

## 飽和砂의 剪斷強度에 관한 實驗的 研究

### An Experimental Study on Shear Strength of Saturated Sand

李 滢 洙\* · 朴 鎔 大\*\*  
Lee, Hyoung Soo · Park, Yong Dae

#### Abstract

The purpose of this study is to compare the results of shear-deformation of saturated sand under the 3 dimensional stress with the results of simple torque-shear test already reported. Japanese standard sand, Toyoura sand, was chosen as test sample and the equipments of the department of soil mechanics laboratory of Nihon University were used.

The conclusions obtained are as follows.

- 1). The friction angle of sand ( $\phi$ ) is proportional to the density regardless of the condition of stress-strain. This is because of the reason that the lower the cell pressure becomes, the larger the volume changes in case of the same density.
- 2). The value of  $\phi$  are variable according to the condition of stress-strain in the same density, and  $\phi_{TS}$  is larger than  $\phi_{PS}$  and  $\phi_{TC}$  when cell pressure is low.
- 3).  $\phi_{PS}$  is larger than  $\phi_{TS}$ , under the same density and same cell pressure. Thus the shear strength of sand is decided according to the condition of stress-strain.
- 4). the relationship between the stress ratio ( $q/p$ ) and strain increment ration in the plane strain test is linear regardless of the density and the cell pressure of the test sample.

#### 要 旨

本 研究는 日本의 標準砂인 豊浦砂 (Toyoura Sand)를 使用하여 日本大學 理工學部土質實驗室에 備 置된 應力과 變形의 條件이 서로 다른 試驗裝置를 利用하여 平面變形試驗과 軸對稱應力 條件下의 三 軸壓縮試驗을 實施하고 이미 調查 報告한 바 있는 비틀림 單純剪斷試驗 結果와 比較하여 三次元 應力 條件下에서 飽和된 모래의 剪斷變形 特性을 檢討하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 모래의 內部摩擦角  $\phi_0$ 는 應力變形的 條件에 關係없이 拘束壓에 反比例한다.  
이는 같은 密度의 모래라도 拘束壓이 낮을 수록 體積變化가 크기 때문이다.
- 2) 같은 密度의 모래라도 應力變形的 條件에 따라  $\phi$  값이 다르며  $\phi_{TS}$ 는  $\phi_{PS}$  및  $\phi_{TC}$ 에 比하여 拘

\*正會員 · 中央大學校 工科大學 教授, 土木工學科

\*\*正會員 · 斗一建設株式會社 理事

束壓이 낮을 때 그 영향이 크다.

3) 같은 密度와 拘束壓下에서는  $\phi_0 PS$  는  $\phi_0 TC$  보다 크고  $\phi_0 TS$  보다 작은 값을 나타내는 것을 보아 모래의 剪斷強度는 應力變形的 條件에 따라 차이가 남을 알 수 있다.

4) 모래의 限界狀態를 나타내는 에너지 消散式에 依하면 應力比( $q/p$ )와 變形增分比의 關係는 平面變形試驗의 경우 供試體의 拘束壓 및 密度에 關係없이 同一한 直線上에 存在한다.

## 1. 序 論

흙 構造物이나 地盤內의 應力과 變形特性을 室內實驗에 依하여 調査하는 方法으로는 원지반에서 的 應力條件 및 排水條件等의 境界條件을 室內에서 그대로 再現할 수 있다는 點에서 一般적으로 三軸壓縮實驗을 하고 있다 그러나 一般의 三軸壓縮實驗은 載荷裝置에 따르는 應力 變形的 分布가 軸對稱條件만을 再現할 수 있으며 實際地盤의 應力과 變形狀態를 이렇게 단순한 것으로 假定하는 데는 많은 制約이 따른다.

本 研究에서는 多軸壓縮實驗裝置를 利用하여 平面變形實驗을 實施하고 軸對稱應力條件下의 三軸壓縮實驗 및 이미 조사報告한<sup>(6)</sup> 비틀림 單純剪斷

實驗結果도 比較하여 三次元 應力條件에 대한 飽和된 모래의 變形特性에 關하여 檢討를 하고자 한다.

