

不飽和 砂質土의 舉動豫測을 위한 構成式 開發

Development of Constitutive Model for the Prediction of
Behaviour of Unsaturated Granular Soil

宋 昌 變*1

Song, Chang - Seob

張 秉 郁*2

Chang, Pyoung - Wuck

Abstract

The aim of the work described in this paper is to develop a constitutive model for the prediction of an unsaturated soil and to confirm the application of the model, which is composed of the elastic and plastic part in consideration of the matric suction and the net mean stress.

From test results, volume changes and deviator stresses are analyzed at each state and their relationships are formulated. The application of the model to silty sands 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. Predicted deviator stresses are well agreed with test results in shearing process. Overall acceptable predictions are reproduced in high confining pressure. Usefulness of the model is confirmed for the unsaturated soil except volumetric strain, which is not well agreed with the test results due to deficiency of dilatancy of the model in low confining pressure. It is, therefore, recommended to study the behavior of dilatancy for an unsaturated soil.

요 지

실트질 모래를 재료로 三軸壓縮試驗機를 개조하고, 삼축셀에 高壓空氣透過板을 부착하여 軸變換技法에 의해 吸引力과 純平均應力을 조절하면서 等力壓縮試驗과 剪斷試驗을 행하여, 不飽和狀態에 따른 土質定數의 變化를 糾明하였으며, 含水狀態의 變化에 따라 應力, 體積變化 등의 舉動特性을 검토하였다.

실험의 결과에서 규명된 不飽和土의 特性을 바탕으로, 불포화토의 應力成分을 고려하고, 수정 Cam-Clay 모델을 境界條件으로 하는 不飽和土의 舉動豫測을 위한 構成式을 開發하고, 실트질 모래에 대한 室內實驗의 資料로부터 구한 觀測置와 豫測置를 비교하여 이의 妥當性을 檢證하였다.

*1 정희원, 서울대학교 농업개발연구소 특별연구원

*2 정희원, 서울대학교 농업생명과학대학 부교수

1. 緒 論

흙을 구성하는 3상에서 土粒자를 제외한 體積을 空隙이라고 하고, 이 空隙이 물로 채워져 있는 경우를 飽和土, 일부만 물로 채워져 있는 경우를 部分飽和土 또는 不飽和土라고 한다.

飽和土인 경우, 空隙水壓은 正의 값을 가지는 반면, 不飽和土인 경우는 負의 空隙水壓을 나타내게 된다. 따라서, 土質力學은 飽和土를 취급하는 飽和狀態의 土質力學(saturated soil mechanics)과 不飽和土를 취급하는 不飽和狀態의 土質力學(unsaturated soil mechanics)으로 나누어지게 된다. 포화상태의 土質力學은 自然堆積한 地盤層을 대상으로 하며, 不飽和狀態의 土質力學은 건조한 지역의 殘留土, 운반된 흙 또는 人工적으로 다져진 地盤을 解析의 대상으로 삼고 있다.⁽⁷⁾

不飽和土가 물을 흡수하려는 能力을 全吸引力(total suction)이라고 하며, 全吸引力은 空隙空氣壓과 空隙水壓의 차인 吸引力(matric suction)과 흙 속의 鹽分, 化學物質 등의 濃度

차에 의한 滲透壓(osmotic suction)으로 구분할 수 있다. 특히, 滲透壓은 鹽分, 化學物質 등을 함유한 특수한 지역에서만 발생하는데 건조한 지역이나 膨脹性 흙은 滲透壓에 의한 영향이 큰 것으로 보고되고 있으나 일반적인 흙에서는 吸引力보다 작은 값을 나타낸다고 보고되어 있다.^(12, 13)

그동안 膨脹性 흙이나 崩壞性 흙에 대한 被害事例가 보고되었으나⁽¹⁰⁾ 기구의 未備와 認識의 不足, 이론적인 배경의 不足 등으로 연구가 부진하였지만 최근에 와서야 不飽和土에 대한 研究의 必要性을 인식하게 되었으며, 또한 不飽和土에서 발생하는 여러 現象을 土質工學的인 側面에서 檢討하기 시작하였으나, 아직까지도 理論의 定立이 명확하지 않고 미진한 부분이 많다.^(6, 12, 13, 16)

본 研究에서는 실트질 모래를 사용하여 不飽和狀態에서 발생하는 土質常數의 變化상태를 究明하고 그에 따른 不飽和土의 舉動特性을 검토하며, 도출된 不飽和土의 特性을 바탕으로 不飽和土의 應力成分을 고려하고, 수정

