

壓縮性 모래의 3次元 剪斷強度 特性

Three Dimensional Strength Characteristics of Compressible Sand

박 병 기*
Park, Byong-Kee
정 진 섭*²
Jeong, Jin-Seob
임 성 철*³
Lim, Sung-Chull

Abstract

A series of consolidated drained and undrained cubical triaxial tests were performed to investigate three dimensional strength characteristics of compressible sand.

All specimens, which are formed by depositing a fine sand loosely, were used.

Failure strength in terms of effective stress analysis was greatly influenced by the variation of intermediate principal stress and so was failure criterion

The adjusted effective frictional angles obtained by the stress state projected on the same octahedral plane showed almost same value, while the measured effective frictional angles showed considerable difference depending on the drainage conditions. Results of total stress analysis in undrained test turned out to fit Tresca's failure criterion well, but results of effective stress analysis turned out to fit Lade's failure criterion well.

要 旨

壓縮性 모래의 3次元 剪斷強度 特性을 밝히기 위하여 六面體 試料로 成形하여 세 主應力을 각기 獨立的으로 조절하여 일련의 壓密排水 및 壓密非排水試驗을 실시하였다. 그 結果 中間主應力은 破壞強度에 큰 影響을 미치고 있으며 破壞規準은 有效應力 解析을 할 경우 中間主應力의 影響을 받고있다. 測定된 有效內部摩擦角(ϕ')은 中間主應力의 상대적 크기를 나타내는 係數 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 값이 0인 三軸壓縮狀態에서 最小值가 되고 漸進的으로 b 값의 증가와 더불어 增加하며 排水, 非排水試驗 結果를 同一正八面體面에 투영하여 얻은 應力으로 조정된 有效內部摩擦角은 같은 b 값에서 서로 一致하고 있다. 非排水試驗에 있어서 全應力으로 解析한 結果는 Tresca의 破壞規準과 잘 一致하고 있다. 正八面體

* 정희원, 全南大學校 工科大學 土木工學科 教授

*² 정희원, 圓光大學校 工科大學 土木工學科 副教授

*³ 정희원, 全南大學校 大學院 土木工學科 博士課程

面에 有效應力으로 表示된 破壞面은 排水, 非排水試驗結果가 같은 값을 가지고 Lade의 破壞規準에 近接함을 보여준다.

1. 序 論

어떤 應力狀態에 있는 土體는 그 모양과 體積의 變化를 일으키나 土體의 連續性에 대해서는 變化가 없다고 假定한다. 따라서 어떤 設計의 安全性은 變形의 許容限界內에서 일어나는 變形의 크기에 의해서 評價된다. 그러나 變形이 매우 커질때는 連續性的 假定에는 限界가 있다. 土質力學에서 重要한 問題中의 하나는 이와같은 土體內의 不連續性的 크기와 分布를 表現하는 限界基準을 數式化 하는것이다. 이와같은 限界 또는 破壞 規準을 살펴 보면, Coulomb(1776)에 의한 破壞規準은 臨界面에 있어서의 臨界剪斷應力과 法線應力과의 관계로 表現되는데 이는 Mohr(1900)가 提案한 破壞規準의 특수한 경우에 해당되므로 이 두 規準은 하나로 하여 Mohr-Coulomb 破壞規準이라 하였다. Tresca(1868)의 破壞規準은 주어진 材料에 대하여 最大剪斷應力이 一定한 臨界값과 같아질 때 일어난다고 假定하였고, 내부마찰각(φ)이 0이면 Mohr-Coulomb 破壞規準과 Tresca 破壞規準이 一致한다. Von Mises(1913)의 降伏條件은 Tresca와는 달리 中間主應力の 影響을 包含하고 있다. 그리고 이들의 降伏面들은 主應力空間에서 Tresca降伏軌跡은 正六角形錘 形狀을 하고 Von Mises降伏軌跡은 圓筒形狀으로 나타난다. 通常의 三軸壓縮試驗에서 얻은 應力-變形率, 間隙水壓 및 強度 舉動은 應力條件이 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 인 경우이고 Mohr-Coulomb의 破壞規準을 使用하는 한 中間主應力이 強度에 影響을 미치지 않는다. 그러나 많은 研究나 實驗 結果에 中間主應力이 흙의 舉動에 크게 影響을 미치고 있음이 立證되고 있다.

本 研究는 이와같은 觀點에서 壓縮性 모래를 六面體 試料로 成形하여 세 主應力을 각기 獨立的으로 조절하여 壓密非排水 및 壓密排水實驗을 實施하여 壓縮性 모래의 強度特性에 中間主應力이 어떻게 影響을 미치는가를 實驗을 통하여 밝힘으로서 壓縮性 모래의 3次元의인 剪斷強度 特性을 糾明하는데 있다.

2. 試 驗

2-1. 試驗裝置

本 研究에 使用된 立方體形 三軸試驗裝置는 Lade¹⁾에 의해 製作되어 흙의 3次元 舉動에 관한 研究에 使用된 것이다. 立方體形 試料를 使用한 三軸試驗裝置는 그림 1과 같다. 이 共試體는 크기가 76mm×76mm×76mm이며 상판(Cap)과 저판(Base) 및 고무막으로 둘러싸여 있다. 最小主應力(σ_3)은 水平方向으로 作用하며 Cell內的 液壓으로 가한다. 鉛直荷重은 變形制御方式으로 載荷하며 最大主應力(σ_1)은 상판(Cap)에 부착된 Load Cell에 의해 鉛直方向의 軸差應力($\sigma_1 - \sigma_3$)을 測定하여 求한다.