## 2. 試料 및 試驗方法

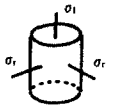
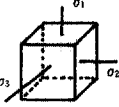
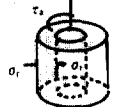
本 實驗에 使用된 모래의 物理的 性質은 表1과 같고 供試體에 作用하는 主應力과 變形的 크기는 表2에 나타낸 것과 같다.

供試體는 空氣中에서 乾燥된 모래를 飽和시켜 몰드내에서 그것을 중류수속에 沈積시켜 一定의 間隙比를 갖도록 振動機를 利用하여 間接적으로 振動을 加하고(tapping method) 몰드속의 모래를 다짐봉으로 直接 다짐하여(plunging method) 가능하면 供試體가 均一性을 갖도록 凍結시켰다. 凍結된 供試體는 몰드로부터 분리하여 所定의 規格으로 成形한 다음 供試體의 크기를 測定하고 壓縮室內에 設置한다. 단 供試體의 斷面과 載荷裝置의 加壓板과의 사이에는 摩擦을 줄이기 위하여 실리콘 구리스를 바른 테프론(teflon) 시트를 넣었다. 그후 供試體를  $0.2\text{kg/cm}^2$ 의 拘束壓下에서 解凍시키고  $0.1\text{kg/cm}^2$ 의 負壓(back pressure)下에서 脫氣水를 供給하여 모래가 完全히 飽和되도록 한후 最終壓密壓力이 各各 0.5, 1.0, 2.0, 3.0  $\text{kgf/cm}^2$ 가 되도록 各各의 供試體를 段階의 等方壓密하고 軸方向 應力( $\sigma_z = \sigma_1$ )은 모터에 依해서 變形制御式으로 0.2 %/min의 變形速度로서 載荷하였으며 中間主應力( $\sigma_y = \sigma_2$ )은 軸方向應力의 增분에 따라서 側方拘束壓을 變化시켜 水平方向의 變形을 拘束하면서 壓密批水剪斷試驗을 實施하였다. 試驗方法에 對해서는 平面變形試驗만 說明한다.

表 1. 試料의 物理的 性質

試料名	豐浦標準砂
比重 $G_s$	2.644
均等係數 $U_c$	1.333
曲率係數 $U_c'$	0.949
最大粒徑	0.250(mm)
最小間隙比 $e_{min}$	0.605
最大間隙比 $e_{max}$	0.939

表 2. 供試體의 主應力·變形

供試體	三軸壓縮	平面變形	비틀림단순剪斷
主應力			
變形	$\epsilon_v = \epsilon_{11} + 2\epsilon_{33}$	$\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_v = \epsilon_a + \epsilon_A$ $\epsilon_A$ : 面積變形
크기	$d \times h(\text{mm})$ $= 50 \times 100$	$l \times b \times h$ $= 80 \times 40 \times 85$	$r_i \times r_o \times h$ $= 60 \times 80 \times 100$

## 3. 應力과 變形

三次元 主應力 空間에 對하여  $x, y, z$  軸을 主應力 軸으로 하는 各各의 主應力 性분을  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 로 하면 正八面體 試料에 作用하는 垂直應力( $\sigma_{cc}$ )

및 剪斷應力 ( $\tau_{oct}$ )은 다음 式으로 나타낼 수 있다.  
(단  $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$ 이며 壓縮의 狀態를 正으로 한다.)

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = p \quad (1)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\}^{\frac{1}{2}} = q \quad (2)$$

한편 主應力軸과 主變形의 座標軸이 一致한다면 各各의 主應力軸에서의 剪斷變形은 0 이므로 主變形 ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ )이 發生하는 것으로 되어 供試體의 垂直變形 ( $\epsilon_{oct}$ ) 및 剪斷變形 ( $\tau_{oct}$ )은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon_{oct} = \frac{1}{3}(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) = \frac{1}{3}\epsilon_v \text{ (體積變形)} \quad (3)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

本 試驗의 供試體는 이와 같은 應力變形의 關係를 갖는 것으로 한다.

