

불포화 점성토의 등방압축 상태에서 발생하는 항복곡면과 경화함수

Yield Surface and Hardening Laws of Unsaturated Clayey Soils for Isotropic Compression

송 창 섭*
Song, Chang Seob

Summary

This paper presents yield surfaces and hardening laws for describing the state of an unsaturated soil under isotropic compression and suction changes. The yield surface is formulated within the framework of hardening plasticity using two independent sets of stress variables : the excess of total stress over air pressure and the suction. And the application of the yield surfaces and hardening laws are confirmed from the result of the experiment. To this end a series of suction-controlled isotropic tests are conducted on clayey soils.

Matric suction is controlled by the axis translation technique using high air entry ceramic disk. The specimens are compacted using a half of Proctor compaction energy with 5 % lower of water content than the optimum moisture contents.

From test results, existence of the yield surfaces and an application of hardening laws to samples are confirmed by comparison between test and predicted results. And it is confirmed that LC yield locus is extened with the total plastic deformations induced by suction or stress changes, however, SI yield locus is only extended with the plastic deformations by induced suction changes.

I. 서 론

흙을 재료로 축조하는 구조물은 그 재료의 성질을 충분히 검토하고 파악한 후에, 설계 또는 시공해야 된다. 일반적으로 흙을 성토재료로 사용하는 경우에 그 목적에 따라 함수비

를 조절하여 사용하고 있는데, 차수를 목적으로 할 때는 최적함수비보다 약간 습윤측에서 강도를 목적으로 하는 경우에는 약간 건조측에서 다지는 것이 바람직하다. 그러나, 장비의 다짐효과를 고려하여 최적함수비보다 약간 건조측에서 다지는 것이 일반적이다. 이러한 건

*충북대학교 농과대학

키워드 : 불포화토, 항복함수, 경화함수

조측에서의 다짐은 흙의 구조적인 면에서 많은 문제점을 가지고 있는데, 그 중에서 물의 침투에 의한 체적의 변화 및 지지력의 약화 등을 들 수 있으며, 이는 바로 그 구조물의 기능과 목적을 저해하는 역할을 하게 된다.

이와같이 인공적으로 다져진 불포화토의 구조는 포화토보다 복잡하고 다양한 양상을 나타낸다. 흙을 최적함수비보다 낮은 상태에서 다지면 토립자는 물을 중심으로 뭉쳐 입단구조가 되며, 흡인력이 충분히 커서 외부하중에 저항할 정도가 되면 흙은 마치 큰 공극을 가진 조립토와 같은 거동을 보이게 된다.⁶⁾

불포화토는 공기, 물과 토립자로 구성되지만, 간극의 크기, 수분상태 등 구성비에 따라 외부하중에 저항하는 정도가 달라진다. 특히, 물은 표면장력을 가지고 있기 때문에 공기와의 접촉면에서 토립자의 거동에 많은 영향을 주고 있어, Fredlund 등⁴⁾은 물과 공기의 접촉면에서 발생하는 접촉압을 고려하여 공기와의 접촉면도 하나의 구성성분으로 보아야 한다고 주장하고 있다.

불포화토의 체적변화를 일으키는 조건은 수분의 증감에 의한 흡인력의 변화와 외부하중을 들 수 있는데, 연구결과에 의하면 흡인력이나 하중이 변화하면 어느 범위까지는 일정하게 체적이 변하다가 그 범위를 초과하면 급격한 변화를 보이는 것으로 발표되고 있다. 즉, 초기에 불포화토의 함수상태와 하중조건이 주어지면 어떤 범위가 정해지고 그 범위 내에서는 탄성거동을, 그 바깥부분에서는 탄소성거동을 나타낸다고 볼 수 있다.^{2,4,6)}

본 연구에서는 응력변수를 사용하여 탄성영역과 그 경계를 나타내는 항복함수와 외부조건 변화에 따른 경계면의 전개를 나타내는 경화함수를 유도하고, 점성토를 사용하여 외부조건(함수비, 흡인력)을 달리한 일련의 실험을 통하여 항복함수와 경화함수의 적용성을 검토하고자 한다.