中間主應力(σ_2)은 最小主應力(σ_3)와 直교하는 또하나의 水平方向으로 作動하도록 그림 2와 같이

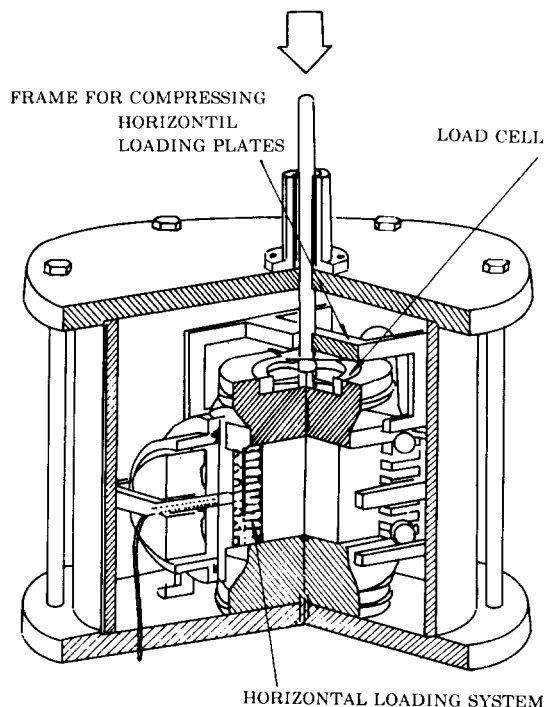


그림 1. Cubical triaxial apparatus(after Lade)

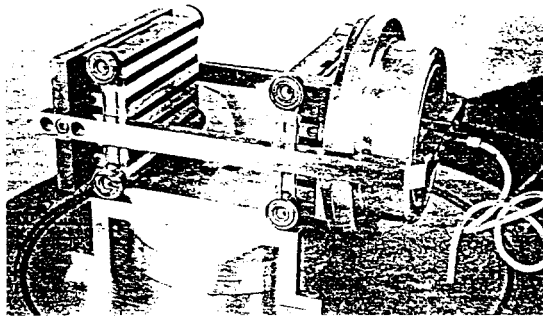


그림 2. Horizontal loading system

特殊하게 考案된 水平載荷裝置를 使用하여 應力制御方式으로 載荷하며 水平方向軸差應力($\sigma_2 - \sigma_3$)를 載荷裝置에 附着된 加壓裝置를 통해 測定한다. 垂直方向 變形量은 三軸 Chamber 밖의 載荷 피스톤에 附着시킨 Dial Gage로 測定하고 中間主應力 및 最小主應力方向의 變形量은 이 方向 兩側 共試體面에 직접 附着시킨 Clip Gage로 測定한다.

2-2. 試驗準備

本 試驗에 使用된 試料는 미국서부의 Los Angeles 부근의 Antelope Valley에서 採取한 모래를 室內에서 乾燥시켜 NO. 60 체를 전부 통과하고 NO. 80 체에 20%, NO. 100 체에 42.5%, NO. 200 체에 100% 남도록 체가름하여 配合한 입경이 微細한 모래이다. 이 試料의 비중(Gs)은 2.85, 最小間隙比(e_{min})는 1.05, 最大間隙比(e_{max})는 1.31이다. 또한 共試體 成形時의 拘束壓力은 0.25kg/cm^2 으로 유지하였으며 이때의 相對密度(D_r)는 50%이고, 間隙比(e_{spc})는 1.18이다.

2-3. 試驗方法

室內에서 空氣乾燥한 모래를 三軸試驗機에 설치전에 共試體와 상판 및 하판사이의 摩擦에 의한 拘束力을 없애기 위해 상, 하판에 Silicon Grease를 바르고 0.3mm 두께의 고무 Membrane을 附着한다. 이는 載荷板과 共試體 사이의 剪斷應力이 發生하는것을 防止하고 共試體內의 變形이 均一하게 分布되도록 하기위해서이며, 試料를 底板(Base) 위에서 직접 다음과 같이 설치한다.

Rubber Membrane을 底板(Base) 둘레에 펼친

다음 O-ring으로 봉한다. 水平載荷裝置를 이동시키는 레일을 定位置에 고정시키고 立方體 試料의 眞空 Forming jacket을 底板(Base)위의 중앙에 맞추어놓고 레일에 의해 지지되게 한후 Membrane을 Forming Jacket 둘레에 완전히 곧게 펼쳐 올리고 眞空을 가한다. 그리고 Forming Jacket 內部에 알맞는 “채”를 Forming Jacket 안에 넣고 空氣乾燥된 모래의 量을 測定하여 채안에 부어 넣은 후 채를 천천히 들어 올리면 느슨한 狀態로 Forming Jacket 안에 놓이게 된다. 이때 수동으로 간혹 진동을 주어 密度가 정해진 값에 이르도록 하여 安置한다. 그리고 Cap을 試料위의 中央에 놓고 Membrane을 Cap 둘레에 고르게 펼쳐 썩은 다음 두 개의 O-ring으로 Rubber Membrane을 Cap에 봉하여 부착한다. 그 다음 상부 排水管을 Cap에 연결시키고 試料의 形狀을 維持할 수 있도록 Bubble 실을 통해서 試料에 0.25kg/cm^2 의 眞空을 가한후 생고무액을 Membrane에 여러 층 발라 漏水를 防止시킨다.