#### 4. 試驗의 結果 및 考察

그림 1은 平面變形試驗의 代表的인 結果로서 拘束壓  $\sigma_x = 1\text{kgf/cm}^2$ 에 對한 軸變形( $\epsilon_1$ )~主應力比 ( $q/p$ )~體積變形( $\epsilon_v$ )의 關係를 間隙比( $e$ )별로 나타내고, 軸對稱應力條件下的 三軸壓縮試驗結果와 比較하여 나타낸 것이다. 그림에 依하면 一定한 拘束壓下에서는 密度가 큰 모래일 수록 應力比 및 體積變形이 커지는 一般의인 傾向을 나타내고 있다. 應力比와 軸變形의 關係를 보면 平面變形試驗의 경우 比較的 작은 軸變形(2~3%)에서 應力比가 最大값( $q/p$ )<sub>max</sub>에 이르고 그후 應力比는 急激히 減少하여 應力의 殘留狀態를 유지하는 傾向을 나타내고 있으며 體積變化는 最大應力比 이후의 變化量이 急激히 減少하는 傾向을 나타내고 있지만 軸對稱應力條件下的 三軸壓縮試驗에서는 最大應力比 이후의 體積變化가 계속되고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 體積變化의 特性은 平面變形의 경우 中間主應力( $\sigma_y$ )를 拘束하고 있기 때문이라고 볼 수 있다. (2)

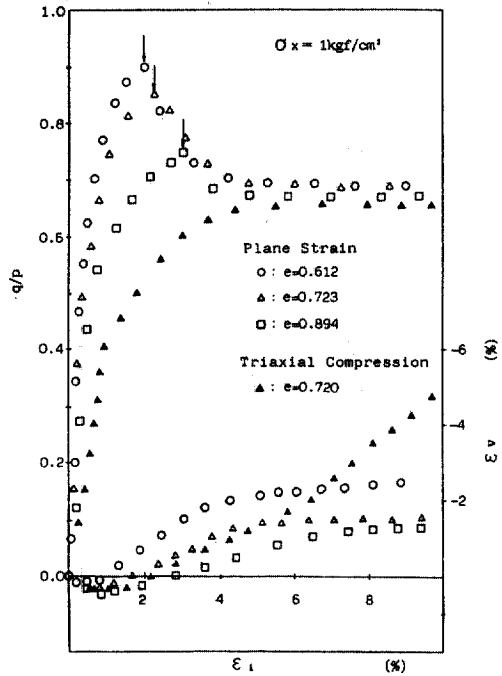


그림 1. 軸變形-應力比-體積變形의 關係

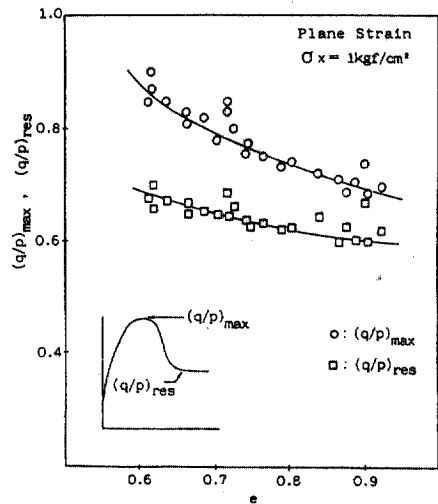


그림 2. 間隙比-最大殘留應力比의 關係

一定한 拘束壓下的 最大應力比 ( $q/p$ )<sub>max</sub> 와 殘留

應力比( $q/p$ )<sub>res</sub> 와의 關係를 密度別로 (그림2 參照) 살펴보면 密度가 클수록 ( $q/p$ )<sub>max</sub> 와 ( $q/p$ )<sub>res</sub> 의 差는 커지는 것을 알 수 있고 ( $q/p$ )<sub>max</sub> 는 密度에 關係하는 傾向이 뚜렷하나 ( $q/p$ )<sub>res</sub> 는 그다지 影響을 받지 않음을 나타내고 있다. 이러한 現象은 供試體가 最大應力比를 갖는 點을 前後해서 破壞되고 그후 供試體의 內部에는 滑動面이 發生하여 그 面에 變形이 集中하게 되므로 變形의 集中 정도에 따라 殘留應力比는 달라질 수 있기 때문이라고 思料된다.

