

初期應力狀態가 모래의 變形에 미치는 影響

Effects of Initial Stress on the Deformation of Sand

姜 秉 熙*
Kang, Byung Hee
鄭 寅 峻**
Chung, In Joon

Abstract

Dry sand specimens for both normally consolidated and overconsolidated triaxial compression tests were prestressed on the path with five different coefficients of earth pressure 1.0, 3/4, 0.55, K_0 and 1/3.

Deformation resistance of normally consolidated sand increased with increasing the initial stress for all coefficients of earth pressure during consolidation, and the deformation modulus at a certain initial stress showed a tendency to increase with increasing the coefficient of earth pressure. And deformation moduli (E_t , E_{30}), were found to be proportional to the n th power of initial stresses $[\sigma_{m0}', \sigma_{10}', \sigma_{30}', (\sigma_1 - \sigma_3)_0]$ for both isotropically and anisotropically normally consolidated samples, where n varied from 0.37 to 0.92. Overconsolidated sand with the higher overconsolidation ratio showed the higher deformation modulus.

It is concluded that the K_0 -anisotropically consolidated triaxial compression test is necessary to obtain the more accurate value of in-situ deformation modulus.

要 旨

乾燥한 모래試料를 土壓係數가 1.0, 3/4, 0.55, K_0 및 1/3인 應力經路를 따라 正規壓密, 또는 過壓密시킨 후 三軸壓縮試驗을 行하였다.

正規壓密試料의 變形抵抗은 壓密時의 土壓係數의 크기에 關係없이 初期應力の 增加에 따라서 增加하였으며 또 어떤 한 初期應力에 대한 變形係數는 土壓係數가 클수록 커지는 傾向을 보였다. 그리고 等方正規壓密 및 異方正規壓密된 試料의 變形係數 (E_t 및 E_{30})는 初期應力 $[\sigma_{m0}', \sigma_{10}', \sigma_{30}', (\sigma_1 - \sigma_3)_0]$ 의 n 乘에 比例하며 이 n 値는 0.37에서 0.92의 범위 내에 있었다.

그리고 過壓密試料에서는 過壓密比가 클수록 變形係數는 크게 되었음을 나타내었다.

結論의으로 좀더 正確한 現位置의 變形係數를 구하기 위해서는 K_0 -異方壓密三軸壓縮試驗을 行하여야 한다.

1. 序 論

砂質土地盤의 變形 및 強度는 一般的으로 標

*正會員 · 仁荷大學校 工科大學, 土木工學科 副教授

**正會員 · 서울大學校 工科大學, 土木工學科 教 授

準三軸壓縮試驗에 의해서 구하고 있으므로 三軸室內의 試料는 等方正規壓密된 初期應力狀態下에서 軸方向載荷를 받으나 現位置에서의 初期應力狀態는 K_0 -異方正規壓密 및 過壓密 應力狀態下에 있으므로 標準三軸壓縮試驗에 의한 試驗結果는 實際로 現位置에서 發生되는 것과 差異가 있을 것으로 추측된다.

모래의 彈性係數는 最大主應力の 函數가 아니고 拘束應力の 函數이다⁽⁶⁾. 그러나 等方性的 拘束이 아니고 實際의 自然堆積地盤과 같이 異方性的 應力狀態에서는 拘束應力の 크기가 이 地盤의 變形係數에 어떤 影響을 끼치는 지는 최근 10여년 전까지도 不確實하였다. 1978년 Lambrechts and Leonards⁽⁵⁾는 應力歷史가 砂質土의 變形에 미치는 影響에 關해서 研究發表한 바 있으나 이들의 研究는 先行應力の 條件이 多樣하지 않고 또한 土壓係數가 砂質土의 變形에 어떤 影響을 끼치는지에 대해서는 전혀 檢討하지 않았다. 그리고 또 Holubec⁽²⁾에 의해서 다른 應力經路에 따른 다른 正規的인 應力歷史를 가진 모래는 同一한 應力狀態下에서 서로 비슷한 彈性係數를 보여 줌으로써 應力經路는 다르나 同一한 應力狀態에 대한 接線變形係數(tangent deformation modulus)는 正規應力歷史에 의해서 별다른 影響을 받지 않음을 알 수 있게 되었다. 그러나 이 研究 또한 應力歷史에 대한 條件이 多樣하지 못하고 重要한 割線變形係數(secant deformation modulus)에 關해서는 言及하지 않았다.

따라서 本 研究에서는 壓密時의 다른 여러가지의 土壓係數와 應力歷史를 가진 初期應力狀態가 모래의 變形特性에 어떠한 影響을 끼치는 지를 알고자 한다.

2. 實 驗

試料는 10 번째를 완전히 通過하고 100 번째에 거의 대부분이 남는 乾燥한 漢江砂로서 有効粒徑 0.33 mm, 均等係數 1.88, 最大間隙比 0.90, 最小間隙比 0.42이며 供試體 試料의 初期間隙比는 모두 0.74 ± 0.005 이고 相對密度는 0.33 으로서 비교적 느슨한 모래이다.

實驗裝置는 0.00048~6.0 mm/min 의 變速範圍

內의 30 가지의 變形速度로서 軸方向載荷가 可能하는 電動裝置와 0~7 kg/cm² 容量의 水銀恒壓裝置 및 레버(lever)식의 異方性 載荷裝置를 갖는 三軸試驗機를 利用하였다.