II. 항복함수와 경화함수의 유도

등방상태하에서 불포화토의 체적은 하중 또는 흡인력의 증가에 의하여 변화한다. 그러나, 어떤 범위에서는 응력이나 흡인력의 증가에 의한 체적의 변화양상이 달라지게 되며, 응력이나 흡인력이 감소하는 경우에 체적이 팽창 또는 감소하게 된다. 이와 같은 관계를 수식으로 나타내기 위하여, 여러 연구결과를 바탕으로 체적변화율이 변하는 점을 중심으로 항복함수를 유도하였다.⁷⁾

1. LC(Loading-Collapse) 항복함수의 유도

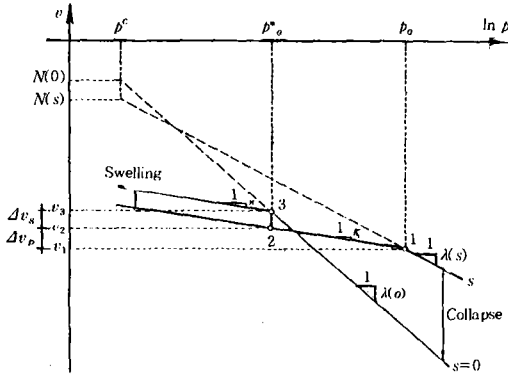
응력과 흡인력에 따른 체적거동을 나타내기 위하여 등방상태에서 축압과 간극공기압의 차인 순평균응력(net mean stress), $p(=\sigma_m - u_a)$ 와 간극공기압과 간극수압의 차인 흡인력(metric suction), $s(=u_a - u_w)$ 를 변수로 하는 (p, s) 상태면에서 항복체적을 유도하였다. 항복함수를 유도하기 위하여 불포화토의 비체적($v=1+e$)과 순평균응력(p)을 사용하여, 흡인력이 각각 다른 경우($s=s, s=0$)를 (p, s) 평면 상에 이들을 나타내면 Fig. 1과 같다. 여기서, p_0^* 는 포화 때의 항복응력이며, p_0 는 불포화 토 때의 항복응력을 나타낸다.

Fig.1에서 정규압밀상태의 점1 및 점3의 비체적을 표시하면 다음과 같다.

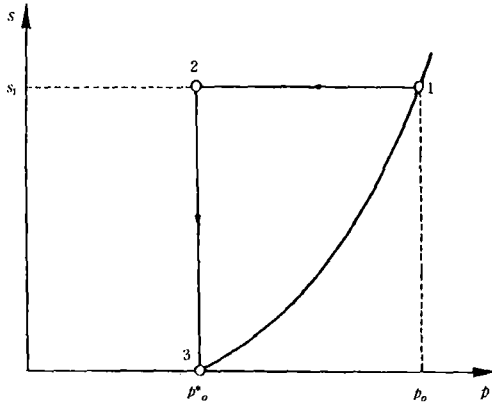
$$v_1 = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln \frac{p_0}{p_c} \dots\dots\dots (1)$$

$$v_3 = N(0) - \lambda(0) \cdot \ln \frac{p_0^*}{p_c} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $N(s)$ 및 $N(0)$ 는 $p=p_c$ 일 때 불포화 및 포화상태의 비체적을 나타내며, $\lambda(s)$ 및 $\lambda(0)$ 는 $(v, \ln p)$ 평면 상의 기울기를 의미하고, p_c 는 기준응력을 나타낸다.



(a) compression curves for saturated and unsaturated soil



(b) stress path and yield curve in (p, s) stress plane

Fig. 1. Relationship between preconsolidation stress p_o^* and p_o

또한, (p, s) 평면에서 나타나는 궤적을 구하기 위하여 점1에서 점3으로의 제하-포화과정에 대한 체적변화를 고려하면, 각각의 점은 동일한 (p, s) 평면 상에 있으므로 점3의 체적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_3 = v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s \dots\dots\dots (3)$$

여기서, Δv_p 는 제하(unloading)에 의한 체적변화, Δv_s 는 포화(wetting)에 의한 체적변화를 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta v_p = \kappa \cdot \ln \frac{p_o}{p_o^*} \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta v_p = \kappa_s \cdot \ln \frac{p_{at} + s}{p_{at}} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, κ 는 $(v, \ln p)$ 평면상의 제하 때의 기울기를, κ_s 는 $(v, \ln s)$ 평면상에서 흡인력이 감소할 때의 기울기를 의미한다. 또, p_{at} 는 포화시에도 성립하도록 첨가한 상수로서 본 연구에서는 대기압을 사용하였다.

