

# 흙의 三軸壓縮試驗에 對하여

柳 基 松\*

## 1. 三軸壓縮試驗의 原理

三軸壓縮試驗은 흙試料의 壓縮強度를 測定하는 試驗의 하나로서 直接剪斷試驗에 比하여 供試體內부의 應力과 變形의 分布를 均一하게 할 수 있고 또 排水條件의 調節도 容易하게 할 수 있는 등 많은 長點을 가지고 있으므로 널리 쓰이고 있다. 그림 1은 代表的인 三軸壓縮試驗裝置 主要部分의 略圖로서 圓筒形의 供試體가 試料臺위에 設置되어 있는 모양이다.

供試體는 얇은 고무막으로 둘러싸여 있으나 供試體內의 空隙水는 上下 多孔板을 通하여 外部로 連結되어 있다. 壓力室은 液體(보통은 물)로서 채워져 있으며 여기에 一定한 壓力를 作用시켜 供試體에 均압을 가하고 壓力室上板을 貫通하고 있는 피스톤에 荷重을 서서히 增加시키면 供試體는 壓縮破壞를 일으키게 된다. 一般의 最小 三個의 供試體를 各기 다른 液壓으로 橫壓을 加하면서 壓縮試驗을 行한다. 이 試驗結果를 利用한 剪斷強度( $\tau$ )와 垂直應力( $\sigma$ ) 사이의 關係로부터 흙의 粘着力( $c$ )과 內部摩擦角( $\phi$ )을 求할 수 있다.

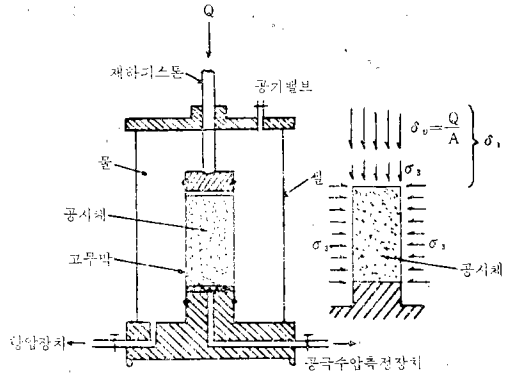


그림. 1. 삼축압축시험기와 응력의 작용

## 2. 三軸壓縮試驗의 種類

三軸壓縮試驗의 基本的인 順序는 다음 2단계로 이루어진다.

- ① 壓力室에 一定한 液壓을 作用시켜 橫壓을 加한다.
- ② 피스톤에 垂直荷重을 서서히 加하여 壓縮應力을 測定한다.

表-1. 三軸壓縮試驗의 排水條件

內 容	方 法		試驗條件의 記號	$c, \phi$ 의 表示
	初 期 壓 密 時	軸 壓 縮 時		
非壓密非排水	供試體內 空隙水의 出入을 完全히 禁한다.	供試體內 空隙水의 出入을 完全히 禁한다.	UU-Test	$C_u, \phi_u$
壓密非排水	供試體內 空隙水의 出入을 自由롭게 出入시킨다.	供試體內 空隙水의 出入을 完全히 禁한다.	CU-Test	$C_{cu}, \phi_{cu}$
壓密排水	供試體內 空隙水를 自由롭게 出入시킨다.	供試體內 空隙水를 自由롭게 出入시킨다.	CD-Test	$C_d, \phi_d$

이 두단계 試驗中 供試體의 排水條件에 따라서 試驗의 種類는 非排水非壓密試驗(UU-Test), 壓密非排水試驗(CU-Test), 壓密排水試驗(CD-Test)의 三種類로 나누어진다(表-1 참조).

이 試驗의 決定은 現地條件에 따라서 다르며 試驗結果는 다음과 같은 條件에 適用된다.

### 가. 非壓密非排水試驗(UU-Test)

上記 두個의 段階에서 試驗前에 供試體를 壓密시키지 않고 또 試驗時에 排水를 시키지 않으면서 試驗하는 方法으로서 그 結果值는 施工中 粘土地盤의 安定이나 支持力計算等 段階의인 設計에 쓰이며, 試

\* 農業振興公社 試驗所

驗順序가 簡單하고 短時間內에 끝낼 수 있다.