다음에 水平載荷裝置와 Clip Gage를 設置하고 三軸室을 조립 한후 三軸室에 물을 가득 供給하고 試料의 眞空을 除去함과 同時에 一定한 側壓을 가한후 이렇게 가한 側壓을 일정하게 維持시킨다. 이 시료에 CO_2 를 下部 排水管으로 流入시켜 試料속의 空氣를 上部排水管을 통해 완전히 빠져 나가게 한다. 다음 증류수를 下部 排水管으로 流入시켜 試料內에 있는 CO_2 를 上部 排水管으로 천천히 밀어 올려 내보낸다. 이때 CO_2 가스의 體積變化는 순수물의 體積變化와 같기때문에 Cap안과 試料內에 남아있는 CO_2 가스는 크게 문제되지 않는다. 또한 飽和정도는 각 試驗 시작전에 間隙水壓係數 B를 測定하여 點檢한다. 이때 B값은 대부분 0.97-1.0 정도이므로 完全飽和된 것으로 본다.

壓密非排水試驗인 경우에는 3kg/cm^2 의 Cell Pressure와 2kg/cm^2 의 Back Pressure를 가하여 有效等方壓이 1kg/cm^2 狀態에서 剪斷試驗을 遂行하고 壓密排水試驗은 Back Pressure를 가하지 않고 遂行했으며 試驗은 拘束壓을 一定하게 한 狀態에서 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 의 값을 一定하게 維持시키면서 剪斷한다.

여기에서 b는 中間主應力の 相對的 크기를 나타내는 係數로서 b값을 대략 0.00, 0.10, 0.20, 0.3

0, 0.50, 0.70, 0.90, 1.00의 8段階가 되도록 一連의 三軸壓縮試驗을 實施하였는데 이때 b값은 水平荷重을 鉛直 荷重의 變化에 따라 적절하게 調整함으로써 一定하게 維持할 수 있도록 되어 있으나 調整 과정에서 약간의 차이를 가져와 排水인 경우는 b값이 0.00 0.14 0.24 0.32 0.48 0.74 0.96이 되고 非排水인 경우의 b값은 0.00 0.13 0.25 0.32 0.55 0.73 0.91 0.95의 값을 얻었다. 剪斷時 剪斷速度는 排水, 非排水를 막론하고 0.01cm/min가 되도록 하여 剪斷하고 試料의 치수는 언급한 바와 같이 76mm×76mm×76mm의 立方體이다.

試驗이 進行되는 동안 室內溫度는 恒常 20-21℃로 維持하였다.

3. 曲面 破壞面

膨脹하는 降伏面과 破壞面을 제 1, 제 3應力不變量으로 表現한 彈·塑性構成 모델이 Lade^{2, 3)}에 의해 提案되었다. 이 모델은 모래와 재정형 正規壓密된 粘土에 대한 三軸試驗 結果로 부터 얻어진다. 그는 처음 Monterey-"O" 모래에 대한 試驗結果에 의하여 다음과 같이 破壞面의 方程式을 提案

하였다.

$$I_1^3 - K_1 I_3 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - (\sigma_x \tau_{yz}^2 + \sigma_y \tau_{zx}^2 + \sigma_z \tau_{xy}^2) = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

K_1 = 모래 密度에 依存하는 常數

膨脹하는 降伏面을 나타내는 函數 f는 다음과 같이 表現하였다.

$$f = I_1^3 / I_3 \dots\dots\dots (2)$$

이 식에서 f는 荷重 增加와 더불어 變化하고 파괴될 때에는 K_1 값이 된다.

塑性 Potential函數 Q는 다음과 같이 表現한다.

$$Q = I_1^3 - K_2 I_3 \dots\dots\dots (3)$$

(1)(3)식에서 K는 주어진 f값에 대한 常數이며 이 理論을 "K 理論"이라고 부르고 여기서 Q는 f와는 正八面體面에서 비슷한 形狀을 나타내지만 값이 다르다. 그러므로 이 理論은 非關聯則 特性을 許容한다. K 理論에서는 f와 Q를 σ_1 를 包含하는 三軸面에 투영할때 直선으로 나타나 이 理論을 曲面까지 表現할 수 있는 "η 理論"으로 修正하여