따라서 平面變形壓縮狀態의 供試體는 軸對稱 應力條件下的 三軸壓縮時보다는 明確한 最大強度를 갖고 破壞이후의 體積變化는 일정한 狀態를 유지하는 變形特性을 나타내고 있다.

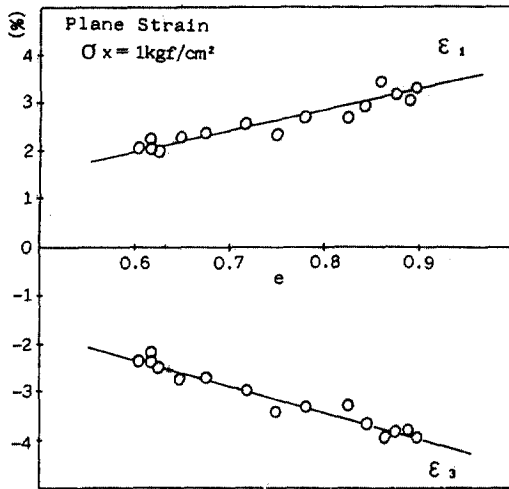


그림3. 破壞時의 間隙比와 主變形( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_3$ )의 關係

한편 供試體의 破壞時의 主變形( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_3$ )의 關係를 同一 拘束壓下의 間隙比別로 比較해 보면 (그림 3 參照) 變形은 間隙比의 增加에 따라  $\epsilon_1$ 은 壓縮의 方向으로  $\epsilon_3$ 는 膨脹의 方向으로 增加함을 알 수 있고 느슨한 모래에서는 密度의 影響을 많이 받고 있다. (12.13)

그림 4는 最大應力比 ( $q/p$ )<sub>max</sub> 와 間隙比 ( $e$ ) 와의 關係를 平面變形試驗의 結果에 對하여 나타내고 있다. 그림에서 最大應力比는 拘束壓의 증가에 따라 약간 減少하는 傾向을 나타내고 있다. 그림에서 最大應力比는 拘束壓에 關係없이 密度가 크면 큰 값을 나타내고 密한 모래일수록 그 影響은 크며