供試體의 直徑은 50 mm 이며 길이는 123 mm 이고 표 1 및 표 2에서 볼 수 있는 바와 같은 여러가지 종류의 시험을 행하였으며 初期先行應力の 應力經路는 그림 1 및 그림 2에서 보는 바와 같다. 그리고 軸方向載荷에 의한 變形速度는 0.06 mm/min 이며 靜止土壓係數 K_0 値는 Jacky의 關係式으로부터 0.4로 推定되었다.

試驗方法은 正規壓密試驗으로서, 土壓係數 K 値가 1.0인 等方正規壓密試驗인 NI-시험은 標準三軸壓縮試驗과 同一한 方法으로 시험하고 K 値가 3/4, 0.55, K_0 및 1/3인 異方正規壓密試驗인 NA-시험은 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 三軸室液壓에 의해서 拘束應力을 0.15 kg/cm² 까지 加하여 供試體를 安定시킨 후 각 K 値에 대한 應力經路에 따라서 應力을 加한 후 軸方向壓縮載荷시켜서 行하는 시험이다. 그리고 NS-시험은 그림 2에서의 應力經路에 따라 點 I에서 K_0 -線 上의 點 A($\sigma_1' = 0.375$ kg/cm², $\sigma_3' = 0.15$ kg/cm²)까지 올리고 다시 K_0 -線 上을 따라 點 B($\sigma_1' = 1.25$ kg/cm², $\sigma_3' = 0.5$ kg/cm²)까지 應力을 加한 후 計劃된 各 應力經路를 따라서 應力을 加하여 K_0 -線 上의 點 C($\sigma_1' = 1.75$ kg/cm², $\sigma_3' = 0.7$ kg/cm²)까지 도달시켜서 그 應力下에서 壓密을 完了시킨 후 軸方向載荷시킨다.

그리고 過壓密試驗으로서, 等方過壓密試驗인 OI-시험은 K 値가 1.0 이므로 最大橫方向先行壓密應力 $\sigma_{3,max}$ 을 0.5, 0.7 및 1.0 kg/cm² 이 되도록 三軸室液壓을 加하여 壓密시키고 다시 이 液壓을 0.3 kg/cm² 가 되도록 減少시킨 후 軸方向載荷시키고 異方過壓密試驗인 OA-시험은 그림 1에서 K 値가 3/4, 0.55, K_0 및 1/3인 應力經路 上에서 $\sigma_3'_{max}$ 이 0.5, 0.7 및 1.0 kg/cm² 이 되도록 先行應力을 加하여 試料를 壓密시키고 다시 이를 初期應力인 0.3 kg/cm² 이 되도록 減少시킨 후 軸方向載荷시킨다. 그리고 OS-시험은 그림 2에서 應力經路 I-A-B-C를 따라서 K_0 -線 上의 點 C까지 先行應力을 加하여 壓密시키고 여러가지의 다른 應力經路를 따라서 다시 K_0 -線 上의

點 B까지 荷重을 減少시킨 후 軸方向 載荷시킨다.

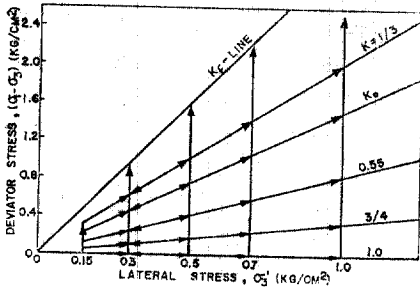


그림 1. Stress Path for NI, NA, OI and OA-Tests

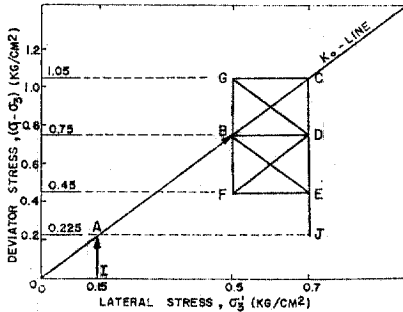


그림 2. Stress Path for NS and OS-Tests

3. 實驗結果 및 考察

3.1 正規壓密試驗(Normally Consolidated Tests)

모래의 變形은 原狀復歸 加能한 變形과 永久 變形으로 나누어 지는데 復歸 加能한 變形은 주로 個個 土粒子 自體의 彈性變形의 疊으로 나타나고 永久變形은 주로 粒子間의 滑動으로 因하여 變位를 이르게 土粒子 配列上의 構造變化를 가져와 原位置로 다시 復歸할 수 없는 塑性變形이다⁽¹⁾. 載荷 및 除荷를 연속적으로 행하였을 때 載荷時에 發生한 變形은 위에서 言及한 彈性 및 塑性變形의 疊이며 除荷時의 變形은 載荷時에 일어났던 變形中의 彈性形變과 같다⁽¹⁾.

따라서 극히 작은 變形度 以內에서는 흙의 變形의 거의 大部分은 彈性變形을 나타내므로 모래의 彈性變形은 應力-變形 曲線의 始點에서의 曲線의 接線傾斜度인 初期接線係數(initial tangent modulus) E_t 로서 나타내나 이것도 純粹한 彈性變形 만은 아니다.