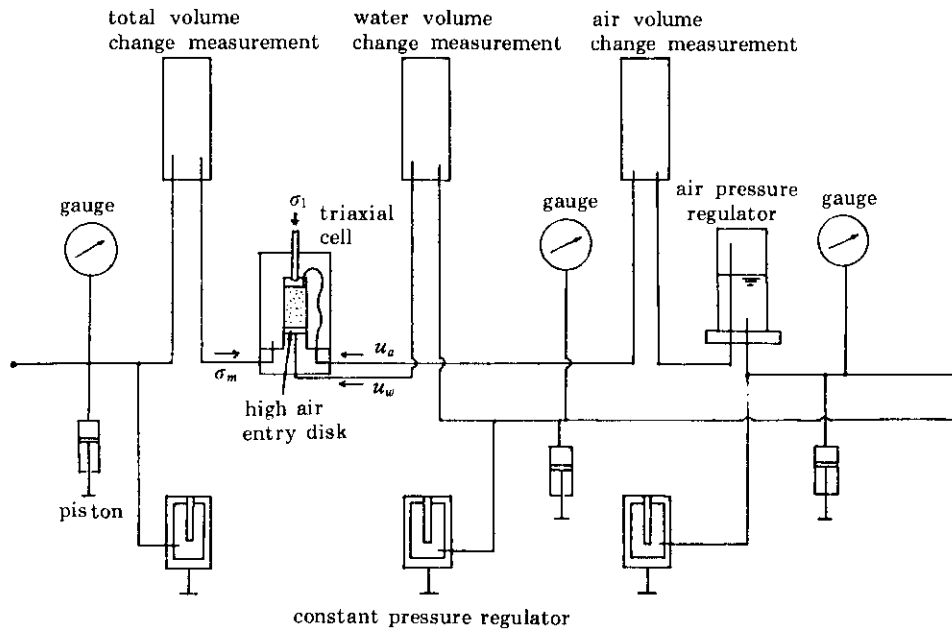


그림 1. 개조된 삼축압축시험기의 모식도

표 1 시료의 물리적 성질

G _v	LL(%)	PL(%)	PI	O.M.C.(%)	γ_{dmax} (kg/cm ²)	U.S.C.S.
2.68	37	26	11	18.8	17.6	SM-SC

Cam-Clay 모델을 境界條件으로 하는 不飽和土의 舉動豫測을 위한 構成式을 開發하고, 실트질 모래에 대한 室內實驗의 資料로부터 觀測値와 豫測値를 비교하여 이의 妥當性을 檢證하였다.

2. 材料 및 試驗方法

2.1 材料

시험에 사용된 흙은 盛土材로 많이 사용되고 있는 沖積 실트질 모래를 선정하였다. 試料는 상당량의 粘土分을 함유하고 있었으며 試料의 粒度分布曲線은 그림 2와 같으며, 物理的 性質은 표 1과 같다.

2.2 供試體의 製作

自然乾燥 또는 乾燥機에서 건조한 試料에서 적당량을 계량하여 最適含水比보다 약 5% 건조한 상태가 되도록 蒸溜水를 가하면서 혼합하여 조제된 試料를 습포로 덮어 약 24시간동안 방치하여 물과 입자가 平衡狀態에 이르도록 한 후, 몰드(H=37.5mm, $\phi=35$ mm)에서 Proctor 표준다짐에너지의 50%로 다져서 만들었다.

2.3 試驗方法

시험은 三軸壓縮試驗機를 개조하여 사용하였으며 공기, 試料의 體積變化 및 含水比의 변화를 측정하기 위하여 별도의 기구를 제작하여 사용하였다. 그림 1은 개조된 三軸壓縮試驗機의 모식도를 보여주고 있다.

吸引力은 Hilf(1956)⁽¹¹⁾에 의해 연구된 軸變換技法(axis translation technique)에 의해 再現하였으며, 이때 空氣通過壓이 약 1.5 kg/cm²인 高壓空氣透過板(high air entry cer-

amic disk)을 사용하였다.

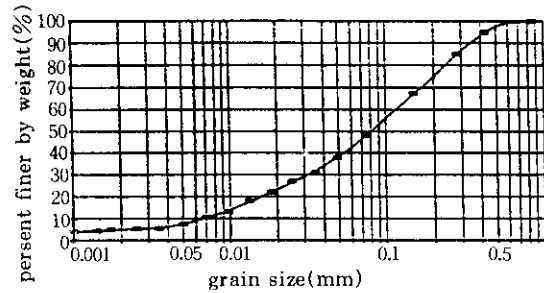


그림 2. 입도분포곡선

1) 等方壓縮試驗

吸引力은 空隙空氣壓과 空隙水壓의 차이가 되므로 시료의 하부에 있는 高壓空氣透過板을 통하여 공극수압(u_w)을 가하고, 시료의 상부를 통하여 공극공기압(u_a)을 가하면 시료는 일정한 흡인력($s=u_a-u_w$)의 상태가 된다. 이 때, 동시에 측압(σ_m)을 가하여 시료에 원하는 흡인력(s)과 純平均應力($p=\sigma_m-u_a$) 상태를 재현할 수 있게 된다.

가) 吸引力이 일정한 경우

吸引力이 일정한 경우, 荷重의 增加 또는 減少에 따른 체적의 변화를 검토하기 위한 시험으로, 일정한 공극수압과 공극공기압을 가하여 吸引力을 일정한 값으로 유지하면서 측압을 증

표 2 등방압축시험의 시료 초기조건과 하중의 범위

suction (kg/cm ²)	void ratio	net mean stress (kg/cm ²)	remarks
0.0	0.716	0.1 ↔ 3.1	saturated
0.1	0.716	0.1 ↔ 5.1	unsaturated
0.3	0.716	0.1 ↔ 5.1	-
0.5	0.716	0.1 ↔ 5.1	-
0.8	0.716	0.1 ↔ 5.1	-

가 또는 감소시켜 純平均壓力이 증가 또는 감소할 때 體積變化를 측정하였다.

사용된 시료의 초기상태와 하중의 범위는 표 2와 같다. 시험의 결과로 부터 飽和 및 不飽和狀態의 體積變化率과 降伏壓力을 검토하였다.

나) 純平均應力이 일정한 경우

純平均應力이 일정할 때 吸引力에 따른 體積變化를 검토하기 위한 것으로, 축압과 공극공기압을 일정하게 유지하면서 공극수압을 조절하여 흡인력을 변화시켰으며, 사용된 試料의 初期條件과 吸引力의 範圍는 표 3과 같다. 시험의 결과로부터 試料의 乾燥-飽和過程에서 발생하는 체적의 변화를 검토하고, 각각의 純平均應力에 대한 體積變化率과 體積變化率이 바뀌는 점을 검토하였다.