現場載荷條件에 類似하고 降伏荷重을 求하기 쉬운 長點이 있다.

나. 壓密非水試驗(CU-Test)

① 段階에서 供試體를 壓密排水시킨후 ② 段階는 非排水狀態로 三軸試驗을 하는 方法으로서 그 結果值는 샌드드레인工法과 같은 現地盤을 壓密시킨 경우에 豫期되는 地盤의 強度를 計算할때 또는 水位急降下時의 斜面安定度檢討에 쓰인다. 두 段階過程에서 供試體에 發生하는 空隙水壓을 測定하던 試驗結果를 有效應力으로 解析할 수 있으며 有效應力으로 나타낸 強度定數는 壓密排水試驗에서 얻어진  $C_d'$ ,  $\phi_d'$ 의 代用으로 쓰일 때가 많다.

다. 壓密排水試驗(CD-Test)

① 段階에서 供試體를 壓密排水시킨후 ② 段階는 排水狀態로 하는 試驗으로서 그 結果值는 모래地盤의 支持力이나 安定 또는 粘土地盤의 長期安定을 檢討하기 위하여 하나, 粘性土의 壓密排水試驗은 長時間이 必要하므로 特別한 경우를 除外하고는 하지 않는다.

② 段階試驗의 軸方向壓縮方法에 따라 分類하면 다음 2가지 方法이 있다.

가. 變形制御法(Strain Control Type)

供試體를 軸方向으로 一定한 速度로 壓縮하여 變形의 速度를 一定하게 하는 方法으로서 試驗操作이 容易하여 가장 많이 쓰이고 있다.

나. 應力制御法(Stress Control Type)

軸方向의 荷重을 一定한 速度로 增加시켜 供試體에 주는 應力을 조금씩 增加시키거나 一定한 間隔마다 一定한 荷重의 增加分을 增加시키는 方法으로서

3. 壓力室의 液壓과 供試體치수

가. 壓力室의 液壓

試料의 強度定數를 求하기 위해서는 數個의 供試體를 만들어 각기 다른 液壓을 加하여 三軸壓縮試驗을 한다. 試驗에 使用하는 液壓은 設計에 必要한 應力의 範圍를 包含하여 0.5kg/cm<sup>2</sup> 또는 1kg/cm<sup>2</sup> 間隙으로 3~6種의 壓力을 使用한다.

나. 供試體치수

供試體의 지름은 使用하는 壓力室試料臺의 지름에 맞는 것으로 해야 하며 一般의 供試體 지름은 3.5cm 以上, 높이는 지름의 2~3倍로 한다.

다짐供試體製作時 흙의 最大粒子는 供試體지름의 1/10以下로 하고 있으나 이는 表-2와 같이 多小 差異가 있다.

4. 試驗記錄

軸壓縮速度(變形制御法)는 每分 供試體 높이에 대한 0.05%~2%의 壓縮變形이 일어나는 速度로 壓縮한다. 變形·荷重記錄은 壓縮初期는 測定間隙을 좁게, 그 후는 드물게 測定하며 試驗의 記錄은 壓縮應力이 最大가 생기는 것이 確認될 때까지, 最大가 나타나지 않을 때는 軸變形이 最初供試體 높이의 20%가 될 때까지 記錄한다. 詳細한 것은 表-2와 같다.