初期接線係數와 함께 많이 利用되는 또 하나의 一般的인 變形數係는 曲線始點과 어떤 하나

의 應力の 크기 즉 尖頭偏差應力の 1/3~1/2에 대한 割線의 傾斜度인 割線係數이다. Young's modulus를 흙에 대해서 이야기할 때는 一般的으로 이 割線係數를 뜻하며⁽⁴⁾ 基礎問題에서 安全係數를 보통 2~3을 취하므로 이 係數를 考慮한 割線係數를 擇하게 된다. 특히 尖頭偏差應力の 1/2에 該當되는 割線變形係數(secant deformation modulus at one-half peak deviator stress) E_{50} 을 주로 利用한다⁽⁴⁾.

표 1에서 모든 試驗에 대한 E_t 및 E_{50} 을 나타내었다. 그리고 그림 3, 6, 7, 8에서는 壓密段階에서 最終적으로 加해준 4가지 형태의 初期應力 즉 初期平均應力 σ_{m0} , 初期橫方向應力 σ_{30}' , 初期軸方向應力 σ_{10}' 및 初期偏差應力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 의 크기와 變形係數 E_t 및 E_{50} 과의 關係를 土壓係數 K 值別로 나타내었다.

그림 3에서 變形係數는 K 值의 크기에 關係없이 σ_{m0}' 의 增加에 따라 모두 增加하고 그 增加率은 一般的으로 K 值가 크면 클수록 더 크다. 그리고 σ_{m0}' 가 零인 경우 係數는 K 值에 關係없이 모두 零이 되므로 이들 關係曲線들은 모두 原點에 모인다. 그리고 또한 어떤 하나의 同一한 σ_{m0} 值에 대한 이들 變形係數들은 一般的으로 모두 K 值가 클수록 커지는 傾向을 보인다. 즉 K 值가 1.0인 경우의 E_{50} 은 $K_0 (=0.4)$ 인 경우보다 모든 初期平均應力 下에서 약 2.0배 정도 더 크다는 사실을 볼 수 있다. 이와같이 拘束應力의 K 值에 따라 變形係數가 다른 理由는 軸方向 載荷時의 供試體의 初期應力狀態와 初期間隙比의 差異에 의해서 說明될 수 있다.

즉 K 值가 1.0인 경우의 拘束應力은 等方性 壓縮應力으로서 土粒子는 이 壓縮應力 下에서 粒子間의 回轉 및 滑動으로 인하여 粒子間의 接觸點에서 接線力이 發生하므로 粒子의 配列은 붕괴되어 體積變形은 크게 일어난다. 그러나 이러한 수많은 接觸點을 연결하는 어느 한 平面上에서는 平均해서 零이 되므로 結局 個個의 接觸點에서는 剪斷應力이 作用하더라도 하나의 平面上에서는 剪斷應力은 作用하지 않는다⁽⁴⁾.

그러나 K 值가 1.0이 아닌 경우에는 拘束應力에 의해서 初期偏差應力이 作用하여 供試體 內의 어떤 한 平面上에는 軸方向 壓縮載荷 以前에

표 1. Normally Consolidated Tests

| Test NO | K | e_s | σ_{50} (kg/cm ²) | σ_{10} (kg/cm ²) | σ_{m0} (kg/cm ²) | $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_1$ (kg/cm ²) | $(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ (kg/cm ²) | $\epsilon_v(10\%)$ (%) | E_{50} (kg/cm ²) | E_t (kg/cm ²) |
|------------------------|----------------|-------|--|--|--|---|---|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| NI-1-0.3 | 1.0 | 0.658 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0 | 1.03 | 7.5 | 115 | 217 |
| NI-1-0.5 | | 0.635 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 1.62 | 7.8 | 154 | 325 |
| NI-1-0.7 | | 0.659 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0 | 2.27 | 7.3 | 220 | 383 |
| NI-1-1.0 | | 0.668 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0 | 3.00 | 7.9 | 291 | 476 |
| NA-3/4-0.3 | 3/4 | 0.689 | 0.3 | 0.40 | 0.33 | 0.10 | 1.06 | 7.5 | 123 | 323 |
| NA-3/4-0.5 | | 0.672 | 0.5 | 0.67 | 0.56 | 0.17 | 1.75 | 7.3 | 173 | 382 |
| NA-3/4-0.7 | | 0.662 | 0.7 | 0.93 | 0.78 | 0.23 | 2.61 | 6.7 | 210 | 444 |
| NA-3/4-1.0 | | — | 1.0 | 1.33 | 1.11 | 0.33 | 3.37 | 7.7 | — | — |
| NA-0.55-0.3 | 0.55 | 0.681 | 0.3 | 0.55 | 0.38 | 0.25 | 1.00 | 7.3 | 88 | 207 |
| NA-0.55-0.5 | | 0.651 | 0.5 | 0.91 | 0.64 | 0.41 | 1.68 | 7.3 | 151 | 313 |
| NA-0.55-0.1 | | 0.648 | 0.7 | 1.27 | 0.89 | 0.57 | 2.28 | 7.7 | 186 | 413 |
| NA-K ₀ -0.3 | K ₀ | 0.705 | 0.3 | 0.75 | 0.45 | 0.45 | 1.10 | 8.0 | 75 | 175 |
| NA-K ₀ -0.5 | | 0.653 | 0.5 | 1.25 | 0.75 | 0.75 | 1.83 | 8.0 | 100 | 223 |
| NA-K ₀ -0.7 | | 0.657 | 0.7 | 1.75 | 1.05 | 1.05 | 2.42 | 7.0 | 168 | 262 |
| NA-K ₀ -1.0 | | — | 1.0 | 2.50 | 1.50 | 1.50 | 3.41 | 7.8 | — | — |
| NA-1/3-0.3 | 1/3 | 0.715 | 0.3 | 0.9 | 0.50 | 0.6 | 1.14 | 5.5 | — | 108 |
| NA-1/3-0.5 | | 0.674 | 0.5 | 1.5 | 0.83 | 1.0 | 1.85 | 6.5 | — | 138 |
| NA-1/3-0.7 | | 0.684 | 0.7 | 2.1 | 1.17 | 1.4 | 2.51 | 5.7 | — | 152 |
| NA-1/3-1.0 | | — | 1.0 | 3.0 | 1.67 | 2.0 | 3.43 | 5.0 | — | — |
| NS-ABC | — | 0.657 | | | | | 2.42 | 7.0 | 168 | 262 |
| NS-ABDC | | 0.693 | | | | | 2.40 | 8.0 | 148 | 208 |
| NS-ABGC | | 0.685 | | | | | 2.39 | 7.3 | 452 | 460 |
| NS-ABEDC | | 0.679 | 0.7 | 1.75 | 1.05 | 1.05 | 2.38 | 7.0 | 165 | 310 |
| NS-ABFEDC | | — | — | | | | 2.34 | 7.5 | — | — |
| NS-ABCDC | | 0.689 | | | | | 2.35 | 8.0 | 208 | 360 |
| NS-ABCEC | | 0.681 | | | | | 2.37 | 8.5 | 177 | 360 |
| NS-ABCJC | | 0.692 | | | | | 2.34 | 6.9 | 168 | 278 |