표 3 흡인력 변화시험의 초기조건과 흡인력의 범위

net mean pressure (kg/cm ²)	void ratio	suction (kg/cm ²)
0.1	0.716	0.1 ↔ 0.8
0.6	0.716	-
1.1	0.715	-
1.6	0.716	-

2) 剪斷試驗

不飽和土의 剪斷強度를 검토하기 위하여 純平均應力과 吸引力을 조절하면서 排水三軸試驗을 행하였다. 각 시료는 空隙空氣壓(u_a), 空隙水壓(u_w) 및 側壓(σ_m)을 일정한 압력을 가하여 원하는 응력상태를 유지하면서 軸應力(σ_i)을 가하여 軸差應力(q=σ_i-σ_m)에 따른 變形과

표 4 전단시험의 시료 초기조건

suction (kg/cm ²)	net mean stress (kg/cm ²)			remarks
0.0	0.1	0.6	1.1	saturated
0.1	0.1	0.6	1.1	unsaturated
0.3	0.1	0.6	1.1	-
0.5	0.1	0.6	1.1	-
0.8	0.1	0.6	1.1	-

體積舉動을 검토하였으며, 사용된 試料의 試驗條件은 표 4와 같다.

3. 構成式의 開發

3.1 不飽和土의 應力成分

不飽和土의 점토입자는 물을 중심으로 뭉쳐 吸引力에 의하여 단단한 결합을 이루고 있으며 (4, 5, 14) 含水比에 따라 물과 공기의 連續狀態가 달라진다.(15) 또한, 不飽和土는 물과 공기의 接觸面에서는 引張力에 의해 얇은 막을 형성하고 있다고 볼 수 있다.(8, 9) 따라서, 인공적으로 다진 不飽和土의 構造를 土粒子, 물, 공기 및 물과 공기의 接觸面인 4상으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 구조에서 물과 공기의 接觸面에는 물의 장력에 의해서 接觸壓이 발생한다. 이 接觸壓은 不飽和土의 舉動과 飽和土의 舉動을 달라지게 하는 원인이 되므로, 이 接觸壓을 不飽和土에 작용하는 하나의 應力으로 보아야 할 것이다.

不飽和土의 應力成分은 軸應力과 空隙空氣壓의 차인 純應力(net stress)과 空隙空氣壓과 空隙水壓의 차인 吸引力(matric suction)으로 나타낼 수 있으며, 이를 매트릭스 형태로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 降伏曲面

1) LC(Loading-Collapse)降伏函數

壓力과 吸引力에 따른 體積舉動을 나타내기 위하여 等方狀態의 純平均應力, p(=σ_m

$-u_o$)와 吸引力, $s(=u_o - u_w)$ 를 변수로 하는 (p, s) 상태면에서 이 변수에 따른 降伏軌跡을 유도하였다.

不飽和土의 比體積, $v(=1+e)$ 와 純平均應力, p 는 代數函數 형태로 나타낼 수 있는데, 이로부터 不飽和 降伏應力, p_o 와 飽和 降伏應力, p_o^* 의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{p_o}{p_c} = \left(\frac{p_o^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)}{\lambda(s)} \frac{s}{x}} \quad (2)$$

여기서, p_c 는 基準應力, $\lambda(0)$ 및 $\lambda(s)$ 는 飽和($s=0$) 및 不飽和($s=s$)일 때 $e - \ln p$ 곡선상 載下時의 기울기를, κ 는 除荷時의 기울기를 나타낸다.

식(2)는 吸引力이 증가하는 경우 降伏應力 p_o 의 값을 나타내며, (p, s) 평면 상에서 降伏函數群을 의미한다. 이 식에 의하면 吸引力의 증가에 따른 降伏應力 p_o 의 증가와 더불어 포화과정에서 나타나는 崩壞現象도 설명할 수 있다. 이러한 이유에서 이 降伏函數를 LC(loading-collapse) 降伏函數라고 할 수 있다.

2) SI(Suction-Increase)降伏函數

吸引力의 증가에 대한 體積變化를 代數函數로 나타내면, 吸引力의 증가에 의해서 體積變形率이 바뀌는 점을 가정할 수 있다. 이 점을 과거에 받았던 最大의 吸引力 s_o 라 하면 이보다 작은 吸引力 상태에서는 彈性舉動으로 회복 가능한 체적변화를 나타내며, s_o 보다 큰 吸引力 상태에서는 彈性 및 塑性 體積舉動을 보인다. 따라서, 과거에 받았던 최대의 吸引力(降伏吸引力)인 s_o 도 吸引力에 대한 降伏函數로 취할 수 있으며 다음과 같다.

$$s = s_o = \text{constant} \quad (3)$$

이것을 SI(suction increase)降伏函數라 하며, 吸引力이 s_o 보다 크면 體積은 初期壓縮曲線을 따라 변하게 된다.

앞에서 구한 LC 및 SI 降伏函數를 (p, s) 평면상에 나타내면 그림 3과 같이 하나의 영역을

형성하게 된다. 이 영역에서는 體積變形的 회복이 가능하므로 탄성영역으로 볼 수 있는 것이다.

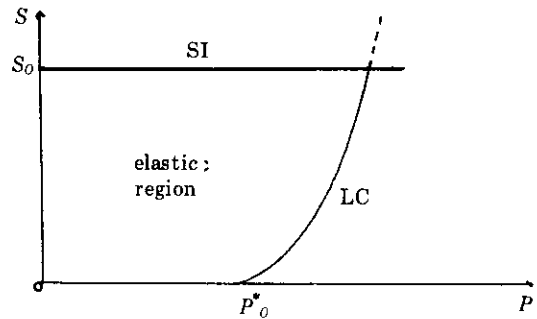


그림 3. LC 및 SI 항복곡선과 탄성영역

3) 硬化函數(Work-Hardening)의 誘導

硬化函數는 (p, s) 평면상에서 應力과 吸引力의 변화에 따른 LC 및 SI 降伏函數의 위치를 나타내는 것으로 塑性體積變化에 의해서 변화하게 된다.