$N(0)$ 와 $N(s)$ 의 차이는 $p = p_c$ 일 때 포화로 인한 체적팽창을 의미하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(0) - N(s) = \kappa_s \cdot \ln \frac{p_{at} + s}{p_{at}} \dots\dots\dots (6)$$

식(1)~식(2) 및 식(4)~식(6)을 식(3)에 대입하여 정리하면 p_o 와 p_o^* 의 관계를 유도할 수 있다.

$$\frac{p_o}{p_c} = \left(\frac{p_o^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \lambda}{\lambda(s) - \lambda}} \dots\dots\dots (7)$$

식(7)은 흡인력이 증가하는 경우 항복응력 p_o 의 값을 나타내며, (p, s) 평면 상에서 항복함수군을 의미한다. 이 함수에 의하면 흡인력의 증가에 따른 항복응력 p_o 의 증가와 더불어 포화과정에서 나타나는 붕괴현상도 설명할 수 있으므로 이 항복함수를 LC(Loading-Collapse)항복함수라 한다.

2. SI(Suction-Increase)항복함수와 탄성영역

흡인력의 증가에 대한 체적변화를 대수함수로 나타내면, 흡인력의 증가에 의해서 체적변형률이 바뀌는 점을 가정할 수 있다. 과거에 받았던 최대의 흡인력 s_o 라 하면 이보다 작은 흡인력에서는 탄성거동으로 회복가능한 체적

변화를 나타내며, s_0 보다 큰 흡인력에서는 초기의 변형률에 따른 체적거동을 보인다. 따라서, 과거에 받았던 최대의 흡인력(항복흡인력)인 s_0 도 흡인력에 대한 항복함수로 취할 수 있으며 다음과 같다.

$$s = s_0 = \text{constant} \quad \dots\dots\dots (8)$$

이것을 SI(Suction Increase)항복함수라 하며, 흡인력이 s_0 보다 작으면 탄성거동을, s_0 보다 크면 체적은 초기압축곡선을 따라 탄·소성 거동을 나타낸다.

앞에서 구한 LC 및 SI 항복함수를 (p, s) 평면상에 나타내면 Fig. 1(b)와 같이 하나의 영역을 형성하게 된다. 이 영역에서는 체적변형의 회복이 가능하므로 탄성영역으로 볼 수 있다.

3. 경화함수(Work-Hardening)

LC 항복함수는 (p, s)평면상에서 항복응력과 흡인력의 관계를 나타내고 있는데, 응력이 항복응력보다 증가하는 경우에도 이 관계를 유지하면서 탄성영역이 확대되는데, 이는 강도의 증가형태로 나타난다. 즉, 소성체적변화에 의해서 강도가 증가한다는 것을 의미한다.

응력의 증가에 따른 소성체적변화(= dv_p^b)는 전체적변화에서 탄성체적변화를 제외시킨 것이므로 다음과 같다.

$$dv_p^b = -(\lambda(s) - \kappa) \frac{dp_o}{p_o} \quad \dots\dots\dots (9)$$

또, 식(7)의 LC 항복함수를 미분형태로 바꾸어 식(9)에 대입하여 정리하면, 응력의 증가에 의한 소성체적변화와 p_o^* 의 관계는 다음과 같다.

$$dv_p^b = -(\lambda(0) - \kappa) \frac{dp_o^*}{p_o^*} \quad \dots\dots\dots (10)$$

같은 방법으로 흡인력의 증가에 따른 소성 체적변화(= dv_s^b)를 구하면 다음과 같다.

$$dv_s^b = (\lambda_s - \kappa_s) \frac{ds_o}{s_o + p_{at}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

따라서, 전소성체적변화(= dv^b)는 다음과 같다.

$$dv^b = dv_p^b + dv_s^b \quad \dots\dots\dots (12)$$

그런데, 송⁷⁾은 Alonso 등¹⁾의 결점을 보완하기 위하여 흡인력의 증가에 의한 소성체적변화는 s_0 및 p_o^* 의 증가를 유발하고, 응력의 증가에 의한 소성체적변화는 p_o^* 의 증가만을 유발한다고 가정하여, 식(9)~식(11)로부터 경화함수를 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{dp_o^*}{p_o^*} = \frac{1}{\lambda(0) - \kappa} dv^b \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{ds_o}{p_{at} + s_o} = \frac{1}{\lambda_s - \kappa_s} dv_s^b \quad \dots\dots\dots (14)$$

III. 재료 및 시험방법

1. 재 료

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

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

Gs	LL (%)	PL (%)	O.M.C (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	USCS
2.60	44.3	19.8	26.0	1.47	CL

*주 OMC와 최대건조밀도는 Proctor의 표준단점 에너지의 50% 적용치임.

