

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—

Development of Constitutive Model for the Prediction of Behaviour of Unsaturated Soil(I)

—Study of Characteristics of Unsaturated Soil—

宋 昌 變* · 張 秉 郁**
Song, Chang Seob · Chang, Pyoung Wuck

Summary

The aim of the work described in this paper is to study a characteristics of an unsaturated soil for the different matric suctions. To this end, a series of suction controlled isotropic and triaxial compression tests is conducted on silty sands.

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 using a half of Proctor compaction energy and with the water contents of 5% drier than the optimum moisture contents. Isotropic compression and triaxial compression tests are conducted on the specimen at each equilibrium state of matric suction.

From test results, volume changes and deviator stresses are analyzed at each state and their relationships are formulated.

I. 緒 論

흙을 구성하는 3상에서 土粒子를 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

* 서울大學校 農業開發研究所

** 서울大學校 農業生命科學大學

키워드 : unsaturated soil, matric suction, axis translation technique, high air entry ceramic disk

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 인공적으로 다져진 地盤을 解析의 대상으로 삼고 있다.⁶⁾

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 濃度差에 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 吸水引보다 작은 값을 나타낸다고 보고되어 있다.^{10, 13)}

그동안 膨脹性 흙이나 崩壞性 흙에 대한 被害事例가 보고되었으나⁸⁾ 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.^{3, 8, 10, 11, 13)}

본 研究의 目的은 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 연구하는 것이다.

II. 材料 및 試驗方法

1. 材料

시험에 사용된 흙은 盛土材로 많이 사용되고 있는 沖積 실트질 모래를 선정하였다. 試

料의 物理的 性質은 Table-1에 나타나 있다.

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. |
|----------------|--------|--------|----|------------|---|----------|
| 2.68 | 37 | 26 | 11 | 18.8 | 1.76 | SM-SC |

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, Ø=35mm)에서 Proctor 표준다짐에너지의 50%로 다져서 만들었다.

3. 試驗方法

吸引力을 조절하면서 等方 및 三軸試驗을 행하였다. 시험은 三軸壓縮試驗機를 개조하여 사용하였으며 공기, 試料의 體積變化 및 含水比의 變化를 측정하기 위하여 별도의 기구를 제작하여 사용하였다. Fig.1은 개조된 三軸壓縮試驗機의 모식도를 보여주고 있다.

吸引力은 Hilf(1956)⁹⁾에 의해 연구된 軸變換技法(axis translation technique)에 의해 再現하였으며, 이 때 空氣通過壓이 약 1.5kg/cm²인 高壓空氣透過板(high air entry ceramic disk)을 사용하였다.

가. 等方壓縮試驗

1) 側壓에 따른 體積變化

吸引力이 일정한 경우, 荷重의 增加 또는 減少에 따른 체적의 變化를 검토하기 위한 것으로, 吸引力을 일정한 값으로 유지하면서 純平均應力이 증가 또는 감소할 때 體積變化를 측정하였다. 試料의 초기상태와 하중의 범위는 Table-2와 같다.