Gens 등(1989)⁽¹⁰⁾과 Alonso 등(1990)⁽³⁾은 LC 및 SI 降伏函數가 全塑性體積變化에 따라서 변화하는 硬化函數를 假定하였다. 그러나, Campos 등(1991)의 적용결과에 따르면 LC 降伏函數가 實驗結果와 일치하지 않으며 豫測된 體積도 實驗結果와 차이를 보인다고 發表하였다. 이것은 硬化函數를 유도함에 있어 壓力의 變化에 따른 内部的 變化를 정확하게 나타내지 못하였기 때문으로 생각된다.

본 연구에서는 Alonso 등의 결점을 보완하기 위하여 吸引力의 증가에 의한 塑性體積變化는 s_o 및 p_o^* 의 증가를 유발하고, 應力의 증가에 의한 塑性體積變化는 단지 p_o^* 의 증가만을 유발한다고 가정하였다. 이는 不飽和土의 構造가 吸引力에 의해 유지되고 있기 때문에 吸引力의 變化는 흙의 구조에 커다란 변화를 수반하게 되는 반면, 應力의 增加에 의해서는 最大吸引力의 상태는 변하지 않고 内部構造를 조밀하게

하는 역할만 하게 되는 것을 의미한다.^(1,2)

이러한 조건에서 硬化函數를 유도하면 식 (4) 및 식(5)와 같다.

$$\frac{dp^*_{s_0}}{p^*_{s_0}} = \frac{1}{\lambda(0) - \kappa} dv^p \quad (4)$$

$$\frac{ds_{s_0}}{p_a + s_{s_0}} = \frac{1}{\lambda_s - \kappa_s} dv^s \quad (5)$$

여기서, $p^*_{s_0}$ 는 포화시의 降伏應力, $\lambda(0)$ 및 κ 는 포화시 $e - \log P$ 곡선의 載荷 및 除荷時의 기울기, $v(=1+e)$ 는 比體積, v^p 는 全 塑性 比體積의 變化量, v^s 는 吸引力에 의한 塑性 比體積의 變化量, s_{s_0} 는 降伏吸引力, λ_s 및 κ_s 는 $e - \log s$ 곡선상에서 항복 흡인력 이후의 기울기 및 습윤과정의 기울기를 나타내며 p_a 는 포화시 식의 성립을 위하여 첨가한 값으로 본 연구에서는 대기압을 사용하였다.

4) 構成式的 誘導

삼축상태에서 構成式은 (p, s) 평면에서의 降伏函數를 이용하여 구하며, 吸引力이 없는 상태 즉, 포화토의 경우는 수정 Cam-clay 모델로 접근하도록 하였다.

三軸應力狀態의 構成式을 유도하기 위하여 다음과 같은 變數, 즉 剪斷應力 $q(=\sigma_1 - \sigma_m)$ 와 변형률 상태를 나타내는 體積變形率 $\epsilon_v(=\epsilon_1 + 2\epsilon_m)$ 및 剪斷刑率 $\epsilon_s(=2/3(\epsilon_1 - \epsilon_m))$ 을 도입한다. 여기서, 하첨자 1은 축방향, m은 축방향의 값을 의미한다.

본 연구에서는 吸引力의 變化에 따른 強度變化를 나타내기 위하여 限界狀態에서 吸引力을 고려하였으며 不飽和土의 舉動에 關聯 流動則을 적용하여 三軸狀態의 構成式을 誘導하였다.

(p, q) 평면 및 (p, s) 평면상에서 항복곡적을 나타내면 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 (p, q) 평면에서 항복곡적을 나타낸다. 그림에서 CSL 및 CSL*은 飽和 및 不飽和 時의 限界狀態線을 의미하며, 이 때의 기울기가 각각 M 및 M_0, q

축의 절편이 k 이다. 그림에서 吸引力의 增加는 接着力의 增加뿐만 아니라 限界狀態의 기울기의 增加($M_0 > M$)를 의미하며, 이는 곧 強度의 增加를 의미한다. 이러한 粘着力의 增加는 (p, q) 평면에서 q 축상에 절편을 가지는 것을 의미한다.⁽¹⁾ 그림 4(b)는 LC 및 SI 降伏函數를 조합하여 (p, s) 평면에서 항복곡적을 나타내는데, $p^*_{s_0}$ 및 p_{s_0} 는 降伏應力, s_{s_0} 는 最大吸引力을 의미한다.

이 두 降伏函數를 조합하여 (p, q, s) 의 三次元 空間에 降伏曲面을 나타내면 그림 5와 같으며, 이 때 曲面으로 둘러싸인 부분이 彈性領域이 된다.

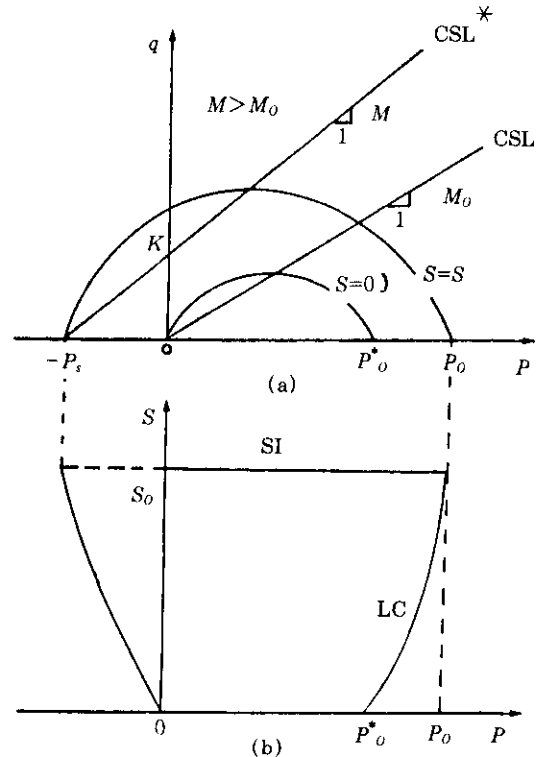


그림 4. (p, q) 및 (p, s) 평면상의 항복곡적
(a) (p, q) 평면상의 항복곡적
(b) (p, s) 평면상의 LC 및 SI 항복곡선