2. 시험방법

공시체의 제작은 송⁷⁾의 방법에 따랐으며, 시험은 삼축압축시험기를 개조하여 간극공기압, 간극수압 및 측압을 제어할 수 있도록 항압셀을 사용하였으며, 또한, 공기, 시료의 체적변화 및 함수량의 변화는 별도의 기구를 제작하여 측정하였다.

흡인력은 실험실에서 동일한 시료에 여러 종류의 흡인력을 재현할 수 있는 장점을 가진 Hilf(1956)⁵⁾에 의해 연구된 축변환기법(axis translation technique)을 이용하였으며, 고압 공기투과판(high air entry ceramic disk)은 공기통과압이 약 1.5kg/cm²인 것을 사용하였다.

시험은 공시체를 삼축셀에 설치한 후, 공시체의 하부측으로 간극공기압을 0.9kg/cm²으로 일정하게 공급하고 상부측으로 가한 간극수압을 조절하여 임의의 포화 및 불포화 상태를 재현하였으며, 평형상태에 이르는 동안 공기체적, 간극수의 체적 및 공시체의 체적을 측정하였다. 평형상태를 확인한 후에 시험하고자 하는 경로에 따라 각각의 측압 및 간극수압을 조절하며 체적변화를 측정하였다.

시험은 체적변화를 유발하는 2종류의 조건을 변화시켜 수행하였으며, 시험경로는 Fig. 2에 나타나 있다. 경로 A는 흡인력(s)이 일정한 경우, 외부에서 가해지는 압력(순평균응력)에 따른 체적의 변화를 측정하는 것이고, 경로 B는 외부의 압력조건이 일정한 경우, 수분의 출입에 의한 흡인력 변화에 따라 나타나는 체적변화를 측정하는 과정이다.

Table-2는 시험의 초기조건 및 범위를 나타낸 것이다. 경로 A의 과정에서는 6종류의 흡인력을 초기상태로 채택했는데, 이 중에서 2개는 소성영역에 위치하도록 시험조건을 설정하여 각각의 흡인력에 대한 체적변화율과 항복하중을 구하였다. 경로 B의 과정에서는 순평균응력을 4종류로 일정하게 유지한 채, 간

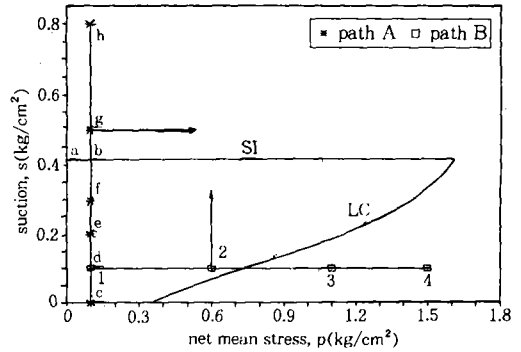


Fig. 2. Stress paths in (p, s) stress plane

Table-2. Initial conditions and test ranges

path A		path B	
suction, s (kg/cm ²)	net mean stress, p (kg/cm ²)	net mean stress, p (kg/cm ²)	suction, s (kg/cm ²)
0.0, 0.1, 0.2 0.3, 0.5, 0.8	0.1 ↔ 5.0	0.1, 0.6 1.1, 1.5	0.1 ↔ 0.8

극수압을 조절하여 흡인력을 0.1~0.8kg/cm²까지 변화시켜 시료의 건조-포화 과정에서 발생하는 체적변화를 측정하고, 각각의 순평균응력에 대한 체적변화율이 바뀌는 점을 구하였다. 또한, 항복점을 초과한 하중이나 흡인력이 항복함수에 미치는 영향 즉, 경화함수의 전개과정을 검토하기 위하여 시험의 시작점을 탄성영역과 소성영역에 위치하도록 구분하여 시험하였다.