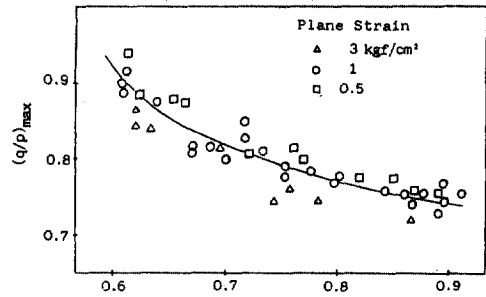


그림 4. 最大應力比-間隙比-拘束壓의 關係

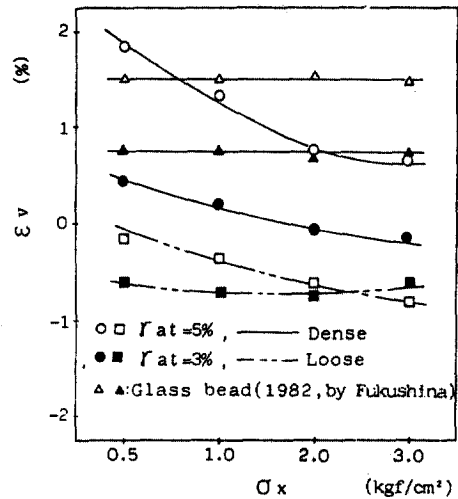


그림 5. 拘束壓과 體積變化의 關係

同一한 密度에서는 拘束壓의 증가에 따라 약간 減少하는 傾向을 나타내고 있다. 強度의 拘束壓 依存性을 알아보기 위하여 剪斷變形이 一定한 값일때 ( $\gamma_{at}=3\%$ ,  $5\%$ )의 體積變化와 間隙比의 關係를 密한 경우와 느슨한 경우로 平均하여 구하고 各各의 拘束壓에 對하여 나타내 보면 (그림 5 參照) 同一한 密度에서는 拘束壓에 따라 體積變化量이 서로 다르며 拘束壓이 낮을 수록 그의 變化는 膨脹側에 있고 同一한 剪斷變形에서의 體積變化도 拘束壓이 낮을 수록 膨脹하고 있음을 나타내고 있으나 Fukushima (1982) 등에 의한 (3) glass bead의 경우는 密한 狀態( $e=0.546$ )의 것만 나타냈지만 拘束壓의 影響은 거의 볼 수 없고 剪斷變形이 진행 (3%에서 6%) 되면서 膨脹側의 體積變化를 나타내고 있다. 또한 Oda (1978) 등에 의한 粒狀體의 排水剪

斷強度에 대한 拘束壓 依存特性을 보면 glass bead와 같이 둥근 粒子로 構成된 試料의 內部摩擦角 ( $\phi_i$ )은 拘束壓에 無關하고 軸對稱應力條件下의 三軸壓縮試驗時보다는 平面變形時의  $\phi_i$ 가 큰 값을 나타내고 있다. 여기서 glass bead와 모래의 排水剪斷強度의 크기를 比較하는 것은 各各의 試料가 粒子의 크기 및 粒度分析 등이 다르므로 별다른 意味가 없지만 glass bead의 應力條件에 따른 排水剪斷特性은 試料가 比較的 均一性을 갖고 있다는 점에 對한 큰 意味를 지닌다고 생각한다.

한편 Schofield (1960)<sup>(8)</sup> 등은 모래와 같은 粒狀體의 應力·變形의 關係를 彈塑性 理論을 도입하여 에너지論의 立場에서 解釋하여 三軸壓縮 供試體內에서 發生한 單立體積當의 全에너지 増分 ( $d_E$ )은 다음과 같이 表現된다고 하였다.

$$d_E = \sigma_1 \epsilon_1 + 2\sigma_3 d\epsilon_3$$

$$= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \frac{2}{3} (\sigma \epsilon_1 \cdot d\epsilon_3) + \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3) \cdot (d\epsilon_1 2d\epsilon_3)$$

$$= q^* \cdot d\epsilon^* + P \cdot d\epsilon_v \quad (5)$$

- 여기서  $q^*$  : 偏差應力
- $P$  : 平均主應力
- $d\epsilon^*$  : 偏差變形増分
- $d\epsilon_v$  : 體積變形増分

(5)式的 全에너지 増分은 回復이 可能한 것 ( $d_r$ : 彈性性分)과 供試體 內部에서 土粒子間의 滑動에 依해서 消費되는 에너지 ( $d_w$ : 塑性性分)의 性分으로 表現할 수 있고 試料가 理想的인 剛塑性 모델로서  $d_r=0$ 이라면 다음과 같이 假定할 수 있다.

$$d_E = d_w = M p d\epsilon^* \quad (6)$$

(6)式에서  $M$ 은 摩擦定數이고 粒子의 滑動摩擦에 依한 에너지 消散을 나타내며 Roscoe (1963)<sup>(9)</sup>의 흙의 限界狀態에 對한 關係式  $q^* = M \cdot P$ 와 連關되며 (5)式과 (6)式으로 부터

$$q^* d\epsilon^* + p \cdot \epsilon_v = d_w = M \cdot P \cdot d\epsilon^* \quad (7)$$

으로 表現되고 (7)式은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q^*/P = M + (-d\epsilon_v/d\epsilon^*) \quad (8)$$

따라서 (8)式은 흙의 破壞規準을 應力比 ( $q^*/p$ ) ~ 變形増分比 ( $d\epsilon_v/d\epsilon^*$ )의 關係로서 規定하는 것이 된다.