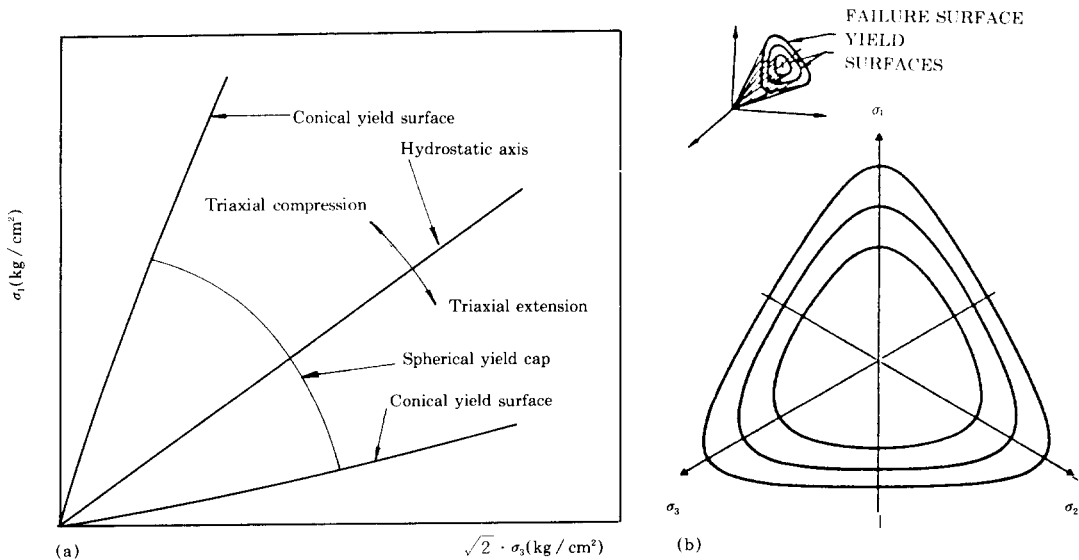


그림 3. Characteristics of proposed failure and yield surfaces shown in principal stress space (a) Traces of yield surfaces in triaxial plane (b) Traces of yield surfaces in octahedral plane.

“K 理論”을 “η 理論”의 특별한 경우가 되도록 일반화 시킨 것이다.

이 “η 理論”에 의하면 降伏面의 方程式은 다음과 같다.⁴⁾

$$f_p = (I_1^3 / I_3 - 27)(I_1 / Pa)^m \quad (4)$$

여기서 Pa는 大氣壓이고, m는 材料에 따라 결정되는 材料 常數이다. 그리고 降伏面이 極限에 도달하는 破壞面의 方程式은 다음과 같다.

$$f_p = \eta_1 \quad (5)$$

“η 理論”에서 塑性 Potential 函數는 다음과 같이 表現된다.

$$Q_p = I_1^3 - [27 + \eta_2 (Pa / I_1)^m] I_3 \quad (6)$$

여기서 η₂는 주어진 f_p와 σ₃값에 대해서 常數이다.

이 “η 理論”은 그림 3에서 보여준 것 처럼 球面의 降伏面(Spherical Yield Cap) f_c를 포함한다.

$$f_c = I_1^2 + 2I_2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } I_2 = & \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \\ & \sigma_z) = -(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \end{aligned}$$

(5)식으로 얻어지는 破壞面은 主應力 空間에서 그림 3에서와 같이 應力空間의 原點에 頂點을 가지는 모서리 角이 둥그스런 三角錘 모양이다. 頂點에서 각도는 η₁의 값에 따라 增加한다.

또한 이 破壞面은 靜水壓縮에 대해 曲面의 形態이며 曲率은 m의 값에 따라 增加 하며, m=0의 경우 破壞面은 直線이 된다. 또한 正八面體面에서 높은 壓力에서의 破壞面은 거의 圓과 같고 I₁이 감소하면 모가 둥그스런 三角形으로 변하고 I₁이 0에 가까울 때에는 각이 뾰족한 三角形 끝이 된다.

4. 間隙水壓 舉動

그림 4는 三軸壓縮狀態(b=0)에서 拘束壓力를 달리하여 壓密한 후 非排水三軸壓縮剪斷試驗중에서 발생된 間隙水壓을 拘束壓力로 나눈 값을 軸方向 變形率과 함께 나타냈다. 그림에서 間隙水壓은 어느경우나 거의 동일한 曲線상에 위치하고 있음을 보여 준다. 이것은 間隙水壓 發生이 拘束 壓密壓力에 比例하여 發生하고 있음을 의미한다. 이와같은 結果는 Lade et al⁵⁾도 粘土의 試驗結果에서 얻은 바 있다.

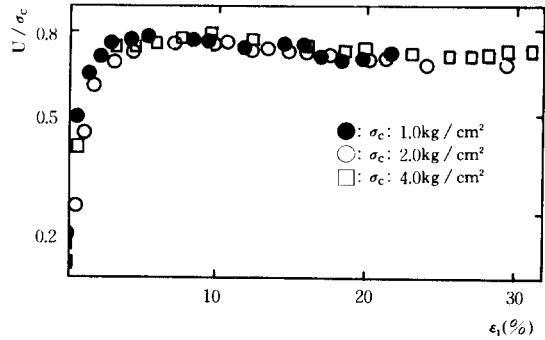


그림 4. Comparison of pore pressure for Antelope Valley Sand # 60-200.

그림 5는 拘束壓力를 1kg/cm²로 하여 等方壓密한 여러개의 試料를 中間主應力의 정도를 나타내는 b 값을 달리하여 三軸剪斷試驗한 結果의 間隙水壓과 ε₁과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 b 값의 增加에 따라 間隙水壓이 약간 增加하여 발생하고 있으며 이것은 中間主應力이 間隙水壓 발생에 영향을 미치고 있음을 立證하고 있다. 고로 中間主應力의 影響이 考慮되지 않은 Skempton (1954)⁶⁾의 間隙水壓 方程式으로는 일반 應力狀態의 間隙水壓 豫測이 어렵다는 것을 알 수 있다.

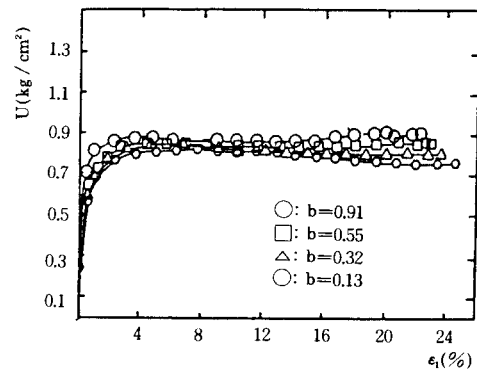


그림 5. Pore pressure characteristics in cubical tri-axial tests for antelope valley sand # 60-200.