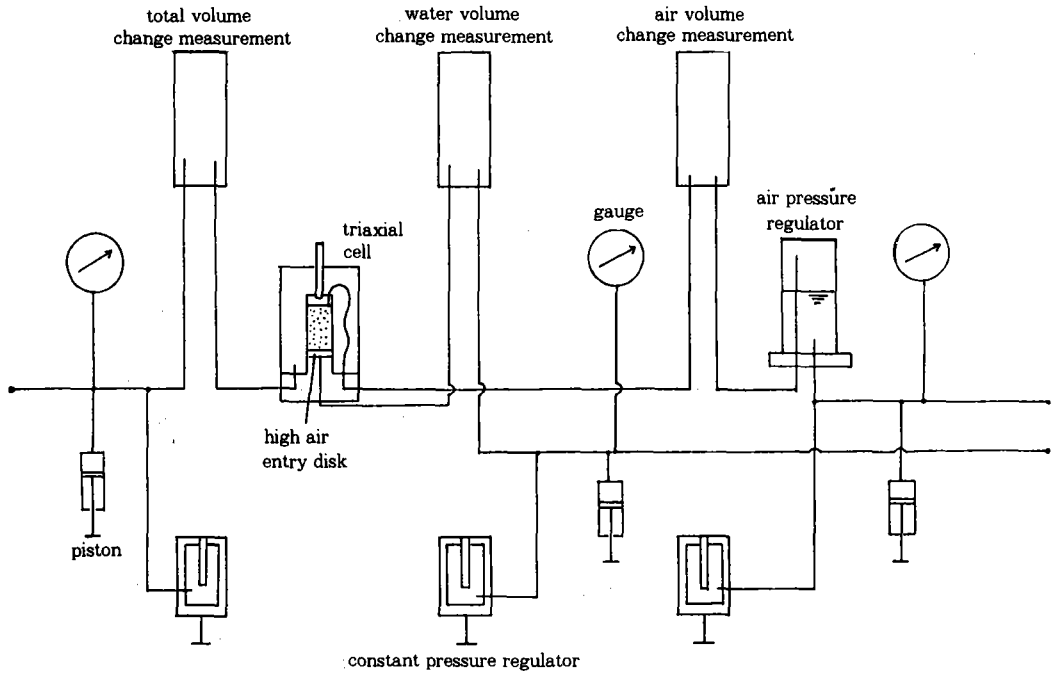


Fig. 1. Schematic diagram of modified triaxial compression apparatus

Table-2. Initial conditions of isotropic compression test.

| 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 | " |

2) 吸引力에 따른 體積의 變化
應力이 일정할 때, 吸引力에 따른 體積變化

Table-3. Initial conditions of suction compression test

| 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 | " |

를 시험하기 위한 것으로 試料의 乾燥-飽和過程에서 발생하는 體積의 變化를 검토하고, 각각의 純平均應力에 대한 體積變化率 體積變化率이 바뀌는 점을 검토하였다.

나. 剪斷試驗

不飽和土의 剪斷強度를 검토하기 위하여 純平均應力과 吸入力을 조절하면서 排水三軸試驗을 행하였으며, 그 때의 軸差應力과 體積變化를 측정하였다.

Table-4. Initial conditions of triaxial compression tests

| suction (kg/cm ²) | net mean pressure (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 | " |

III. 結果 및 考察

1. 不飽和土의 體積變化

가. 吸引力과 飽和度와의 關係

평형상태의 吸引力과 含水比의 關係를 純平均應力의 크기에 따라 도시하면 Fig. 2와 같다. 대체적으로 각 경우 純平均應力의 변화에 따라 모두 유사한 경향을 보여주고 있으나, 吸引力이 0.1~0.3kg/cm²인 범위에서는 吸引力에 따른 含水比의 변화가 크게 나타나고 급경사를 이루며, 吸引力이 0~0.3kg/cm²인 범위에서 純平均應力이 클수록 吸引力에 따른 含水比 變化率이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 포화시의 含水比는 純平均應力이 작을 수록 크게 나타났다.

이러한 구조적인 문제로 인하여 含水比와 吸引力 사이의 일정한 關係를 도출하기 어려우므로 이 문제를 해결하기 위하여 空隙比 項이 첨가된 飽和度와 吸引力의 關係를 도시하면 Fig. 3과 같은 곡선으로 나타났다.

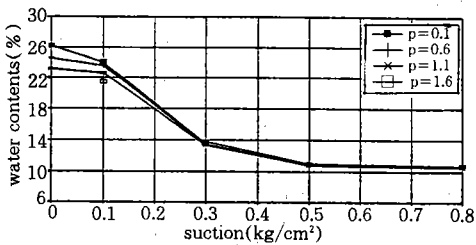


Fig. 2. Matrix suction versus water contents curves

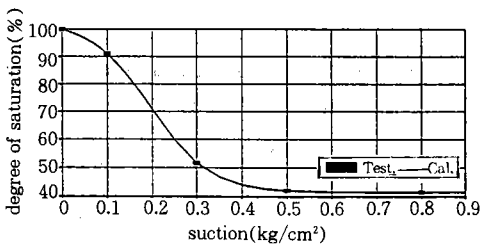


Fig. 3. Matrix suction versus degree of saturation curve

그림에서 보는 바와 같이 飽和度와 吸引力 사이의 일정한 關係를 구할 수 있으며 이를

식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Sr(\%) = n - m \cdot \tanh(a \cdot s - b) \dots\dots (1)$$