그림 6은 平面變形壓縮試驗 結果를 正入面體上

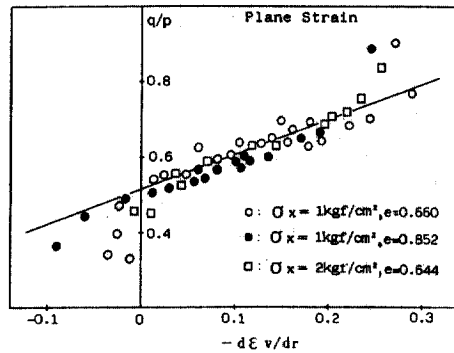


그림 6. 壓力比와 變形増分比의 關係

의 剪斷·垂直應力比 ( $q/p$ ) ~ 體積·剪斷變形増分比 ( $d\epsilon_v/d_r$ )의 關係를 同一한 拘束壓일때의 密한 狀態와 느슨한 狀態를 나타내고, 密한 狀態의 것을 拘束壓別로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이  $q/p \sim -d\epsilon_v/d_r$ 의 關係는 拘束壓 및 모래의 密度와는 關係없이 거의 同一直線上에 表示되고 變形増分比의 增加에 따라 應力比도 커지는 傾向을 나타내고 있다. 本實驗의 結果와 같이 에너지 消散式은 拘束壓, 密度에 無關하지만 三次元應力狀態의 應力·變形의 關係를 간단히 나타낼 수 있다고 본다.

한편 李·朴 (1988)<sup>(10)</sup> 등은 平均主應力 一定條件下의 中間主應力이 모래의 剪斷強度 및 變形에 미치는 영향을 應力經路別로 研究 調查하여 (8)式的 修正式으로서 다음 式이 더욱 타당하다는 것을 立證하였다.

$$q^*/p = M'K \frac{d\epsilon_v}{d_r} \quad (9)$$

여기서  $M'$  및  $K$ 는 應力經路 ( $\theta$ :  $\pi$ 平面에서 最大主應力軸으로 부터의 偏角)에 따라 變하는 값으로서 三軸壓縮狀態에서 最大로 되고 三軸引張狀態에서 最小로 되는 값이다.

그림 7은 平面變形 및 三軸壓縮試驗의 結果와 이미 調查·報告한바 있는<sup>(6)</sup> 비틀림 單純剪斷試驗의 結果에서 얻은 모래의 內部摩擦角 ( $\phi_i$ )과 拘束壓의 關係를 密度가 密한 경우 ( $e=0.65$ )와 느슨한 경우 ( $e=0.85$ )로 區分하여 表示한 것이다.

그림에서 보면  $\phi_i \sim e$ 의 關係는 同一한 密度에서도 拘束壓이 낮을 수록 큰  $\phi_i$ 의 값을 나타내며 同一한 拘束壓下에서는 密度가 크면  $\phi_i$ 가 커지는 傾

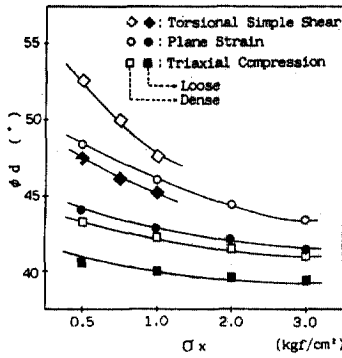


그림 7. 拘束壓과 内部摩擦角의 關係

向을 나타내고 있다. 이는 모래의 剪斷抵抗이 주로 粒子 하나 하나의 方向性 (orientation fabric) 및 粒子間의 相互關係 (packing) 라는 構造的인 條件에 따라 變化하고 한편으로는 體積變化에도 起因하는 것으로서 密한 모래일수록 粒子間의 相互關係에서 摩擦力이 크므로 體積이 膨脹하기 때문에 内部的으로는 消費되는 에너지가 보다 많이 必要하게 되므로 強度가 커지는 것으로 볼 수 있다.