5. 剪斷強度 特性

5-1. Parameter의 決定

主應力 空間에서 Lade의 破壞面의 表現 方程式은 (5)식으로 주어진다. 式 中の η₁과 m은 試料에

따라 결정되는 材料常數이며 三軸壓縮試驗結果로 얻어진 破壞時의 (I_1/I_3-27) 과 (P_a/I_1) 의 관계를 兩面對數紙에 정리하여 구한다.⁷⁾

그림 6은 本 研究에 使用된 試料의 三軸試驗結果를 圖示한 것이며 그림 중의 直線은 $b=0$ 일때의 試驗結果를 使用하여 回歸分析으로 구한 實驗直線이다. 이 그림으로부터 η_1 은 P_a/I_1 이 1.0인 位置에서 直線의 縱軸좌표로부터 구하고 m 은 直線의 기울기로 부터 定하는데 각각 $\eta_1=39$ 와 $m=0.3$ 을 얻었다.

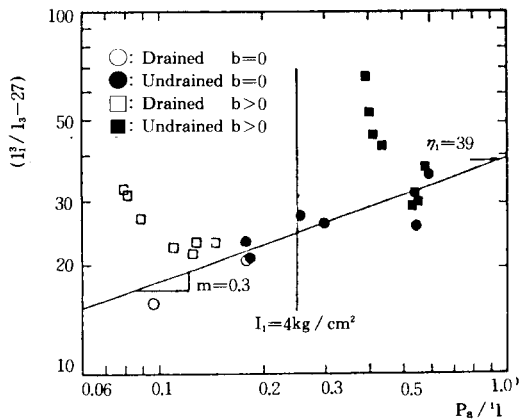


그림 6. Determination of the values η_1 and m involved in failure criterion for Antelope Valley Sand # 60-200.

5-2. 有效内部摩擦角

그림 7은 拘束壓力를 $1\text{kg/cm}^2, 2\text{kg/cm}^2, 4\text{kg/cm}^2$ 으로 하여 三軸壓縮狀態($\sigma_2=\sigma_3$)에서 排水, 非排水試驗 結果를 다음식으로 구한 有效内部摩擦角과 有效拘束壓力과의 관계를 나타낸 것이다.

$$\sin \phi' = (\sigma_1' - \sigma_3') / (\sigma_1' + \sigma_3') \quad (8)$$

그림에서 σ_c' 가 커지면 ϕ' 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 Mohr의 破壞포락선이 直線이 아니고 曲線으로 나타나고 있는 것과 같은 意味를 갖는다. 그림 8은 中間主應力의 相對의 크기를 나타내는 b 와 有效内部摩擦角(ϕ')의 관계를 나타낸 것이고 $b>0$ 인 試驗에서 ϕ' 는 b 의 增加와 함께 增加한다.

Mohr-Coulomb 破壞規準에 의하면 内部摩擦角은 b 에 關係없이 一定하지만 실제 試驗結果 Mohr-Coulomb 破壞規準과는 다르게 中間應力

의 影響을 받고 있음을 알 수 있다. 그리고 非排水인 경우가 排水인 경우보다 큰 값을 보이고 있으며 이것은 그림 8과 같이 동일한 拘束壓力일 경우 非排水의 有效拘束壓力이 排水試驗때 보다 작은 값이 되므로 그림 7에서 有效内部摩擦角과 有效拘束壓力과의 關係로부터 얻은 結果와도 서로 一致하고 있다.

이들 試驗結果가 同一한 有效平均應力의 條件에서 어떻게 다른가를 파악하기 위하여 동일한 正八面體上에 투영하여 比較할 必要가 있다. 따라서 試驗結果를 Lade의 破壞面을 따라 $I_1=4\text{kg/cm}^2$ 인 正八面體上에 投影하여 얻은 應力을 (8)식에 代入하여 구한 有效内部摩擦角(ϕ')과 b 의 關係를 나타낸 것이 그림 8(b)이다. 이 그림에 의하면 排水, 非排水試驗은 거의 같게 나타나고 있다. 이것은 排水條件이 破壞面의 크기에 影響을 미치지 않는다고 말할 수 있다. 또한 그림 8(b)에 土質常數 $m=0.3$ 및 $\eta_1=39$ 를 式(1)에 代入하여 구한 Lade의 理論 破壞面을 實線으로 나타냈다. 그림에서 壓縮性 모래는 $b=0.5$ 일때 까지는 Lade의 理論 破壞面과 거의 一致하고 있으나 b 값이 0.5보다 큰 경우에는 實驗結果가 理論值보다 크게 나타나고 있다.

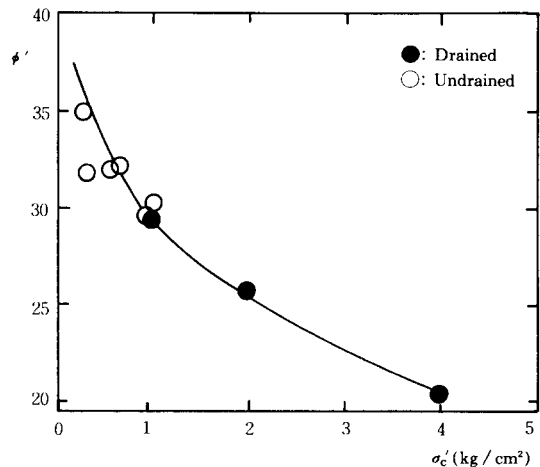


그림 7. Failure surface in $\phi' - \sigma_c'$ diagram for Antelope Valley Sand # 60-200.