表-2. 三軸壓縮試驗基準

區分	韓國工業標準協會	日本土質工學會	日本土木學會	Department of the U.S. Army Corps of Engineer	American Society for Testing and Materials
1) 供試體의 치수					
지름(D)	$D > 35\text{mm}$	$D = 3.5, 5.0\text{cm}$ 를 標準으로 한다.	$D = 3.5, 5.0\text{cm}$ 를 많이 使用함	$D = 1.4", 2.8", 4.0", 6.0", 12.0", 15.0"$ 가 많이 사용됨	$D > 1.3" (33\text{mm})$
높이(H)	$H = 2D - 3D$	$H = 2D$ 를 標準으로 함	$D = 2.0D \sim 2.5D$	$H > 2.1D, 2.25D$ (#4체에 잔류하는 입자를 포함한 흙일 때)	—
입자의 크기(d)	$d < D/10$ $d < D/6$ (공시체 지름이 70mm 이상일 때)	—	—	$d < D/6$	$d < D/10$ $d < D/6$ (供試體 지름이 2.8" 이상일 때)

2) 軸壓縮速度	UU-Test : 0.5~2.0%/min	UU-Test : 1%/min CU-Test : 1%/min CU-Test : 실트질 점토 : 0.1~0.5%/min 점질토 : 0.05~0.2%/min CD-Test : 透水性 좋은 흙 : 1%/min 細粒分이 있는 흙 : 0.1~0.5%/min (間隙水壓이 생기지 않는 속도)	UU-Test : 1%/min	가소성재료 : 1%/min 3~6%의 軸變形에서 最大 主應力 차가 생기는 부서지기 쉬운 材料 : 0.3%/min	UU-Test : 0.5~2.0%/min
3) 變形-荷重기록	最初供試體 높이 의 0.5% 軸變形까지 는 0.1% 軸變形마다, 1~10%까지는 1%마다, 10% 이상은 2%마다 기록한다.	적당한 壓縮量마다 (예를들면 25mm/100 마다) 기록한다. 압축초기는 測定 間隙을 좁게 하는 것이 좋다.	初期 1% 축변형 까지는 0.2%마다, 그후는 0.25%마다 기록한다.	초기 3% 축변형 까지는 0.3%마다, 그후는 1%마다, 변형이 클 때는 2%마다 기록 한다.	初期 0.5% 軸變形 까지는 0.1%마다, 0.5~3.0%까지는 0.5%마다, 3~10% 까지는 1%마다, 10% 이상은 2% 마다 기록한다.
4) 壓縮試驗 終了	적은 변형에서 破 壞가 생기면 15% 축변형에서, 그의는 20%에서 종료한다.	明確한 破壞가 나 타날때, 푸루빙링 임침이 最大値가 나타나지 않을 경 우에는 15%가 넘을 때	壓縮應力이 最大 를 넘는 것이 確 認될 때, 最大 가 나타나지 않 을 때는 15%가 넘을 때	15%의 軸變形에 到達할 때, 15% 지점에서 계속 主應力差가 감 소하면 20%에 도달할 때	적은 변형에서 破 壞가 생기면 15% 까지 그 의는 20%에 도달할 때
5) 破壞 應力	最大單位 軸荷重 이나 最大 主應 力差, 20% 軸 變形時의 單位 軸荷重이나 主 應力差	$0 \leq \epsilon \leq 15\%$ 범위 에서 主應力差의 最 大值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$	$0 \leq \epsilon \leq 15\%$ 범위 에서 主應力差의 最大值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$	$0 \leq \epsilon \leq 15\%$ 범위 의 最大 主應力 差	最大單位 軸荷 重이나 最大 主 應力差, 20% 軸 變形時의 單位 軸荷重이나 主 應力差

### 5. 試驗結果의 整理

#### 가. 粘着力(c)과 內部摩擦角( $\phi$ )

三軸壓縮試驗에서 觀測한 資料를 가지고 c,  $\phi$ 를 求하는 方法은 Mohr의 應力圓을 利用하는 方法과 縱軸에  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 를, 橫軸에  $\sigma_{3f}$ 를 取한 그래프를 利用하여 求하는 方法이 있다.

#### 가. 主應力差의 計算

$$\sigma_v = (\sigma_1 - \sigma_3) = Q/A$$

여기서  $\sigma_v$  : 主應力差 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_1$  : 最大主應力 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_3$  : 最小主應力 (液壓), (kg/cm<sup>2</sup>)

Q : 피스톤으로부터 供試體에 加해지는 軸荷重 (kg)

A : 壓縮變形( $\epsilon$ )에 對한 供試體의 斷面積 (cm<sup>2</sup>)으로 試驗法에 따라 다음과 같이 求한다.