IV. 결과 및 고찰

최적함수비보다 약 5%정도 건조한 공시체를 만들어 흡인력, 포화도, 함수비 등을 측정 한 결과, 함수비는 약 21.0%, 포화도는 58.79%, 공극비는 0.929, 건조단위중량은 1.348t/m³이고, 이 때의 흡인력은 약 0.416kg/cm²였다. 또, 평형상태에 도달하는 시간은 공시체의 상태에 따라 약간 다르게 나타나고 있으나, 약 24시간 정도 지나면 더 이상의 수분이나

공기의 출입이 없이 평형상태에 도달하였다.

1. 하중에 따른 항복합수의 변화

가. 하중에 따른 체적의 변화

흡인력이 일정한 경우, 하중의 증감에 따른 체적변화와 항복응력을 검토하기 위하여 경로 A에 따라 등방압축시험한 결과를 도시하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 각각의 흡인력에 대한 순평균응력과 공극비의 관계를 $e-\ln p$ 평면에 나타낸 것이다. 그림에서 하중의 증가에 따라 체적이 급변하는 점을 발견할 수 있으며, 변곡점 이전의 기울기는 제하 때의 기울기와 같으므로 변곡점 이전을 탄성영역으로 볼 수 있다. 따라서, 앞 절에서 언급한 LC 항복합수의 존재를 확인할 수 있다.

또, 곡선의 기울기가 흡인력이 클수록 작게

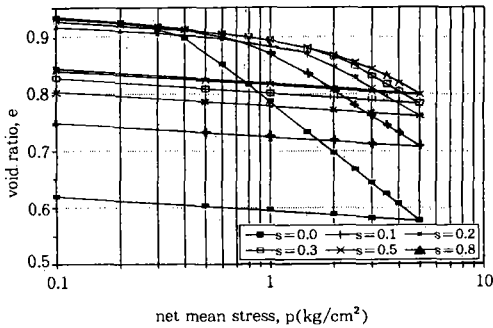


Fig. 3. $e-\ln p$ curves for different soil suctions

Table-3. Slopes of loading and unloading curves and yield pressure suction

suction (kg/cm ²)	$\lambda(s)$	κ	p_0 (kg/cm ²)	remarks
0.0	0.1300	0.011	0.350	saturated
0.1	0.1060	0.011	0.741	unsaturated
0.2	0.0960	0.011	1.147	"
0.3	0.0916	0.011	1.439	"
0.5	0.0890	0.011	1.711	"
0.8	0.0885	0.011	1.962	"

나타나는데, 이는 불포화토의 구조는 흡인력에 의해 유지되고 있으므로 내포하고 있는 수분이 적을수록 외부하중에 저항하는 힘이 크기 때문이다.

Fig. 3의 $e-\ln p$ 평면에서 재하(loading) 때의 기울기를 $\lambda(s)$, 제하(unloading) 때의 기울기를 κ , 기울기가 변하는 점의 응력(항복응력)을 p_0 라 하여 구하면 Table-3과 같다.

나. 경화함수의 고찰

Table-3에서 흡인력이 증가할수록 기울기의 변화점이 우측에 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 항복점의 증가를 나타내는 경화함수를 검토하였다. Fig. 4는 경로 A에 의한 시험의 시작점과 측정된 항복점 및 항복합수를 도시한 것이다. 공시체는 초기 a점에서 약간의 축압을 가한 후(b점), 간극수압을 조절하여 각 시험의 시작점인 c점, d점, e점, f점, g점, h점의 상태로 평형에 다다르면 하중을 가하게 된다. 이 때, 각 점에서의 응력상태 및 체적의 변화는 Table-4와 같다.

Table-3 및 Table-4의 결과를 바탕으로 식(13)과 식(14)에 주어진 경화함수에 의하여 항복점의 응력을 구하여 실험치와 비교하면 Table-5와 같다.

이상의 결과를 Fig. 4로부터 설명하면, a점, b점, c점, d점, e점 및 f점은 탄성구역에 있으

Table-4. Stress state and volume changes of each points for samples tested

pt.	s (kg/cm ²)	p (kg/cm ²)	Sr (%)	ω (%)	$\Delta V/V$ (%)	e
pt. a	0.416	0.0	51.47	13.80	0.0	0.929
pt. b	0.416	0.1	51.47	20.75	0.570	0.918
pt. c	0.0	0.1	100.0	35.42	0.415	0.921
pt. d	0.1	0.1	97.24	34.41	0.467	0.920
pt. e	0.2	0.1	90.11	31.85	0.518	0.919
pt. f	0.3	0.1	76.43	27.01	0.534	0.919
pt. g	0.5	0.1	50.31	17.71	0.726	0.915
pt. h	0.8	0.1	43.66	15.21	1.192	0.907