그림 4에서 흡인력 s 가 일정한 경우, (p, q) 평면에서 降伏函數를 구하면 다음과 같다.

$$f = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (6)$$

여기서, M 은 (p, q) 평면에서 흡인력이 존재하는 경우의 한계상태선 기울기, p_s 는 p 축상의 절편을 나타내며, 이는 ϕ 및 c 로부터 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

關聯流動則이 성립하는 것으로 가정하면 소성포텐셜은 降伏函數群과 같은 형태를 취하게 되므로 다음과 같다.

$$g = f = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (7)$$

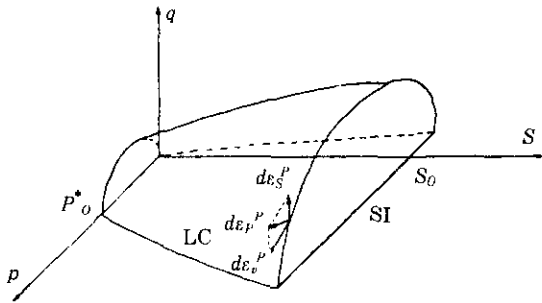


그림 5. (p, q, s) 공간상에서의 항복곡면

塑性變形率은 현재의 應力狀態에서 소성포텐셜에 鉛直方向으로 증가하므로 전단과정에 나타나는 體積變形率의 增分($=d\epsilon_v^p$) 및 剪斷變形率의 增分($=d\epsilon_s^p$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Λ 는 미지의 비례정수를 의미한다.

$$d\epsilon_v^p = \Lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial p} \quad (8)$$

$$d\epsilon_s^p = \Lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial q} \quad (9)$$

식(6), 식(7), 식(8) 및 식(9)로부터 硬化法則과 限界狀態의 塑性剪斷變形을 이용하여 塑性體積 및 剪斷變形을 구하면 다음과 같다.

$$d\epsilon_s^p = \frac{\lambda(s) - \kappa}{v p_0} \left\{ \frac{M^2(2p - p_0 + p_s)}{M^2(p + p_s)} dp + \frac{2q}{M^2(p + p_s)} dq \right\} \quad (10)$$

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda(s) - \kappa}{v} \frac{2q}{p_0 M^2(p + p_s)(2p - p_0 + p_s)}$$

$$(M^2(2p - p_0 + p_s) \cdot dp + 2q \cdot dq) \quad (11)$$

또한, 彈性變形은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_v^e \\ d\epsilon_s^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{v p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(10), 식(11) 및 식(12)를 결합하여 不飽和土의 剪斷에 따른 應力 및 體積舉動을 예측할 수 있는 構成式을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_s \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \frac{\kappa}{v p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} G \end{bmatrix} + \frac{\lambda(s) - \kappa}{v p_0} \frac{1}{M^2(p + p_s)} \begin{bmatrix} M^2(2p - p_0 + p_s) & 2q \\ 2q & \frac{(2q)^2}{M^2(2p - p_0 + p_s)} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} \quad (13)$$

4. 構成式의 適用

4.1 等方狀態의 體積舉動 豫測

실트질 모래를 사용하여 행한 等方壓縮試驗 結果 및 乾燥-飽和試驗 結果를 정리하면 표 5 및 표 6과 같다. 또한, 이로부터 等方舉動의 豫

표 5 하중의 변화에 따른 토질정수의 변화

suction (kg/cm ²)	$\lambda(s)$	κ	p_0 (kg/cm ²)	remarks
0.0	0.0588	0.0062	0.320	saturated
0.1	0.0499	0.0062	0.651	unsaturated
0.3	0.0436	0.0062	1.019	"
0.5	0.0428	0.0062	1.642	"
0.8	0.0419	0.0062	1.894	"

표 6 흡인력의 변화에 따른 토질정수의 변화

p (kg/cm ²)	soil properties		
	λ_s	κ_s	s_0 (kg/cm ²)
0.1	0.021247	0.003289	0.381940
0.6	0.021247	0.003287	0.381857
1.1	0.021247	0.003289	0.381940
1.6	0.021247	0.003287	0.381940
mean	0.021247	0.003288	0.381900

표 7 체적저동 예측에 사용된 토질정수

soil type	$\lambda(0)$	κ	$p_c(\text{kg/cm}^2)$	$p^*_c(\text{kg/cm}^2)$	λ_s	κ_s	$s_o(\text{kg/cm}^2)$
SM-SC	0.0588	0.00623	0.01	0.32	0.021247	0.003288	0.3819

測에 사용된 土質定數를 정리하면 표 7과 같다.

1) 吸引力的 減少 및 荷重의 增加에 따른 體積의 豫測

不飽和 狀態에 있는 시료가 吸引力이 감소하고 하중이 증가하여 최종도달하는 응력의 상태가 같을 때, 應力經路가 서로 다른 경우에 발생하는 體積變動을 예측하여 실험결과와 비교하였다.

그림 6(a)는 (p, s) 평면상에서 점 a에서 출발하여 吸引力의 크기 또는 하중의 크기가 다른 상태를 거쳐 점 f에 도달하는 동안의 應力經路를 나타내고 있다. 應力經路 A는 점 a→e→f에 이르는 경로로 불포화시료가 포화→재하의 과정을 거치며, 經路 B는 a→c→h→d→f의 습윤→재하→포화과정을 나타낸다. 經路 C는 a→b→f의 경로이며 이는 재하후 포화과정을 최종 f점에 도달하게 된다. 여기서,

o-i-j-k로 이루어진 부분은 초기의 彈性領域을 표시한다. 표 8은 응력경로별 각 점의 純平均應力 및 吸引力의 상태를 나타낸 것이다.