또한 試驗裝置에 따른 剪斷特性은 拘束壓 및 間隙比가 同一한 경우라도 비틀림 單純剪斷時의 内部摩擦角 ( $\phi_s$ )은 平面變形 ( $\phi_{PS}$ ) 및 三軸壓縮時 ( $\phi_{TC}$ )의 값보다 큰 값을 나타내며 拘束壓이 낮을수록 密度의 영향을 많이 받고 三軸壓縮時의 느슨한 모래에서는 拘束壓의 영향이 현저히 둔화됨을 알 수 있다.

또한 비틀림 剪斷時, 本 試驗에서는 拘束壓의 範圍 ( $\sigma_x=0.5, 0.75, 1.0$ )가 比較的 좁지만 낮은 拘束壓下에서는  $\phi_s$ 가  $\phi_{PS}$  및  $\phi_{TC}$  보다 상당히 큰 값을 나타내고 있고 拘束壓의 영향도 크다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 試驗裝置에 따라 剪斷特性이 다른 것은 同一한 間隙比 및 拘束壓의 條件일지라도 供試體의 形狀 및 크기 使用된 試料의 粒子의 形狀, 試料의 堆積面과 最大主應力軸이 이루는 角度 ( $\delta$ ), 中間主應力 파라메타 ( $b$ )<sup>(10)</sup>의 크기 등에 의한 것으로 볼 수 있다.

本 試驗의 경우 中間主應力의 크기는 비틀림 單純剪斷時  $b=0.5$ , 三軸壓縮時는  $b=0$ 이지만 平面變形의 경우는 側方變位 拘束함에 따라 剪斷中 실제

의 應力經路는 變한다는 것을 本人等이 調査한 資料나<sup>(7)</sup> Fukushima<sup>(11)</sup>에 의한 試驗結果를 보더라도 中間主應力의 크기는 대략  $b=0.2\sim 0.5$  정도로 나타나고 있어 各各의 剪斷特性은 달라질 수 있다.

한편 供試體의 剪斷方向에 대하여는 Oda (1978) 등에 의하면 同一한 間隙比의 供試體라도  $\delta=0^\circ$  일때의  $\phi$ 보다  $\delta=90^\circ$  일때의  $\phi_s$ 가 크다는 것을 調査하고  $\delta$ 에 따라 剪斷強度, 體積變形, 剛性等이 다르다고 하였다. 이는 모래는 完全한 球狀體가 아니므로 試料를 堆積할 때 모래의 粒子가 扁平粒子일 경우 粒子의 길이 方向이 일정한 方向으로 配列되는 程度에 따라 粒子間의 接觸面積이 달라지기 때문에 剪斷強度에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 粒子의 方向性에 對해서는 Oda 등<sup>(15)</sup>에 의하여 比較的 扁平한 形狀의 粒子로 構成된 모래를 利用하여 供試體를 作成함에 있어 모래를 堆積시키는 方法에 따라 (즉 扁平粒子의 길이 方向이 水平方向으로 配列되는 程度) 供試體의 構造供方向性 (특히 剪斷強度에 미치는 영향)이 현저함을 調査하였으며 이러한 粒子의 方向性은  $\delta$ 와도 關係하고 있다.

本 試驗의 경우 粒子의 方向性에 對하여는 比較的 均一性을 가지고 있다고 생각 하지만  $\delta$ 에 대하여는 平面變形 및 三軸壓縮時는  $\delta=90^\circ$ 인 반면 비틀림 單純剪斷의 경우는 실제 供試體에 作用하는 最大主應力의 方向을 생각하면  $\delta=45^\circ$ 이므로 剪斷時의 強度는 拘束壓의 영향을 더욱 많이 받을 수 있다.