5.3 正八面體上의 全應力 破壞面

그림 9은 Antelope Valley Sand #60-200를

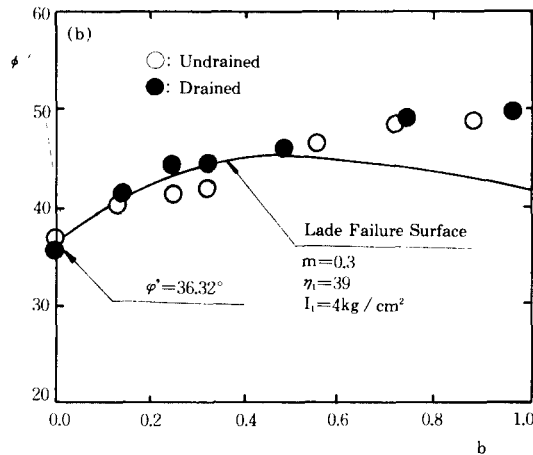
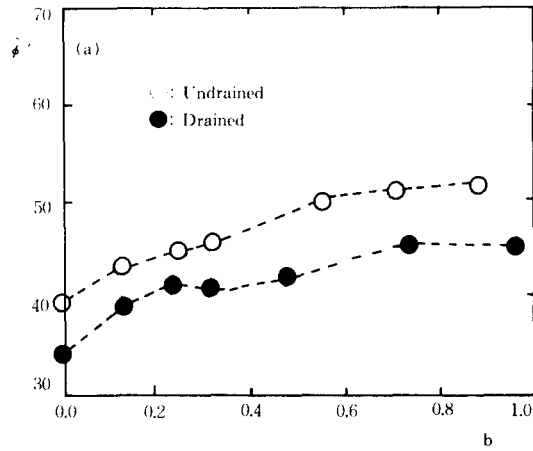


그림 8. Failure surface for drained and undrained Antelope Valley Sand #60-200 shown in diagram for tests in Cubical Triaxial Apparatus (a) measured stress state (b) adjusted stress state.

각각 1kg/cm_2 의 拘束應力으로 壓密한후 立方體 非排水剪斷三軸試驗으로 구한 剪斷強度를 正八面體面上에 나타낸 것이다. 각각의 試料는 같은 有效 壓密壓力에 대해서 같은 密度가 되도록 하였고 剪斷 중에 體積變化는 없는것으로 하였다. 그림 9(a)는 立方體三軸試驗으로 구한 非排水剪斷強度 $[(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}]$ 를 全應力(즉 試料속의 間隙水의 效果를 무시)으로 計算하여 Tresca 破壞規準과 함께 正八面體面上에 나타낸 것이다.⁸⁾ 그림에서 보는 바와 같이 試驗結果를 全應力 破壞規準인 Tresca 規準과 比較할때 거의 일치하고 있음을 보여준다. 다만 三軸引張($\sigma_1 = \sigma_2$)일때는 非排水

剪斷強度가 Tresca 規準보다 약간 크게 나타나고 있으나 이것은 試驗誤差 때문에 발생한 것으로 생각한다. 따라서 非排水 剪斷強度는 全應力解析을 할 경우의 破壞強度는 中間主應力의 影響을 받지 않는다고 할 수 있다. 한편 같은 試驗結果를 有效 應力을 사용하여 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 을 破壞強度로하여

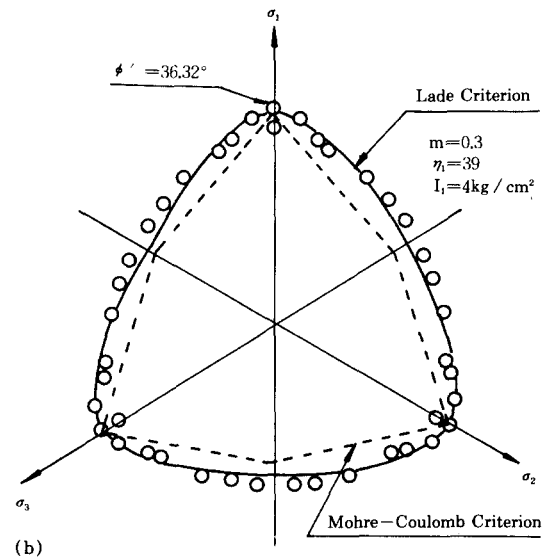
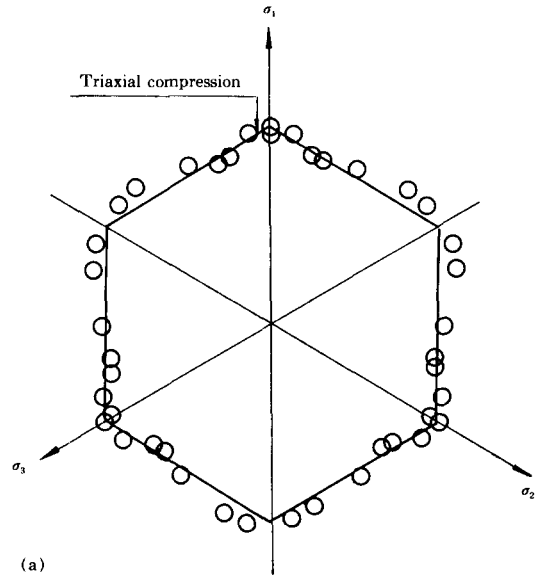


그림 9. Failure surface for undrained Antelope Valley Sand #60-200 shown in Octahedral plane (a) total stress (b) effective stress.