이미 剪斷應力이 作用하고 있으며 이 剪斷應力의 크기는 同一한 平均拘束應力인 初期平均應力 σ_{m0} 에 대해서 K值가 작을수록 더 크다. 그리고 이때 發生하는 壓縮量도 K值가 클수록 一般的으로 더 크므로 拘束應力을 加하여 壓密이 完了된 直後의 供試體의 間隙比는 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 同一한 初期平均應力에 대해서 K值가 클수록 一般的으로 적다. 따라서 先行應力の K值가 작을수록 供試體의 間隙比는 크기 때문에 變形係數는 적다.

그리고 그림 5에서는 拘束應力을 加한 후의 各 試驗供試體의 初期間隙比와 變形係數와의 關係를 K值 別로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있

는 바와같이 同一한 初期間隙比일찌라도 先行應力の K值가 클수록 變形係數는 一般的으로 큰 傾向을 보인다. 이는 前術한 바와같이 K值가 작을수록 軸方向載荷 以前에 이미 받고 있는 剪斷應力 및 偏差應力은 더 크므로 그 以上の 偏差應力으로 因한 變形에 대한 抵抗能力이 그만큼 부족하게 되므로 偏差應力이 조금만 增加하더라도 比較的 큰 變形이 發生하므로 K值가 작을수록 變形係數는 작게 된다. 다시 말하면 平均拘束應力의 크기가 同一하다 하더라도 拘束應力の K值가 작은 경우 軸方向壓縮應力을 加하기 以前 즉 軸方向變形이 零일때 이미 큰 初期 偏差應力이 作用하고 있으므로 軸方向壓縮載荷