#### 1) 非壓密非排水試驗(UU-Test)

$$A = A_0 / (1 - (\epsilon/100))$$

여기서  $A_0$  : 試驗前供試體의 斷面積 (cm<sup>2</sup>)

$\epsilon$  : 軸方向壓縮變形 (%)

#### 2) 壓密非排水 및 壓密排水試驗(CU-Test, CD-Test)

$$A = A_c \times \frac{1 - (\Delta V/V_c)}{1 - (\epsilon/100)}$$

여기서  $A_c$  : 所要의 液壓( $\sigma_3$ )으로 壓密시킨후의 斷面積 (cm<sup>2</sup>)

$$A_c = V_c / H_c$$

$$H_c = H_0 - \Delta H \text{ 또는}$$

$$H_c = (1 - \Delta V_c / 3V_c) H_0$$

$H_0$  : 試驗前 供試體의 높이 (cm)

$H_c$  : 所要의 液壓으로 壓密시킨후의 높이 (cm)

$\Delta H$  : 所要의 液壓으로 壓密시킨 후의 壓密에 의한 供試體의 軸壓縮量 (cm)

$V_c$  : 所要液壓으로 壓密시킨후 軸方向壓縮直前의 供試體體積 (cm<sup>3</sup>)

$$V_c = V_0 - \Delta V_c$$

$V_0$  : 所要 液壓으로 壓密시키기 前 供試體

의 體積( $\text{cm}^3$ )

$4V_c$ : 所要의 液壓으로 壓密시킨 後의 供試體積壓縮量( $\text{cm}^3$ )

$4V$ : 軸方向 壓縮力에 依한 供試體의 體積 壓縮量( $\text{cm}^3$ )

나.  $c, \phi$ 의 決定

1) Mohr의 應力圓에 依한 方法

이 方法은 橫軸에  $\sigma_3$ 와 이에 對한 最大主應力差  $\sigma_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} + \sigma_3$ 를 푸르트하고 이 두 點間을 지름으로 하는 Mohr의 應力圓을 그려 이들 Mohr圓에 共通으로 接하는 接線으로부터  $c, \phi$ 를 求하는 方法(全應力으로 解析할 때)으로 그림 2와 같이 求하며 排水條件에 따라  $c, \phi$ 를 決定하는 方法은 表-3과 같다.

有效應力에 依하여  $c, \phi$ 를 決定할 때 는 그림. 2의  $\sigma_3$ 와  $\sigma_1$ 에서 試驗中에 供試體에 生기는 空隙水壓( $u$ )를 빼고 各 供試體에 對한 Mohr圓을 그려 이에 共通으로 接하는 接線으로부터 그림. 3과 같이  $c', \phi'$ 를

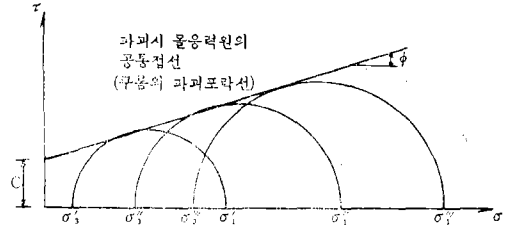


그림. 2. 흙의 응력원으로  $c, \phi$ 를 구하는 방법(전 응력일 때)

求한다.

2) 橫軸에  $\sigma_{3f}$  縱軸에  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 를 取한 그래프에 依한 方法

破壞時의 最小主應力  $\sigma_{3f}$ 를 橫軸에, 主應力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 를 縱軸에 取하여 試驗結果를 그림 4와 같이 푸르트하여 이 直線의 勾配를  $m_o$ , 縱軸의 切片을  $f_o$ 로

表-3. 배수조건과  $c, \phi$ 의 결정방법

시험조건	흙의상태	전 응 력	유 효 능 력
비압밀 비배수	포화		유효응력으로 나타내면 파괴 응력원은 하나밖에 얻어 지지 않는다.
	비포화		
압밀 비배수	포화		
	비포화		$C_d \doteq C'$ $\phi_d \doteq \phi'$