## 5. 結 論

飽和된 모래의 剪斷舉動에 미치는 拘束壓 및 間隙比의 영향을 調査하고 應力과 變形의 條件이 다른 實驗裝置를 利用하여 얻은 剪斷強度에 대하여 研究分析한 바 다음과 같은 結論을 얻었다.

① 모래의 内部摩擦角 ( $\phi_s$ )은 應力變形의 條件에 關係없이 密度에 比例하고 낮은 拘束壓일수록 큰 값을 나타낸다. 이러한  $\phi_s$ 의 拘束壓 依存性은 同一한 密度의 모래라도 拘束壓이 낮을수록 큰 體積變化를 發生하기 때문이다.

② 同一한 密度의 모래라도 應力과 變形의 條件에 따라  $\phi_s$ 가 拘束壓에 依存하는 特性은 달라  $\phi_{rs}$ 는

$\phi_{PS}$  및  $\phi_{TC}$  에 比하여 낮은 拘束壓下에서 큰 영향을 받는다.

③ 平面變形試驗에 의한  $\phi_u$  는 同一한 密度 拘束壓 條件에서도 三軸壓縮試驗에 의한  $\phi_u$  보다 큰 값을 나타내고 비틀림 單純剪斷에 의한  $\phi_u$  보다 작은 값을 나타내어 應力과 變形的 條件에 따라 모래의 剪斷強度의 大小가 決定됨을 알 수 있다.

④ 모래의 限界狀態를 나타내는 에너지 消散式에 依하면 應力比 ( $q/p$ ) 와 變形 増分比의 關係는 平面變形試驗의 경우 供試體의 拘束壓 및 密度에 關係없이 同一 直線上에 存在한다.

#### 參 考 文 獻

1. 佐藤常三, “彈性·塑性論”, 日刊工業新聞社, 1956, pp.61~82
2. K. Makiuchi & B. Shackel, “Three Dimensional Deformation Laws for a Sand Clay”, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1977, pp.295~300.
3. 福島, 龍岡, “砂とかうスピーズの わじい單純せん斷強度の拘束壓依存性”, 粒狀體力の構成に關する研究會, 1982, pp.181~187.
4. Oda, Koishikawa, “Experimental Study of Anisotropic Shear Strength of sand by plane strain Test”, *Soils and*

*Foundations*, Vol 18, Noll, 1978, pp. 25~28.

5. 小田, 西, “砂の強度異方性” 土質工學研究發表會, 1978, pp.389~392.
6. 卷内, 黒瀧, 朴鎔大, “中空わじい單純せん斷口上る砂のせん斷時性”, 土木學會學術講演會, 1987, pp.229~230.
7. A. N. Shofield & C. p. Wroth, “*Critical State Soil Mechanics*”, McGraw-Hill Book Co. London. 1968.
8. K. H. Roscoe & A. N. Schofield & A. Thrairajah, “An Evaluation of test data for Selecting a field Criterion for Soils”, *Laboratory Shear Testing of Soils*, A.S.T.M Spec. Tech. Publ, 1963, pp. 111-128.
9. 李澄洙, 朴鎔大, “應力經路에 따른 飽和砂의 剪斷特性”, 未發表資料(投稿中)
10. 福島, “ねどりせん斷試驗による砂の變形·強度特性の實驗的研究”, 東京大學博士學位論文, 1983, pp. 417~427
11. D. H Conforth, “Some Experiments on the influence of Strain Conditions on the strength of Sand,” *Geotechnique*, Vol14, No. 2, 1964, pp. 143~167.
12. M. M. Al-Hussaini, “Influence of relative density on the strength and deformation of sand under plane strain conditions”, A.S.T.M. STP. 523, 1973, pp. 332~347
13. P. V. Rade & J. M. Duncan, “Cubical triaxial test on Cohesionless Soil”, *Proc. A.S.C.E.* Vol99, No. SM. 10, 1973, pp. 793~812.
14. 小田, 洪島, 吉戸, “等紡的存砂質土の變形強度特性”, 土質工學研究發表會, 1979, pp. 373~376.

(接受: 1988. 2. 22)