여기서, n , m , a , b 는 土質常數이며 s 는 吸引力을 나타낸다. Alonso 등(1990)¹⁾은 식 (1)에서 $n=1$ 의 값으로 가정한 바 있다. 그러나 이들 식에 의하면 飽和狀態에서 不飽和狀態로 변하는 시점에서 飽和도가 큰 차이를 보이는 단점이 있으나 식 (1)에 의하면 이러한 初期部分을 잘 보완할 수 있는 長點을 가지고 있다. 본 연구에서 사용한 실험실 모래의 시험결과를 식 (1)에 대입하여 각 상수를 구하면 Table-5와 같다.

Table-5. Soil properties of sample tested.

| soil type | n | soil properties | | b |
|-----------|-------|-----------------|------|-------|
| | | m | a | |
| SM-SC | 0.723 | 0.309 | 7.50 | 1.455 |

나. 純平均應力에 따른 體積變化

Fig. 4는 각각의 吸引力에 대한 純平均應力과 空隙比의 關係를 $e-\ln p$ 평면에 나타낸 것이다. 포화된 시료의 경우는 낮은 純平均應力에서부터 체적이 급격하게 변화게 된다. 이 때 純平均應力에 대한 경사가 변하는 점이 바로 先行壓密應力이며, 포화토의 降伏應力으로 간주할 수 있다. 吸引力이 존재하는 경우는 體積變化率이 바뀌는 점의 純平均應力(不飽和土의 降伏應力)이 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 시료의 吸引力이 커질수록 外部荷重에 저항하는 힘이 커진다는 것을 의미한다.

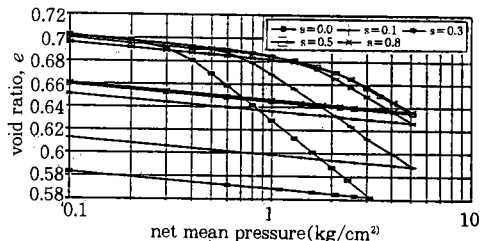


Fig. 4. $e-\ln p$ curves for different soil suctions

또한, 純平均應力이 감소하는 경우에는 체적이 증가하게 되는데, 이 때의 기울기는 포화시에 발생하는 先行壓力密應力까지의 기울기와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

Fig. 4의 $e-\ln p$ 평면에서 載荷時의 기울기를 $\lambda(s)$, 除荷時의 기울기를 κ , 기울기가 변하는 點의 應力(降伏應力)을 p_0 라 하여 구하면 Table-6과 같다.

Table-6. Slopes of loading and unloading and yield pressures

| suction (kg/cm ²) | $\lambda(s)$ | κ | p_0 (kg/cm ²) | remarks |
|-------------------------------|--------------|----------|-----------------------------|-------------|
| 0.1 | 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 | " |

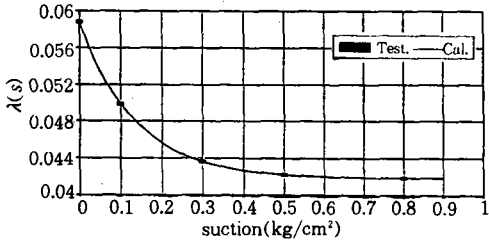


Fig. 5. Loading slopes versus suctions

Fig. 5에서 體積變化의 기울기($\lambda(s)$)는 吸引力에 따라 변하게 되는데, 이들의 관계는 식 (2)와 같으며, Table-6의 결과를 이용하여 각 상수를 구하면 Table-7과 같다.