$I_1=4\text{kg/cm}^2$ 인 正八面體面에 투영한 結果를 그림 9(b)에 나타냈다. 그림에서 보논바와 같이 非排水 三軸試驗結果를 有效應力으로 나타낸 破壞規準面은 Mohr-Coulomb 規準보다는 Lade의 破壞規準面에 더 接近함을 보이고 있다.

5-4. 三軸面上的 有效應力 破壞面

그림 10은 三軸壓縮($\sigma_1=\sigma_3$)과 三軸引張($\sigma_1=\sigma_2$)狀態에서 三軸剪斷試驗結果의 破壞時 應力狀態를 Lade의 理論 破壞面과 比較하기 위하여 σ_1 軸을 包含한 三軸面(Triaxial Plane)上에 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 非排水試驗結果를 Lade의 이론

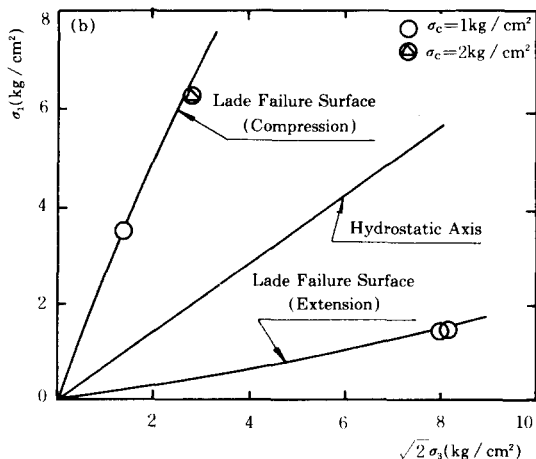
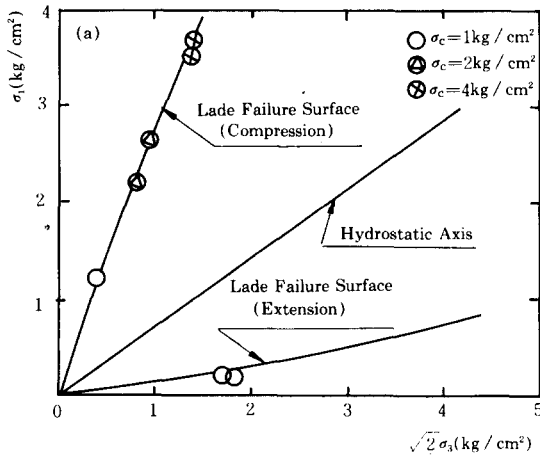


그림 10. Failure surface for Antelope Valley Sand #60-200 shown in triaxial plane (a) undrained tests (b) drained tests.

파괴면과 함께 나타낸 것이다. 그림에서 三軸引張 狀態($\sigma_1=\sigma_2$) 즉 $b=1.0$ 일때의 試驗값은 얻지 못하여 그와 가장 근사값인 $b=0.91, b=0.95$ 값을 나타냈다. 한편 그림 10(b)에는 배수시험결과를 Lade의 이론 파괴면과 비교한 것이다. 여기에서도 $\sigma_c=1\text{kg/cm}^2$ 로 한 三軸引張($\sigma_1=\sigma_2$) 排水剪斷試驗 結果로서 $b=1.0$ 인 조건이어야 하나 그 근사값인 두개의 $b=0.96$ 상태의 試驗 結果이다. 그림중의 0점으로 나타낸 것은 試驗結果 얻은 破壞時의 應力 狀態 點이고 實線은 Lade 曲面破壞面 方程式에 앞에서 구한 材料定數 $\eta_1=39 \text{ m}=0.3$ 을 代入하여 구한 것이다. 그림에서 보논바와 같이 排水, 非排水狀態 어느 경우나 三軸壓縮狀態($\sigma_2=\sigma_3$)는 Lade의 理論破壞面과 試驗結果가 試驗結果가 어느정도 一致하고 있으나 三軸引張狀態($\sigma_1=\sigma_2$)에서는 $b=1.0$ 보다 적은 값을 사용하였음에도 Lade의 理論 破壞面 보다 약간 크게 나타나고 있다. 따라서 Lade의 破壞面의 方程式은 壓縮性 모래의 경우 三軸面上에서 三軸壓縮狀態의 試驗結果와는 一致하나 三軸引張狀態에서는 試驗結果보다 약간 작은 값을 나타낸다고 말할 수 있다.