그림 6(b)는 각각의 應力經路에서 발생하는 比體積의 變化양상을 構成式에 의하여 계산된 결과와 시험결과를 비교한 것이다.

그림에서 각 應力經路를 통한 응력상태가 彈性領域 내에 있을 때에는(점 i, 점 h, 점 g) 體積變化가 거의 발생하지 않으며 LC 및 SI 降伏曲線의 변화도 없다. 그러나 塑性領域에 접어들면서 체적은 급격하게 변하게 되며 이 때 발생하는 塑性體積變化에 의해 LC降伏曲線은 LC_i, LC_h, LC_g 로 변하게 되지만 SI 降伏曲線은 변하지 않는다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이 不飽和 狀態에 있는 시료가 載荷-濕潤狀態를 거쳐 포화상태의 임의의 應力點에 도달하는 과정에서 나타나는 체적의 변화는 應力經路에 무관하게 거의 일정한 체적의 변화가 발생함을 알 수 있다.

표 8 재하 및 습윤과정에 따른 응력경로 및 응력상태

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	2.1	0.1	0.1	2.1	2.1	0.1	2.1	2.1
s(kg/cm ²⁰)	0.3	0.0	0.0	0.3	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.0

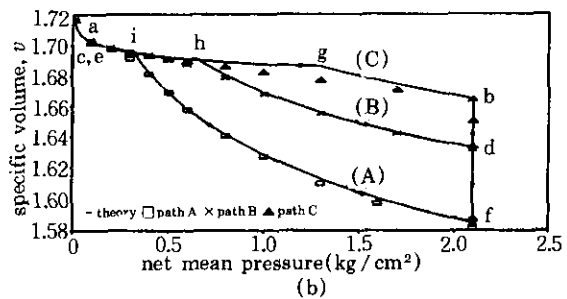
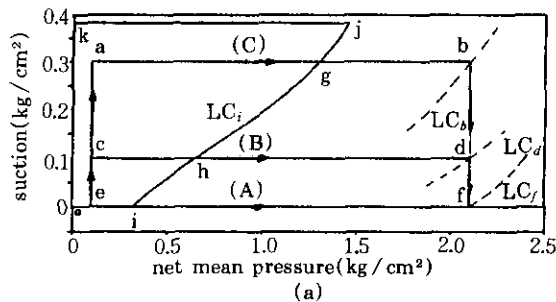


그림 6. 습윤 및 재하과정에 따른 비체적 거동의 비교
(a) 응력 경로 (b) 순평균응력의 변화에 따른 비체적 거동

2) 吸引力的 增加에 따른 體積의 豫測

吸引力的 增加(乾燥過程)에 따른 체적의 변화를 검토하기 위하여 그림 7(a)와 같은 應力 經路를 채택하여 實驗結果와 構成式에 의한 豫測結果를 비교한 것을 그림 7(b)에 도시하였다.

포화 상태(점a)에 있는 시료가 건조-재하의 과정을 거쳐 f점에 이르는 과정으로 應力 經路 A는 a→b→f 경로로 재하후 건조과정을, 應力 經路 B는 a→c→d→f경로로 탄성영역내에서 건조-재하-건조과정을, 應力 經路 C는 a→e→f의 건조-재하과정을 거쳐 점f 상태에 도달하게 된다. 표 9는 각각의 경로에 대한 각 점에서의 純平均應力 및 吸引力的 상태를 나타낸다.

경로 A는 포화상태에서 재하과정을 나타내는데, a→g의 경로는 탄성영역내의 재하과정에 따라 체적이 변하게되며, g→b의 과정은 소성영역내의 재하과정으로 그림에서 보는 바와 같이 급격한 체적의 변화를 보이게 된다. 동시에 이 때 발생하는 소성체적 변화에 의해 LC 항복곡선은 LC₀로 변하게 되고 SI 항복곡선의 변화는 없다. 따라서, 그림에 나타나 있는 것처럼 b→d→i 까지는 탄성영역에서의 건조과정이므로 아주 작은 체적변화를 보이며, i→f 과정은 소성영역에서의 건조과정이므로 앞의 과정보다는 비교적 많은 체적변화를 보이면서 변하게 되며 이 때 발생하는 소성체적변화에 의해 항복곡선은 LC_{1A} 및 SI₁로 변하여 탄성영역이 확대되는 것이다. 경로 B는 탄성영역내에서 건조-재하의 과정을 거쳐 점 h에 도달하는 동안 발생하는 체적변화는 거의 미소하며 h→d

에 이르는 소성체적변화에 의해 LC₀로 항복곡선이 바뀌게 된다. d→f에 이르는 과정은 앞의 경로 A와 같은 과정의 변화이다. 그러나, 그림에서 알 수 있듯이 포화상태(경로 A)에서의 재하 과정에서 나타나는 체적변화보다 훨씬 작은 것을 알 수 있는데, 이는 불포화토의 하중에 의한 체적변화는 포화시료보다 작게 변하는 것을 의미한다. 경로 C는 조 후 재하하는 과정으로 a→j까지는 탄성영역, j→e까지는 소성영역에서의 건조에 따른 체적변화를 나타내는데 j→e에 이르는 과정에서 발생한 소성체적변화에 의해서 항복곡선은 LC₀ 및 SI₁로 변하게 되어 탄성영역이 확대되어 e→m에 이르는 과정은 탄성영역에서의 재하과정이 되며 m→f에 이르는 과정만 소성영역에서의 재하과정이 되는 것이다. 따라서 그림에서 보는 바와 같은 체적변화를 나타내게 된다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 시료가 건조하는 과정에서 나타나는 체적거동은 앞서 언급한 포화과정에서 나타나는 체적의 거동과는 달리 응력경로에 따라 달라지는 것을 알 수 있다.