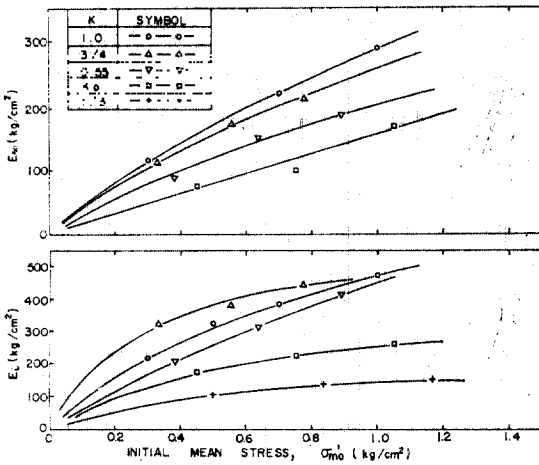


그림 3. Moduli versus Initial Mean Stress

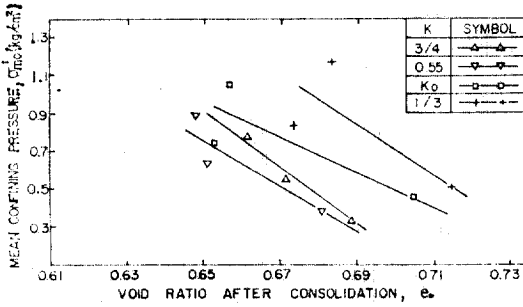


그림 4. Mean Confining Pressure versus Void Ratio after Consolidation

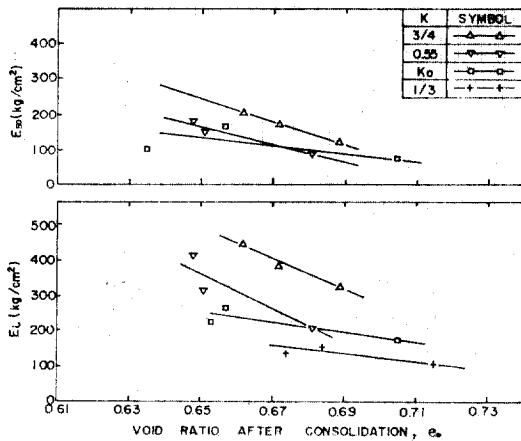


그림 5. Moduli versus Void Ratio after Consolidation

에 의한 偏差應力을 조금만 增加시키더라도 變形은 크게 일어나면서 이 試料의 尖頭偏差應力에 도달하고 만다. 그러나 尖頭偏差應力이 일어나는 變形度 $\epsilon_{a(100)}$ 은 표 1에서와 같이 K值 및

拘束應力의 크기에 의해서 크게 影響을 받지 않고 모든 시험에서 비슷함을 보여주므로 결국 K值가 작은 경우 變形係數는 작게 된다.

以上の關係를 初期平均應力 대신 初期橫方向應力 σ'_{30} 및 初期軸方向應力 σ'_{10} 에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

즉 그림 6 및 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 σ'_{30} 및 σ'_{10} 의 크기가 增加함에 따라 K值의 크기에 關係없이 變形係數는 增加하며 이러한 傾向은 σ'_{30} 의 경우보다 σ'_{10} 의 경우에서 더 뚜렷하고 一定한 初期拘束應力에 대한 K值別 變形係數의 差異도 σ'_{10} 의 경우에서 더 크다. 이는 σ'_{30} 및 σ'_{10} 의 增加에 따라 σ'_{m0} 는 K值의 크기에 關係없이 增加하므로 이들 σ'_{30} 및 σ'_{10} 의 增加에 따라 變形係數는 增加하고 또 K值가 작을

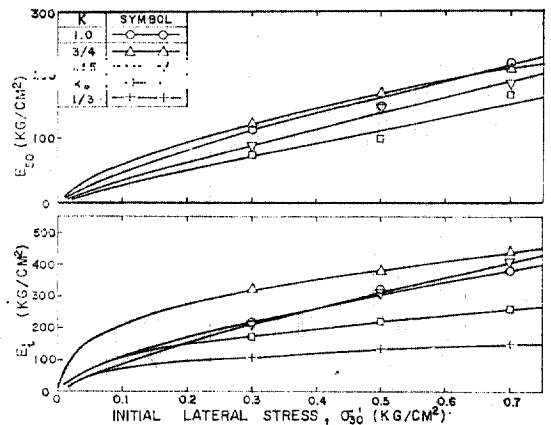


그림 6. Moduli versus Initial Lateral Stress

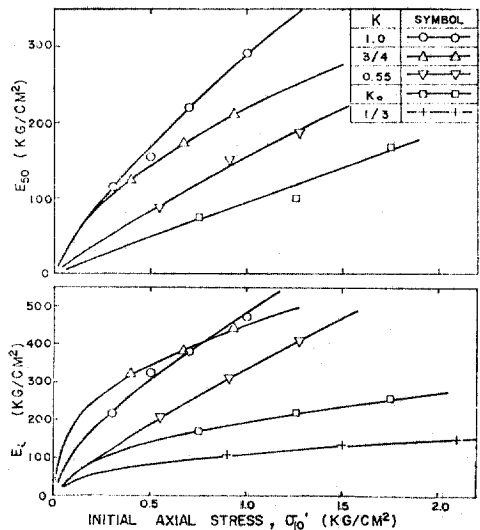


그림 7. Moduli versus Initial Axial Stress

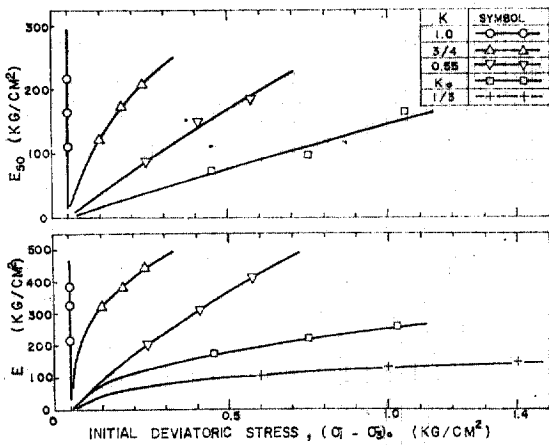


그림 8. Moduli versus Initial Deviatoric Stress

수록 σ_{30}' 의 증가에 따른 σ_{10}' 의 증가는 더 크므로 변형계수에 대한 K 值的影響이 σ_{10}' 의 경우에서 더 크게 되기 때문이다.

그리고 그림 8에서도 初期偏差應力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 와 변형계수와와의關係를 K 值 別로 보여주고 있는데 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 值的 증가에 따라 변형계수는 증가하고 그 증가율은 K 值的 증가에 따라 증가한다.