Table-5. Comparison between tested and calculated po for each stress states

s (kg/cm ²)	yield pressures (p_o)				remark
	initial	measured	calculated	saturated (p_o^*)	
0.0	0.35	0.35	0.35	0.35	suction decreased
0.1	0.741	0.741	0.741	"	"
0.2	1.147	1.147	1.147	"	"
0.3	1.439	1.439	1.439	"	"
0.5	1.666	1.711	1.709	0.356	suction increased
0.8	1.720	1.962	1.930	0.378	"

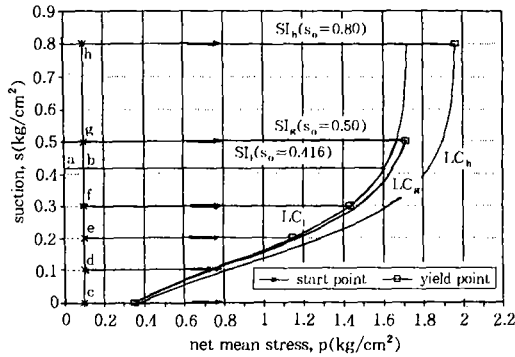


Fig. 4. Development of LC and SI loci during suction increase

므로 소성체적변화가 발생하지 않아 초기의 항복곡선 LC_1 와 $SI_1(s_0=0.416)$ 로 유지하고 있으나, g점과 h점에서는 흡인력의 증가에 의한 소성체적변화가 발생하므로 LC 및 SI 항복함수가 확대되어 g점의 상태에서는 LC_g 와 $SI_g(s_0=0.50)$ 로, h점의 상태에서는 LC_h 및 $SI_h(s_0=0.80)$ 로 항복곡선이 전개된다. 그림에서 (□)로 표시되는 시험치와 경화함수에 의해서 계산치(실선) 잘 부합되는 것을 볼 수 있다.

2. 흡인력에 따른 항복함수의 변화

가. 흡인력에 따른 체적의 변화

순평균응력이 일정한 경우, 흡인력에 의한 체적변화율과 항복흡인력을 구하기 위하여 경로 B에 따라 시험한 결과를 도시하면 Fig. 5와 같다.

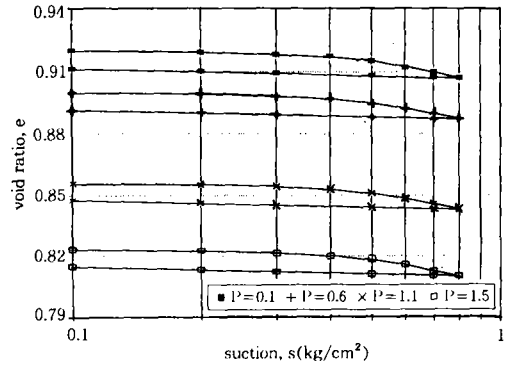


Fig. 5. $e-\ln s$ curves for different net mean pressures

그림은 각각의 순평균응력에 대한 흡인력과 공극비의 관계를 $e-\ln s$ 평면에 나타낸 것이다. 여기서도 하중의 증가와 마찬가지로 흡인력에 따라 체적이 급변하는 점을 발견할 수 있는데, 이는 앞 절에서 언급한 SI항복함수의 존재를 의미한다.

$e-\ln(p_{at} + s)$ 평면에서 흡인력 증가(drying)할 때의 기울기(λ_s), 감소(wetting)할 때의 기울기(λ_s), 기울기가 변하는 점의 흡인력(항복흡인력, s_0)를 구하면 Table-6과 같다.

Table-6. Slope for suction change and yield suction

p (kg/cm ²)	λ_s	κ_s	s_0 (kg/cm ²)	remarks
0.1	0.045	0.011	0.416	saturated
0.6	0.045	0.011	0.416	unsaturated
1.1	0.045	0.011	0.416	"
1.5	0.045	0.011	0.416	"

나. 경화함수의 고찰

하중이 증가하여, 앞 절에서 구한 탄성구역을 초과할 때 발생하는 소성체적변화가 항복함수에 미치는 영향을 검토하였다. a점의 공시체 상태에서 1점, 2점, 3점 및 4점의 시작점으로 이동하는 과정에서 나타나는 응력상태, 체적의 변화 및 p_o^* 의 결과를 Table-7에