이상의 豫測結果와 實驗結果의 比較를 통하여, 유도된 構成式은 不飽和土에서 吸引力이 증가하거나 감소하는 경우, 應力이 증가 또는 감소하는 경우에 발생하는 體積變化를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고, 각 荷重의 段階에 따른 변화 및 乾燥-飽和 反復過程에서의 변화도 잘 豫測하는 것으로 나타났다.

4.2 剪斷過程에 따른 軸差應力 및 體積變化의 豫測

剪斷過程의 舉動豫測을 검증하기 위하여, 三

표 9 재하 및 건조과정에 따른 응력경로 및 응력상태

paths	path A			path B				path C		
	a	b	f	a	c	d	f	a	e	f
p(kg/cm ²)	0.1	2.1	2.1	0.1	0.1	2.1	2.1	0.1	0.1	2.1
s(kg/cm ²)	0.0	0.0	0.8	0.0	0.3	0.3	0.8	0.3	0.8	0.8

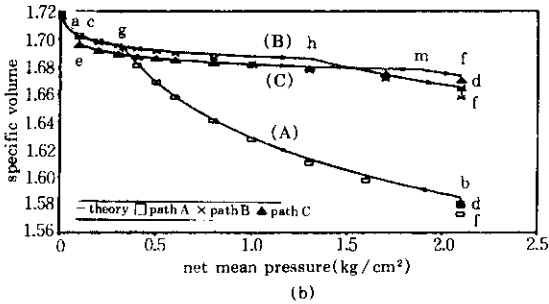
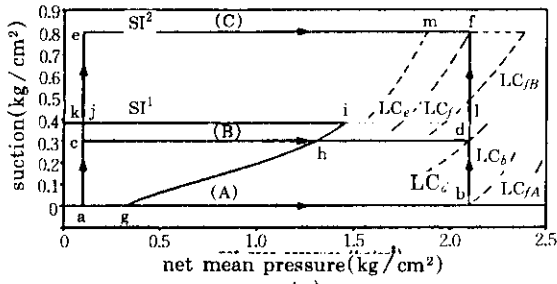


그림 7. 건조 및 재하과정에 따른 비체적 거동의 비교
(a) 응력 경로
(b) 순평균응력의 변화에 따른 비체적 거동

軸壓縮試驗의 결과를 바탕으로 도출한 土質定數를 이용하여 예측한 결과와 실측한 응력 및 체적변화를 비교하였다.

표 10은 豫測에 사용된 각 土質定數이다.

표 10 전단과정의 예측에 사용된 토질정수

suction (kg/cm ²)	soil parameters			
	M	ρ_s (kg/cm ²)	k(kg/cm ²)	G(kg/cm ²)
0.0	1.25	0.00	0.00	63.45
0.1	1.27	0.29	0.36	92.92
0.3	1.30	0.38	0.49	100.30
0.5	1.33	0.57	0.76	102.97
0.8	1.34	0.60	0.81	105.99

그림 8은 飽和試料($s=0.0 \text{ kg/cm}^2$)일 때, 그림 9는 不飽和試料($s=0.1 \text{ kg/cm}^2$)인 경우 剪斷變形에 따른 軸差應力과 體積變形率을 實驗結果와 豫測結果를 비교한 것이다. 그림(a)는 각각의 純平均應力(p)에 대하여 軸變形率(axial strain)에 따른 軸差應力(deviator stress)을 비교한 것이고, 그림(b)는 軸變形率

에 따른 體積變形率(volumetric strain)을 비교한 것이다. 그림에서 軸差應力은 豫測結果와 實驗結果가 잘 일치하고 있다. 그러나, 體積變形率은 차이를 보이고 있는데 이는 構成式의 유도과정에서 主眼點을 吸引力의 변화에 따른 體積變化에 두고 포화시의 境界條件으로 택한 수정 Cam-clay 모델이 다이러턴시 현상을 나타내지 못하기 때문으로 생각된다. 그러나 이러한 차이에도 불구하고 飽和時와 不飽和時의 體積變化 傾向은 잘 나타나고 있다.

이상의 剪斷過程에 따른 豫測結果와 실험 결과의 비교에서 軸差應力은 잘 일치하고 있으나 체적의 변화는 차이를 보이고 있다. 그러나, 이러한 차이에도 불구하고 본 構成式에 의한 豫測結果는 飽和狀態와 不飽和狀態의 體積變化 傾向을 잘 나타내고 있으므로 土質常數의 보정이나 다이러턴시에 대한 부분을 추가하면 不飽和土의 剪斷에 따른 舉動豫測에 正確性을 기할 수 있을 것으로 판단된다.

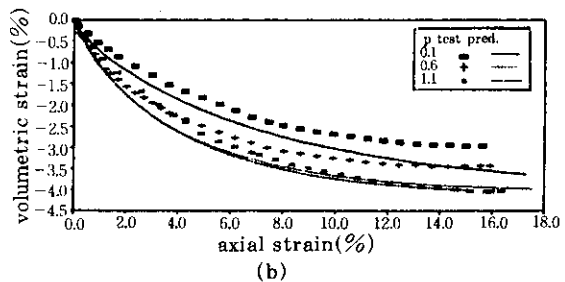
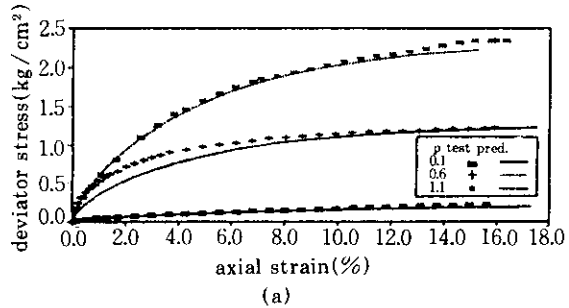