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r) \exp(-\beta s) + r] \quad \dots (2)$$

여기서 $\lambda(s)$ 는 吸引力이 s 일 때의 기울기, $\lambda(0)$ 는 포화상태의 기울기, r 은 포화상태와 건조시의 기울기의 비, β 는 기울기의 變化率을 의미한다.

Table-7. Properties of Soil employed in tests

| soil type | γ | β | $\lambda(0)$ |
|-----------|----------|---------|--------------|
| SM-SC | 0.7115 | 7.49 | 0.05880 |

다. 吸引力에 의한 體積變化

吸引力的 變化에 따른 比體積과 吸引力의 관계를 도시하면 Fig. 6과 같다. 시험초기의 比體積은 純平均應力의 영향으로 다르게 나타나고 있으나 각각의 純平均應力 狀態에서 吸引力이 증가하면 동일한 體積變化를 일으키며 체적의 變化率이 바뀌는 點(最大吸引力, s_0)도 같게 나타나고 있다. 또한 이들의 관계는 기울기가 변하는 점을 중심으로 代數函數 형태로 나타낼 수 있다. 이러한 사실은 純平均應力이 증가하여 體積變化를 일으켜도 내부의 最大吸引力은 변하지 않는다는 것을 의미한다.

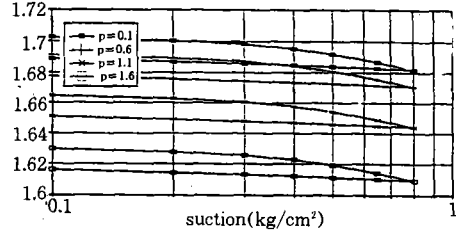


Fig. 6. Specific volume change versus suction

吸引力的의 증가 및 감소에 따른 比體積을 구하기 위하여 點 이후의 $e-\ln s$ 평면 상의 기울기를 λ_s , 點 이전의 기울기를 κ_s , 기울기가 변하는 點의 吸引力을 s_0 라 하여 정리하면 Table-8과 같다.

Table-8. Soil properties for change of suction

| 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 |

2. 三軸壓縮試驗

가. 吸引力에 따른 軸差應力의 變化
剪斷試驗의 結果를 정리하면 Table-9와 같

Table-9. Results of triaxial compression test for silty sand.

| suction (kg/cm ²) | net conf. pressure (kg/cm ²) | max. dev. stress (kg/cm ²) | max. vol. strain (%) | cohesion (kg/cm ²) | fric. angle (deg.) |
|----------------------------------|---|---|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 0.0 | 0.1 | 0.21 | 2.97 | 0.00 | 31.0 |
| | 0.6 | 0.28 | 3.45 | | |
| | 1.1 | 2.34 | 4.05 | | |
| 0.1 | 0.1 | 0.85 | 5.23 | 0.18 | 31.6 |
| | 0.6 | 1.95 | 3.70 | | |
| | 1.1 | 3.05 | 3.42 | | |
| 0.3 | 0.1 | 1.10 | 5.01 | 0.24 | 32.3 |
| | 0.6 | 2.25 | 3.45 | | |
| | 1.1 | 3.40 | 3.42 | | |
| 0.5 | 0.1 | 1.60 | 5.55 | 0.37 | 33.1 |
| | 0.6 | 2.80 | 3.87 | | |
| | 1.1 | 4.00 | 3.72 | | |
| 0.8 | 0.1 | 1.70 | 3.55 | 0.39 | 33.2 |
| | 0.6 | 2.91 | 3.74 | | |
| | 1.1 | 4.12 | 3.42 | | |

으며, 이로부터 軸差應力을 純側壓 및 吸引力에 대하여 도시하면 Fig. 7와 Fig. 8과 같다.

軸差應力은 純側壓이 증가함에 따라 직선적으로 증가함을 알 수 있는데 이는 排水三軸試驗 結果에서 나타나는 일반적인 경향으로 Krahn 등(1989)¹¹⁾의 실험결과에서도 볼 수 있다.