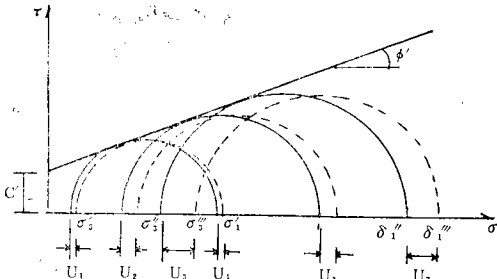


그림. 3. 물의 응력원으로  $c', \phi'$ 를 구하는 방법 (유효응력일 때)

하면

$f_o = 2c \cdot \cos\phi / (1 - \sin\phi)$ ,  $m_o = 2\sin\phi / (1 - \sin\phi)$ 로 된다. 따라서 아래의 식으로  $c, \phi$ 를 求한다.

$$\sin\phi = m_o / (2 + m_o)$$

$$C = f_o / 2 \sqrt{1 + m_o}$$

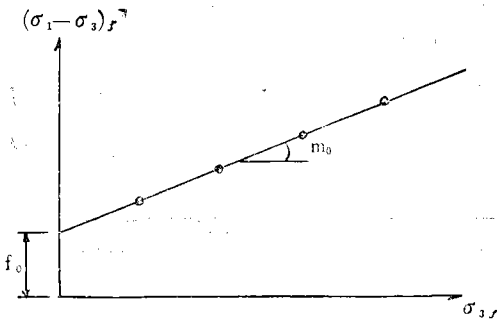


그림. 4.  $(\sigma_1 - \sigma_3)_x$ 와  $\sigma_{3x}$ 의 관계에서  $c, \phi$ 를 구하는 방법

### 나. 變形係數

變形係數는 應力-變形曲線上에서 主應力差最大値의 1/2에 對한 點과 原點을 連結한 直線의 勾配로서 다음 式으로 나타낸다(그림 5 참조).

$$E_{s0} = \frac{\sigma_{vm\max} / 2}{\epsilon_+ / 100}$$

여기서  $E_{s0}$ : 變形係數(kg/cm<sup>2</sup>)

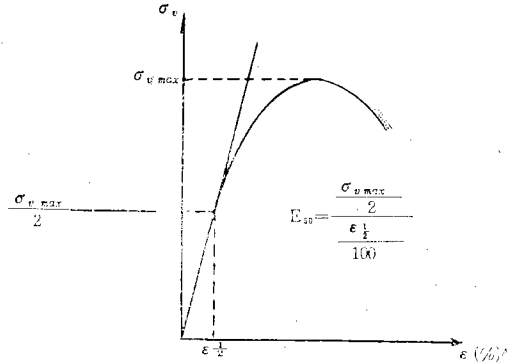


그림. 5. 變形係數( $E_{s0}$ )

$\sigma_{vm\max}$ : 最大主應力差(kg/cm<sup>2</sup>)로  $\sigma_{vm\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$

$\epsilon_+$ : 最大主應力差의 1/2에 對한 變形(%)

軟弱粘土地盤에 盛土하면 壓密沈下와는 別個로 剪斷變形에 따른 即時沈下가 생긴다. 이 即時沈下를 추정할 때 變形係數를 利用할 수 있으며 이것은 一軸壓縮試驗에서도 추정할 수 있다.

### 다. 破壞時의 空隙水壓係數

破壞時의 空隙水壓係數는 破壞時의 主應力差와 그에 測定한 空隙水壓과의 比로서 다음 式으로 나타낸다.

$$A_f = U_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$$

여기서  $A_f$ : 破壞時의 空隙水壓係數

$U_f$ : 破壞時의 空隙水壓(kg/cm<sup>2</sup>)

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ : 破壞時의 主應力差(kg/cm<sup>2</sup>)

空隙水壓係數를 알면 安定計算에서 破壞時의 過剩水壓發生을 推定할 수 있다.