그림 8. 포화시료에 대한 전단거동의 비교
($s=0.0 \text{ kg/cm}^2$)
(a) 축차응력
(b) 체적변형률

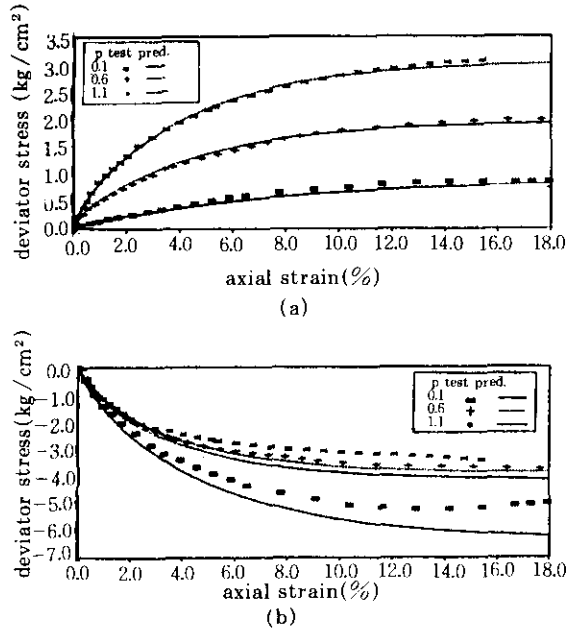


그림 9. 불포화시료에 대한 전단거동의 비교
($s=0.01\text{g/cm}^2$)
(a) 축차응력
(b) 체적변형률

5. 요약 및 결론

불포화토의舉動을豫測하기 위하여純平均應力과吸引力을 고려하여構成式을 유도하였으며, 等方壓縮試驗과 三軸壓縮試驗을 행한 결과를 이용하여 이의 타당성을檢證하였다. 불포화토의舉動을 分析하고, 유도된構成式을 적용한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 構成式의誘導過程에서가정한硬化函數는 실험의결과와 잘 일치하므로,純平均應力과吸引力에 의한 불포화토의舉動을 예측하는硬化函數로 사용될 수 있음이 입증되었다.
- 2) 純平均應力과吸引力을應力成分으로 하고, 수정 Cam-Clay 모델을 경계조건으로 하는 불포화토의舉動을 예측할 수 있는構成式을 유도하였다.
- 3) 불포화에서飽和狀態에 이르는 과정의 等方體積의 변화는應力經路에 무관한 반면

飽和狀態에서 불포화狀態에 이르는 과정은 應力經路에 의존하는 경향을 보였다.

- 4) 構成式을 적용한 결과, 等方狀態에서吸引力의變化 및 純平均應力の 변화에 따른豫測結果는實驗結果와 일치하였다.
- 5) 三軸狀態에서軸差應力은構成式에 의한豫測結果와實驗結果와 잘一致하였으나,體積變化는差異를 보이는데 이는 유도된構成式이 다이라턴시現象을 나타내지 못하기 때문으로 판단되었다.
- 6) 개발된構成式은 불포화토의 특징적인舉動을 잘 나타내고 있으므로, 앞으로 다이라턴시效果를 보완하면 불포화토의體積舉動을 보다 정확하게 나타낼 수 있을 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. 宋昌燮(1994), “不飽和土의 舉動豫測을 위한 構成式 開發”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
2. 宋昌燮·張秉郁(1994), “不飽和土의 舉動豫測을 위한 構成式 開發(I)-不飽和土의 舉動特性 研究-”, 한국농공학회지 제36권 제4호, pp.87~94.
3. Alonso, E.E., Gens, A. & Josa, A.(1990). “A Constitutive Model for Partially Saturated Soils.” Geotechnique, Vol.40 No.3, pp.405~430.
4. Barden, L.(1965), “Consolidation of Compacted and Unsaturated Clays.” Geotechnique, Vol.15, No.3, pp.267~286.
5. Cronley, D.(1952), “The Movement and Distribution of Water in Soils.” Geotechnique, Vol.3 No.1 pp.1~16.
6. Day, R.W.(1989), “Relative Compaction of Fill having Oversize Particles.” J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.115, No.10, pp.1487~1491.
7. Fredlund, D.G.(1979), “Second Canadian Geotechnical Colloquium : Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils.” Can. Geotech. J., Vol.16, No.1, pp.121~139.
8. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R.(1977), “Stress Variables for Unsaturated Soils.” J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.103, No.

- GT5, pp.447~466.
9. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. & Widger, D.A.(1978). "The Shear Strength of Unsaturated Soils." *Can. Geotech. J.*, Vol.15, No.2, pp.261~276.
 10. Gens, A., Alonso, E.E. & Josa, A.(1989), "Elastoplastic Modeling of Partially Saturated Soils." *Numerical Models in Geomechanics Numog III*, Elsevier Applied Science, pp.163~170.
 11. 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.
 12. Horta, J.C.(1985), "Salt Heaving in the Sahara." *Geotechnique*, Vol.35, No.3, pp.329~337.
 13. Krahn, J., Fredlund, D.G. & Klassen, M.J. (1989), "Effect of Soil Suction on Slope Stability at Notch Hill." *Can. Geotech. J.*, Vol.26, No.2, pp.269~278.
 14. Seed, H. B., Mitchell, J.K. & Chan, C.K. (1960), "The Strength of Compacted Cohesive Soils.", *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, Vol.2, Colorado, pp.877~964.
 15. Wheeler, S.J.(1988), "A Conceptual Model for Soils Containing Large Gas Bubbles." *Geotechnique*, Vol.38, No.3, pp.389~397.
 16. Williams, D.J. & Li, H.Y.(1993), "Effects of Solute Suction on Behaviour of Swelling Clays." *Proceeding of the 9th Asian Regional Conference(9ARC) on the Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Vol.2, No. 17, pp.191~194.

(접수일자 1995. 2. 14)