또한, 軸差應力은 吸引力이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 한편, Fredlund 등(1978)⁵⁾는 直接剪斷試驗의 결과로부터 선형적인 剪斷強度式을 주장한 바 있지만 위의 시험결과를 보면 軸差應力은 吸引力에 따라 線形的으로 증가하는 것이 아니라 非線形的으로 증가함을 알 수 있다. 이러한

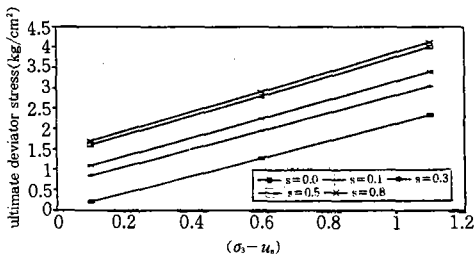


Fig. 7. Ultimate deviator stress of compacted silty sand with net confining stress.

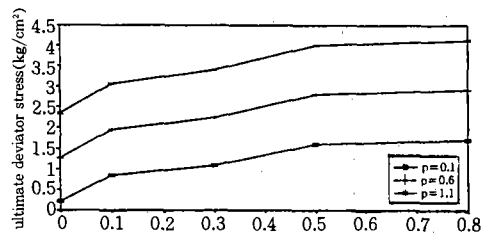


Fig. 8. Ultimate deviator stress of compacted silty sand with suction.

경향은 Escario & Saez(1986)⁴⁾의 直接剪斷試驗의 結果에서도 나타났다.

나. 吸引力에 따른 粘着力(c) 및 內部摩擦角(φ)의 變化

Table-9의 粘着力 및 內部摩擦角을 吸引力에 따라 도시하면 각각 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 吸引力이 0.0~0.8kg/cm²의 범위에 있을 때, 粘着力은 0.0~0.39kg/cm², 摩擦角은 31°~33.2°로 吸引力이 증가할 수록 점점 커지는 경향을 보인다. 이러한 사실은 포화상태에 있던 흙이 건조과정에 의하여 吸引力이 달라지면 粘着力을 가지게 되어 強度가 증가한다는 것을 의미한다. 또한, 吸引力이 증가하면 물을 중심으로 토립자가 결합하여 粒團構造를

이루며 이러한 粒團構造는 조립토처럼 거동하게 되어 마찰각도 증가되는 것으로 생각된다. 이러한 결과는 해성점토에 대한 Wheeler (1989)¹²⁾ 의 연구결과와 Notch Hill 실트에 대한 Krahn 등(1989)¹¹⁾ 의 연구에서도 비슷한 경향을 보이고 있다.

따라서, 粘着力이나 摩擦角을 토질공학적인 문제를 해결하기 위한 土質常數로 사용할 경우에는 吸引力에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 판단되는데 이러한 사실은 Bishop 등(1960)¹⁵⁾ 의 사면안정에 대한 吸引力의 영향에 대한 연구, fredlund 등(1993)⁵⁴⁾의 不飽和土의 역할에 대한 연구에서도 언급된 적이 있다.

흡인력에 따른 점착력 및 내부마찰각의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$c = C_r \tanh(C_r s) \dots \dots \dots (3)$$

$$\phi = \phi_o [1 + C_m \tanh(C_r s)] \dots \dots \dots (4)$$

여기서, c 는 粘着力, ϕ 는 摩擦角, s 는 吸引力, ϕ_o 는 포화시의 摩擦角을 나타내고, C_r , C_m 및 C_u 는 土質常數이며, 각 상수를 구하면 Table-10과 같다.

Table-10. Soil properties associated with cohesion and internal friction angle

| soil type | soil properties | | |
|-----------|-----------------|-------|--------|
| | C_r | C_m | C_u |
| SM-SC | 0.40 | 2.50 | 0.0725 |