以上에서 본 바와 같이 변형계수 E_d 는 初期應力 σ_0' [$\sigma_{m0}', \sigma_{10}', \sigma_{30}', (\sigma_1 - \sigma_3)_0$]의 n 乘에 比例하고 이 曲線은 原點을 통과하므로 E_d 와 σ_0' 와의關係는 $E_d = m\sigma_0'^n$ 로 표시되고 n 值是 0.37~0.92 範圍 內에 있다. 이는 Janbu의 關係式⁽³⁾ $E_i = mP_a \left(\frac{\sigma_{30}'}{P_a} \right)^n$ 에서 P_a 가 1.0kg/cm²인 경우와 같다. 그리고 그림 2에서 K_0 -線上的 應力經路上的 點 A와 B를 通過한 후 여러가지의 다른 應力經路를 통하여 K_0 -線上的 點 C에 이르는 試料에 대한 應力-變形 曲線에서 구한 變形계數들은 應力經路의 影響을 거의 받지 않는 것같이 보이나 표 1에서 仔細히 살펴보면 K_0 -線에서 가장 높이가 떨어져 있는 點G($\sigma_1' = 1.55$ kg/cm², $\sigma_3' = 0.5$ kg/cm²)를 지나는 試驗의 變形계數들은 다른 시험에서 보다 뚜렷이 큰 값을 보여준다.

結論的으로 正規壓密應力을 받은 모래는 壓密時의 K 值的 크기에 關係없이 初期應力의 증가에 따라 變形계數는 증가하고 이 증가율은 K 值가 클수록 一般的으로 크다. 그리고 一定한 初期應力에 대한 모든 變形계數의 크기는 K 值的 증가에 따라 증가함도 볼 수 있다. 따라서 K 值

가 1.0인 標準三軸壓縮試驗에 의해서 구한 變形계數는 地盤中의 現位置에서 作用하는 實際의 變形계數보다 훨씬 크다. 특히 現位置의 有效上載應力을 實驗室의 標準三軸壓縮試驗에서의 拘束壓密應力으로 간주해서 구한 E_{50} 은 現位置의 K_0 -狀態에서의 實際值보다 약 3倍 정도 더 크게 測定되고 또 標準三軸壓縮試驗의 拘束壓密應力을 現位置의 平均拘束應力으로 간주해서 구한 變形계數 역시 現位置의 係數보다 훨씬 더 크다. 따라서 等方壓密試驗인 標準三軸壓縮試驗으로부터 구한 變形계數를 利用해서 算出한 砂質土地盤의 沈下量은 實際보다 훨씬 더 적게 된다. 그리고 이 差異는 內部摩擦角이 클수록 더욱더 커지므로 조밀한 모래에서 그 差異는 더 크다.

3.2 過壓密試驗(Overconsolidated Tests)

그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 過壓密比 $(\sigma_3'_{max}/\sigma_3')$ 가 클수록 變形계數 E_i 및 E_{50} 은 모든 土壓係數에서 增加하고 또 土壓係數가 작을수록 그 增加율은 一般的으로 큰 傾向을 띄며 특히 K 值가 比較的 작은 K_0 및 1/3인 경우에서 이러한 傾向이 뚜렷하다. 過壓密比가 1.0인 경우에는 正規壓密試驗인 경우로서 正規壓密試驗에서 이미 說明한 바와 같이 變形계數는 K 值가 작을수록 一般的으로 작다. 그러나 過壓密比에 該當되는 만큼의 先行應力을 받은 試料는 그 先行應力에 의해 이미 모래시료의 組織(fabric)이 先行應力과 同一한 方向의 應力에 대해 잘 抵抗할 수 있도록 優先方位를 가지면서 조밀하게 되었으므로 이 試料의 先行應力 範圍內의 作用應力에 대한 抵抗能力은 그만큼 向上된다. 따라서 同一한 過壓密比에서 先行應力을 받은 試料는 K 值가 작을수록 더 큰 最大偏差應力을 받게 되어 偏差應力作用方向의 應力으로 인한 變形에 대한 抵抗能力이 그만큼 增加하게 되므로 變形계數 E_i 도 더 크게 되며 過壓密比의 增加에 따른 增加量도 크게 된다.

그리고 또 應力變形 曲線 始點과 尖頭偏差應力의 1/2 즉 $1/2(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ 點과의 割線傾斜度인 E_{50} 에 있어서는 過壓密比가 작은 경우 K 值가 1.0에 가까운 方向으로 增加하면 最大偏差先行壓密應力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 이 $1/2(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ 보다 훨씬 작아지나 K 值가 작아지면 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 은 1/2