Table-7. Stress state and yield conditions of each points for samples tested

pt.	p (kg/cm ²)	s (kg/cm ²)	Sr (%)	ω (%)	$\Delta V/V$ (%)	$e_{mea.}$	p_o^*	s_o
pt. a	0.0	0.416	51.47	13.80	0.0	0.929	0.35	0.416
pt. b	0.1	0.416	51.47	20.75	0.570	0.918	"	"
pt. 1	0.1	0.1	97.24	34.41	0.467	0.920	"	"
pt. 2	0.6	0.1	97.24	33.66	1.503	0.900	"	"
pt. 3	1.1	0.1	97.24	32.01	3.784	0.856	0.485	"
pt. 4	1.5	0.1	97.24	30.78	5.495	0.823	0.636	"

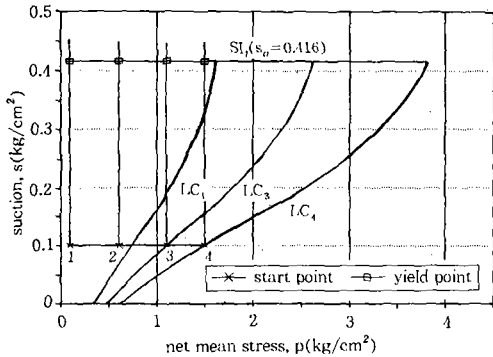


Fig. 6. Development of LC and SI loci during loading

요약하였으며, 이를 도시하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 a점, b점, 1점 및 2점은 탄성구역에 있으므로 초기 항복곡선 LC₁와 SI_i(s_o = 0.416)로 될 것이며, 3점과 4점은 소성구역에 존재하므로 하중의 증가에 의한 소성체적변화가 발생하여 항복함수의 변화가 예상된다. 그러나, 3점과 4점에서 시작한 시험의 결과, SI 항복함수는 변화하지 않고 LC항복함수만 변화하여 LC₃와 LC₄로 항복곡선이 전개되는 것을 볼 수 있다. 이는 경화함수의 유도과정에서 언급한 하중의 증가에 따른 소성체적변화는 SI항복함수에는 영향을 미치지 않고, LC항복함수에만 영향을 미친다는 가정을 입증하는 것이다.

V. 요약 및 결론

불포화 점성토의 응력상태를 규정하는 항복

함수와 경화함수를 유도하고, 이를 검토하기 위하여 순평균응력과 흡인력을 사용하여 일련의 시험을 행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불포화토의 순평균 응력과 흡인력을 응력변수로 하여 탄성영역을 규정할 수 있는 항복함수를 유도하였다. 또, 외부조건의 변화에 따른 흙의 상태를 예측할 수 있는 경화함수를 유도하였다.

2. 점성토에 대한 등방압축시험의 결과로부터, 항복함수의 존재를 확인할 수 있었으며, 흙의 응력상태에 따라 결정되는 항복곡면내에서는 체적의 변화가 가역적인 것으로 나타났다.

3. 실험의 결과, 항복함수의 전개상황을 파악할 수 있는 경화함수는, 하중이나 흡인력의 변화 등의 외부조건 변화에 기인한 소성변형에 따라 변화하는 것으로 나타났다.

4. LC항복함수는 하중이나 흡인력의 증가에 따른 전소성변화에 영향을 받으며, SI항복함수는 흡인력의 증가에 따른 소성변화에만 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 불포화토가 흡인력에 따라 구조가 결정되어져 있는데, 흡인력의 증가에 따라서는 이러한 구조가 쉽게 파괴되지만 응력의 증가는 입자의 재배열에만 기여할 뿐 구조의 파괴에는 영향을 미치지 않기 때문에 사료된다.

참 고 문 헌

1. Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa,

1990. A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, 40(3), pp. 405-430.
2. Baden, L., 1965, Consolidation of Compacted and Unsaturated Clays, *Geotechnique*, 15(3), pp.267-286.
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., H. Rahardjo, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, John Wiley & Sons Inc.
5. 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.
6. 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.
7. 송창섭, 1994. 불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발, 서울대학교 대학원 박사 학위논문.
8. 송창섭, 장병욱, 1996, 불포화 점성토의 거동예측을 위한 구성식 개발, 한국농공학회지, No.38, Vol.3, pp.101~110.

(접수일자 : 1996년 11월 18일)