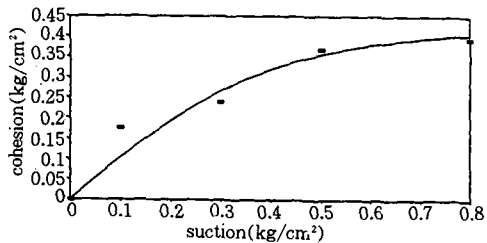


Fig. 9. Relationships between cohesion and suction

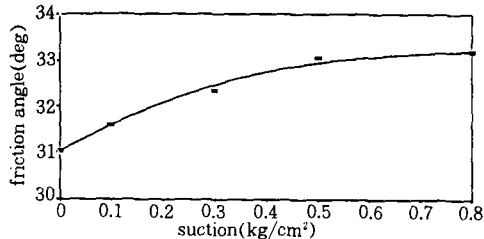


Fig. 10. Relationships between internal friction angle and suction

VI. 結 論

不飽和土의 舉動特性을 연구하기 위하여 실트질 모래를 사용하여 吸引力과 純平均應力을 조절하면서 等方壓縮試驗과 三軸壓縮試驗을 행하여 不飽和(土의 舉動)을 分析한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불포화 상태에 있는 시료가 물을 흡수하여 평형상태에 도달하는 시간은 시료의 초기상태와 순평균응력에 따라 약간의 차이는 있으나 약 24 시간 정도였다.

2. 시료가 포화상태 근처에서는 축압의 크기에 따라 함수비의 분포가 다르지만, 구조적인 특성을 고려한 포화도와 흡인력은 거의 일정한 관계를 보였다.

3. 축압의 증가에 따른 불포화도의 체적변화는 흡인력이 클 수록 변화하는 비율이 적었으며, 축압의 증가에 따른 체적변화와 기울기는 지수함수형태로 나타낼 수 있었다. 또한, 항복을 나타내는 최대응력의 크기는 증가하였다.

4. 흡인력의 변화에 따른 불포화도의 체적변화는 축압의 크기에는 거의 무관하게 유사한 경향을 보였다.

5. 축차응력은 순평균응력의 크기에 따라 거의 직선적으로 증가하는 반면, 흡인력의 크기에 따라서는 비선형적으로 증가하였다.

6. 흡인력이 증가할 수록 점착력과 내부마찰각은 증가하는 것으로 나타났으며 이들의 관계는 일정한 식을 나타낼 수 있었다.

7. 불포화토는 흡인력의 증감에 따라 토질상수의 값이 변하게 되므로 불포화토의 거동을 예측하는 상수를 선정함에 있어서는 반드시 흙의 함수상태를 고려하여 선정하여야 할 것으로 사료되었다.

參 考 文 獻

1. Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa, 1990. A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, 40(3), pp. 405~430.
2. Bishop, A. W. & N. R. Mogenstern, 1960. Stability Coefficients for Earth Slopes. *Geotechnique*, 10(1), pp.129~147.
3. Day, R. W., 1989. Relative Compaction of Fill having Pversize Particles. *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 115(10), pp. 1487~1491.
4. Escario, V. and J. Saez, 1986. The Shear Strength of Partly Saturated Soils. *Geotechnique*, 36(3), pp.453~456.
5. Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern & D. A. Widger, 1978. The Shear Strength of Unsaturated Soils. *Can. Geotech. J.*, 15 (2), pp.261~276.
6. Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern & D. A. Widger, 1979. Second Canadian Geotechnical Colloquium : Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils. *Can. Geotech. J.*, 16(1), pp.121~139.
7. Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern & D. A. Widger, H. Rahardjo, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, John Wiley & Sons Inc.
8. Gromko, G. J., 1974. Review of Expansive Soils. *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 100(GT6), pp.667~687.
9. 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.
10. Horta, J. C., 1985. Salt Heaving in the Sahara. *Geotechnique*, 35(3), pp.329~337.
11. Krahn, J., D. G. Fredlund and M. J. Klassen, 1989. Effect of Soil Suction on Slope Stability at Scotch Hill. *Can. Geotech. J.*, 26(2), pp.269~278.
12. Widger, R. A., 1988. The Undrained Shear Strength of Soils Containing Large Gas Bubbles. *Geotechnique*, 38(3), pp. 399~413.
13. Williams, D. J. and H. Y. Li. 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, 2(17), pp.919~194.
14. 宋昌燮, 1994, 不飽和土의 舉動豫測을 위한 構成式 開發, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.