II 2. Overconsolidated Tests

| Test No. | K | σ_{10} (kg/cm ²) | σ_{10}' (kg/cm ²) | σ_{20} (kg/cm ²) | σ_{20}' (kg/cm ²) | $\sigma_{1\max}$ (kg/cm ²) | $\sigma_{2\max}$ (kg/cm ²) | $\sigma_{3\max}$ (kg/cm ²) | $\sigma_{1\max}'$ (kg/cm ²) | $\sigma_{2\max}'$ (kg/cm ²) | $\sigma_{3\max}'$ (kg/cm ²) | $\sigma_{3(100)}$ (%) | E_{50} (kg/cm ²) | E_s (kg/cm ²) |
|----------------|----------------|--|---|--|---|---|---|---|--|--|--|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| OI-1-0.3 | | | | | | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 1.03 | 7.5 | 115 | 217 | | |
| OI-1-0.5 | 1.0 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.12 | 11.0 | 119 | 313 | | | |
| OI-1-0.7 | | | | | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 1.01 | 7.0 | 136 | 382 | | | |
| OI-1-1.0 | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.04 | 5.0 | 122 | 475 | | | |
| OA-3/4-0.3 | | | | | 0.3 | 0.40 | 0.33 | 1.06 | 7.5 | 123 | 323 | | | |
| OA-3/4-0.5 | 3/4 | 0.3 | 0.4 | 0.33 | 0.5 | 0.67 | 0.56 | 1.08 | 5.5 | 142 | 455 | | | |
| OA-3/4-0.7 | | | | | 0.7 | 0.93 | 0.78 | 1.13 | 4.3 | 141 | 515 | | | |
| OA-3/4-1.0 | | | | | 1.0 | 1.33 | 1.11 | 1.10 | 5.3 | 190 | 560 | | | |
| OA-0.55-0.3 | | | | | 0.3 | 0.55 | 0.38 | 1.00 | 7.3 | 88 | 207 | | | |
| OA-0.55-0.5 | 0.55 | 0.3 | 0.55 | 0.38 | 0.5 | 0.91 | 0.64 | 1.01 | 10.0 | 115 | 379 | | | |
| OA-0.55-0.7 | | | | | 0.7 | 1.27 | 0.89 | 1.05 | 7.5 | 120 | 447 | | | |
| OA-0.55-1.0 | | | | | 1.0 | 1.82 | 1.27 | 1.03 | 10.2 | 198 | 555 | | | |
| OA- K_0 -0.3 | | | | | 0.3 | 0.75 | 0.45 | 1.10 | 8.0 | 75 | 175 | | | |
| OA- K_0 -0.5 | K_0 (0.4) | 0.3 | 0.75 | 0.45 | 0.5 | 1.25 | 0.75 | 1.10 | 6.8 | 208 | 273 | | | |
| OA- K_0 -0.7 | | | | | 0.7 | 1.75 | 1.05 | 1.08 | 6.8 | 375 | 395 | | | |
| OA- K_0 -1.0 | | | | | 1.0 | 2.50 | 1.50 | 1.12 | 8.3 | 550 | 550 | | | |
| AO-1/3-1.3 | | | | | 0.3 | 0.90 | 0.50 | — | — | — | 108 | | | |
| OA-1/3-0.5 | 1/3 | 0.3 | 0.9 | 0.50 | 0.5 | 1.50 | 0.83 | — | — | — | 270 | | | |
| OA-1/3-0.7 | | | | | 0.7 | 2.10 | 1.17 | — | — | — | 535 | | | |
| OA-1/3-1.0 | | | | | 1.0 | 3.00 | 1.67 | — | — | — | 580 | | | |
| OS-ABCB | | | | | | 1.75 | 1.05 | 1.70 | 6.8 | 490 | 492 | | | |
| OS-ABCDB | | | | | | 1.75 | 1.05 | 1.70 | 9.0 | 303 | 425 | | | |
| OS-ABCGB | | | | | | 1.75 | 1.05 | 1.73 | 7.0 | 650 | 650 | | | |
| OS-ABDGB | — | 0.5 | 1.25 | 0.75 | 0.7 | 1.55 | 0.98 | 1.72 | 8.0 | 650 | 650 | | | |
| OS-ABCDEB | | | | | | 1.75 | 1.05 | 1.70 | 8.8 | 283 | 390 | | | |
| OS-ABCDEFB | | | | | | 1.75 | 1.05 | 1.71 | 6.8 | — | — | | | |
| OS-ABDFB | | | | | | 1.45 | 0.95 | 1.72 | 8.3 | 211 | 370 | | | |

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ 에 가까워지게 증가하게 되고 심한 경우에는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 이 $1/2(\sigma_1 - \sigma)_{peak}$ 보다 오히려 커지게 되므로 K 값이 작을수록 E_{50} 값은 커지게 된다. 따라서 과압밀비가 크면 클수록 K_0 인 경우의 E_{50} 값은 K 값이 1.0인 경우보다 훨씬 더 큰 값을 보이게 된다.

그림 10에서는 先行壓密應力經路가 變形係數에 미치는 影響을 보여주고 있다. 즉 K_0 -正規壓密試料에 軸方向載荷한 NA- K_0 -0.5 시험과 σ_{30}' 이 NA- K_0 -0.5 시험에서와 같이 모두 0.5kg/cm²이고 과압밀비가 모두 1.4이나 다만 除荷應力經路(unloading stress path)가 서로 다른 과압밀試料에 軸方向載荷하는 OS-시험으로써 각 경우

의 變形係數를 보여주고 있다. 이들을 서로 比較하면 과압밀비가 1.4인 OS-시험의 變形係數는 과압밀비가 1.0인 NA-시험에서 보다 勿論 큰 값을 보이며 OS-시험 중에서도 K_0 -線上的 點 C에서 偏差先行應力을 減少시키는 量에 따라서 變形係數는 그에 相當하는 만큼 減少함을 보여 준다. 즉 OS-ABCB 시험에서는 OS-ABCDEB 시험에서 보다 약 1.2~1.7 배정도 큰 變形係數의 값을 보인다.