5-5. 正八面體面上的 有效應力 破壞面

그림 11은 正八面體面上에 立方體形 三軸試驗機를 사용하여 壓縮性 모래의 排水 및 非排水試驗을 하여 얻어진 破壞強度를 Mohr-Coulomb 破壞面과 Lade 破壞面을 比較하여 나타낸 그림이다. 試驗 結果와 破壞規準을 比較하기 위하여 試驗値는 $I_1=4\text{kg/cm}^2$ 인 正八面體面에 투영시킨 값을 사용하였다. 그림 11에 의하면 排水, 非排水試驗으로 얻은 結果가 同一曲線上에 있음을 알 수 있다. 이것은 排水時 密度의 變化를 감안 할때 荷重作用中 體積變化의 수정없이 唯一한 破壞面으로 表示할 수 있는 可能性을 보여주는 것이라고 생각된다. 그리고 위 두 試驗 結果는 Lade의 破壞面과도 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 다만 $b=0.7$ 이상에서는 實驗値가 Lade의 破壞面보다 약간 크게 나타나고 있다. $b=0$ 일 때의 有效內部摩擦角 $\phi'=36.32^\circ$ 를 사용하여 Mohr-Coulomb의 破壞規準式에 代入하여 얻은 破壞面을 그림 11에 점선으로 表示했다. 그림에서 Mohr-Coulomb의 破壞面은 b 값이 0보다 큰 경우는 實驗값보다 작은

값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 Mohr-Coulomb 破壞規準이 中間主應力의 영향을 무시한 結果이다. 그러나 中間主應力의 영향을 나타낼 수 있는 Lade의 破壞面의 方程式은 壓縮性 모래의 파괴면을 排水條件에 관계없이 하나의 方程式으로 表現할 수 있음을 알았다.

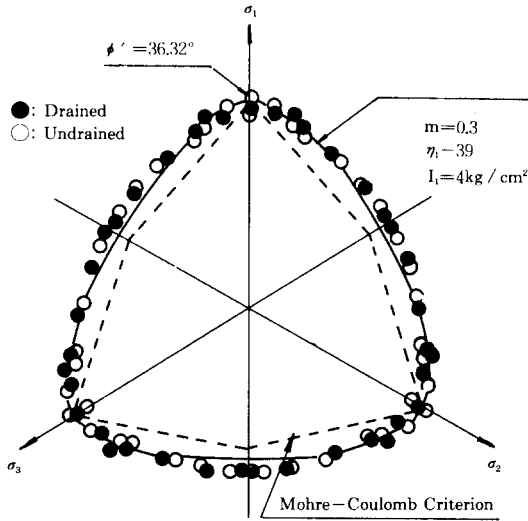


그림 11. Failure surface for drained and undrained Antelope Valley Sand #6-200 shown in Octahedral plane.

6. 結 論

세 主應力을 각각 獨立的으로 制御할 수 있는 立方體形三車由試驗機를 使用하여 壓縮性 모래의 剪斷強度 特性을 調査한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 中間主應力은 壓縮性모래의 3次元의 破壞強度에 큰영향을 미치고 있으며 破壞規準은 有效應力解析을 할 경우 中間主應力의 영향을 나타낼 수 있는 Lade 規準이 Mohr-Coulomb 規準보다 試驗值에 더 近接한다.

2. 測定된 有效內部摩擦角(ϕ')은 $b=0$ 인 三軸壓縮狀態에서 最小值가되고 b 값의 증가와 더불어 漸進的으로 增加하며 排水, 非排水試驗結果를 同一正八面體面에 투영하여 얻은 應力으로 조정된 有效內部摩擦角(ϕ')은 같은 b 값에서 서로 일치하

고 있다.

3. 壓縮性 모래의 非排水剪斷強度는 全應力解析을 할 경우 Tresca 破壞規準과 거의 일치하고 中間主應力의 영향을 받지 않는다.

4. 三軸面上에 有效應力으로 표시된 Lade의 破壞面은 排水 및 非排水 어느경우나 三軸壓縮狀態에서는 實驗結果와 거의 一致하나 三軸引張狀態에서는 약간 과소평가 된다.

5. 正八面體面上에 有效應力으로 表示된 破壞面은 排水, 非排水試驗 結果 같은 값을 가지고 Lade의 規準에 近接함을 보여 준다.

感謝의 말

본 연구는 한국과학재단 지원하에 연구수행중 해외연구에서 이루어진 것으로 도움을 준 당해 재단과 UCLA의 Poul V. Lade 교수에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. Lade, P.V., and Duncan, J.M., "Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM10, Proc. Paper 10057, Oct., 1973, pp. 793-812.
2. Lade, P.V., and Duncan, J.M., "Elastoplastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No.GT10, Proc. Paper 11670, Oct., 1975, pp.1037-1053.
3. Lade, P.V., "The Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesionless Soils." Thesis Presented to the University of California, at Berkeley, Calif., in 1972, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
4. Lade, P.V., "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surface." International Journal Solid and Structs. 13. 1977 pp.1019-1035.
5. Lade, P.V., and Musante, H.M., "Three-Dimensional Behaviour of Remolded Clay." Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT2, Proc. Paper 13551, Feb., 1978, pp. 193-209.
6. Skempton, A.W., "The Pore Pressure Coefficients

- A and B." *Geotechnique*, London England, Vol. 4, No. 4, Dec., 1954, pp.143-147.
7. Lade, P.V., "Three-Dimensional Behaviour and Parameter Evaluation of an Elasto-Plastic Soil Model" *Geomechanical Modelling in Engineering Practice*, 1986. pp.297-331.
8. Lade, P.V., "Effects of Voids and Volume Change on the Behaviour of Frictional materials," *International Journal for Numerical Method in Geomechanics*, Vol.12, 1988, pp.351-370.
(접수일자 1990. 7. 14)