거동을 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 불포화 시료가 저축압 상태에서는 체적변형률은 차이를 보이고 있는데 이는 구성식의 유도과정에서 주안점을 흡인력의 변화에 따른 체적변화에 두고 포화시의 경계조건으로 택한 수정 Cam-clay모델이 다이러턴시 현상을 나타내지 못하기 때문으로 생각된다.

5. 개발된 구성식은 저축압 하에서 약간의 차이를 보이지만, 불포화 점성토의 응력 및 체적변화 경향을 잘 나타내고 있으므로 토질상수의 보정이나 다이러턴시에 대한 부분을 추가하면 불포화 점성토의 전단에 따른 거동예측에 정확성을 기할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 한국학술진흥재단의 '94 신진 연구인력 연구장려금에 의하여 수행되었으며, 본 재단에 감사의 마음을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Atkinson, G. D. and I. B. Donald, 1956. Some Preliminary Studies of Unsaturated Soils. Effective Stresses in Unsaturated Soils., Proc. 2nd Austr.-N. Zealand Conf. Soil Mech. Fdn. Engineering,

- Christchurch, pp. 192-199.
2. Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa, 1990. A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, 40(3), pp. 405-430.
 3. Campos, T. M. P and E. A. Vargas, 1991. Discussion of 'A Constitutive Model for Partially Saturated Soils.' by E. E. Alonso, A. Gens and A. Josa (1990), *Geotechnique*, 41(2), pp. 273-275.
 4. Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern, 1977. Stress Variables for Unsaturated Soils. *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 103(GT5), pp. 447-466.
 5. Fredlund, D. G., H. Rahardjo, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, John Wiley & Sons Inc.
 6. Gens, A., E. E. Alonso and A. Josa, 1989. *Elastoplastic Modelling of Partially Saturated Soils. Numerical Models in Geomechanics Numog III*, Elsevier Applied Science, pp. 163-170.
 7. Gromko, G. J., 1974. Review of Expensive Soils. *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 100(GT6), pp. 667-687.
 8. Hilf, J. W., 1956. An Investigation of Pore Water Pressure in Compacted Cohesive Soils. US Bureau of Reclamation, Tech. Mem. 654, Denver, US Bureau of Reclamation.
 9. Jennings, J. E. and J. B. Burland, 1962. Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils. *Geotechnique*, 12(2), pp. 125-144.
 10. 송 창 섭, 1994. 불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

(접수일자 : 1996년 4월 12일)