4. 結 論

1) 正規壓密된 모래의 變形係數는 壓密 時의 土壓係數의 크기에 關係없이 初期應力의 增加에

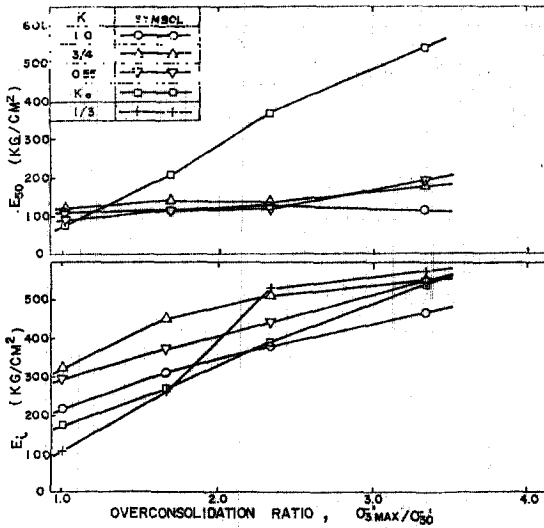


그림 9. Effects of Overconsolidation Ratio on Deformation Moduli

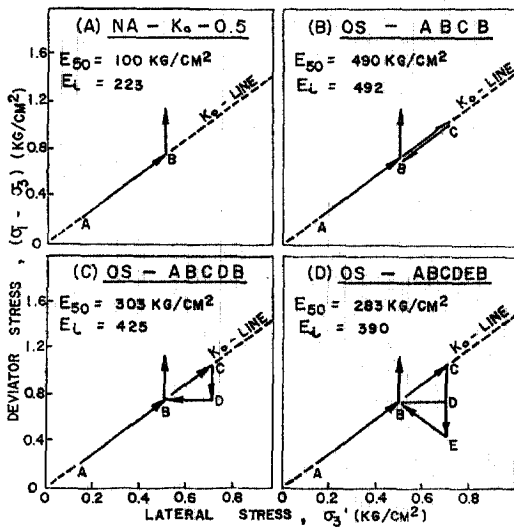


그림 10. Effects of Prestress with Different Stress Path on Deformation Moduli

따라 증가하고, 一定한 初期應力에 대한 變形係數의 크기도 土壓係數가 클수록 一般적으로 더 크다. 따라서 土壓係數가 1.0인 標準三軸壓試驗에 의해서 구해진 變形係數는 正規堆積된 砂質土地盤 內의 K_0 -狀態인 現位置의 變形係數 보다 훨씬 더 크다.

2) 正規壓密된 모래에 있어서 變形係數 E_d 와 初期應力 σ_0' 와의 關係는 $E_d = m\sigma_0'$ 와 같이 표시

되고 이 關係는 土壓係數가 1.0이 아닌 異方性 壓密應力을 받은 모래에서도 適用된다. 이 關係式에서 變形係數 E_d 는 初期接線係數 뿐만 아니라 어떤 一定한 應力에 대한 割線變形係數에도 適用되고 初期應力 σ_0' 는 初期平均應力 σ_{m0}' , 初期軸方向應力 σ_{10}' , 初期橫方向應力 σ_{30}' 및 初期 偏差應力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 를 나타낸다.

3) 先行過壓密應力을 받은 모래의 軸方向載荷에 대한 變形係數는 過壓密比가 클수록 크다. 그리고 또 先行過壓密應力의 應力經路에 의해서도 影響을 크게 받는다.

以上과 같은 사실을 미루어 보아 現位置의 모래地盤의 變形係數를 比較的 正確하게 求하기 爲해서는 等方壓密三軸壓縮試驗 보다 K_0 -異方性 壓密三軸壓縮試驗에 의해야 하며 또한 過壓密된 경우 過壓密比 및 過壓密應力의 應力經路에 따라서 시료를 過壓密시켜야 한다. 그러나 이 경우 現位置의 砂質土地盤의 先行應力歷史를 正確하게 推定하는 것이 問題이다.

參考文獻

1. El-sohby, M.A. and Andrawes, K.Z., "Experimental Examination of Sand Anisotropy," *Proc. 8th ICSMFE, Moscow*, Vol. 1.1, 1973, pp. 103 ~ 109.
2. Holubec, I., "Elastic Behavior of Cohesionless Soil," *J. SMFD, ASCE*, Vol. 94, NO. SM 6, 1968, pp. 1215 ~ 1231.
3. Janbu, N., "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests," *Proc. European Conf. on SMFE, Wiesbaden*, Vol. 1, 1963, pp. 19 ~ 25.
4. Lambe, T. W. and Whitman, R.V., "Soil Mechanics," *John Wiley and Sons, New York*, 1969, 553p.
5. Lambrechts, J.R. and Leonard, G.A., "Effects of Stress History on Deformation of Sand," *J. GED, ASCE*, Vol. 104, No. GT 11, 1978, pp. 1371 ~ 1387.
6. Makhlof, H.M. and Stewart, J.J., "Factors Influencing the Modulus of Elasticity of Dry Sand," *Proc. 6th ICSMFE*, Vol. 1, 1965, pp. 298 ~ 302.

(接受 1983. 2. 2)