

# 0 | 흙의 전단강도

## 8

### 8.1 개설

- 활동면(sliding surface), 파괴면(failure surface) : 흙이 하중을 받아 내부에 전단력(shear force)이 발생하면 일정한 면에 대하여 활동하며 파괴에 이르는데 이때 파괴가 발생하는 면
- 전단응력(shear stress): 파괴면 상부에는 토괴(soil mass)의 자중이나 상부하중(surface force)으로 인하여 나타나는 단위면적당의 전단력.
- 전단저항력(shear resistance) : 흙이 전단응력을 받아 나타나는 활동면에서 저항력
- 전단강도(shear strength) : 흙 내부의 임의면을 따라 활동을 일으키는 전단응력에 저항하는 단위면적당 최대저항력.

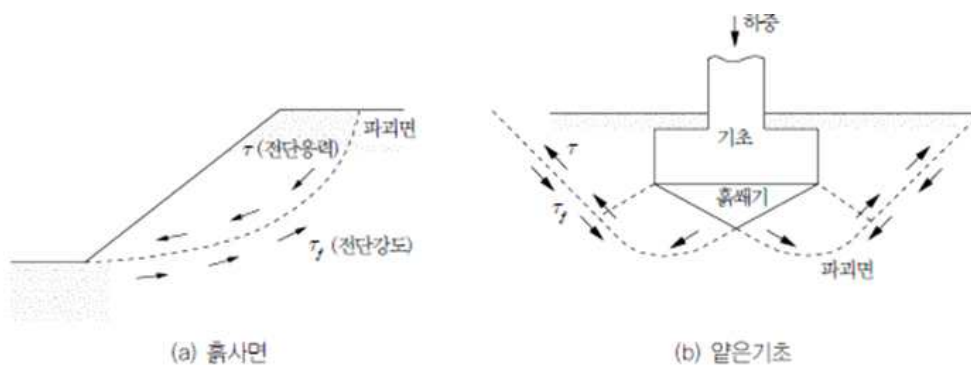


그림 8.1 흙구조물에 나타나는 전단응력과 파괴면

### 8.1.1 응력과 Mohr원

$$\begin{aligned}\text{수직응력} : \sigma &= \sigma_1 \frac{1 + \cos 2\theta}{2} + \sigma_3 \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta\end{aligned}\quad (8.1)$$

$$\text{전단응력} : \tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (8.2)$$

원의 방정식 :

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \quad (8.3)$$

식 8.3의 원을 수직응력( $\sigma$ )을  $x$ 축으로 전단응력( $\tau$ )을  $y$ 축으로 하여 도시하면 그림 8.4와 같이 중심이  $(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, 0)$ 이고 반경이  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 인 원이 그려지는데 이를 Mohr원이 라고 한다.

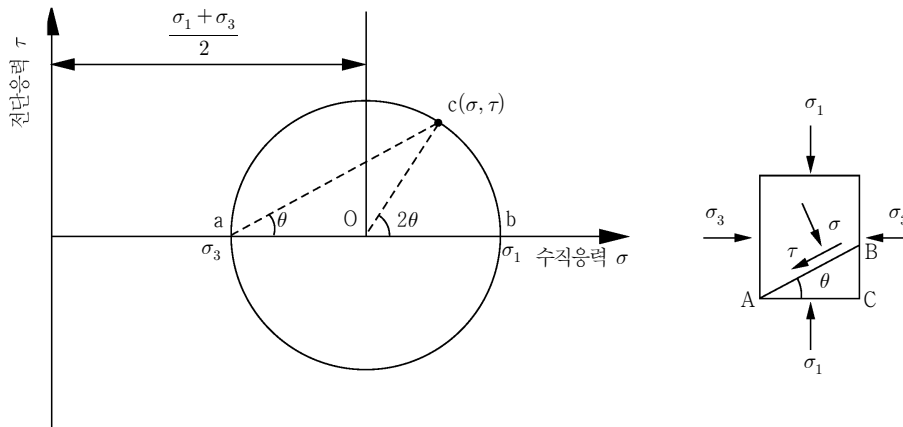


그림 8.4 Mohr원의 작도

### 8.1.2 평면기점(또는 극점)

- 평면기점(origin of plane) 또는 극점(origin of pole)이란 응력과 응력작용면의 방향을 아는데 필요하며  $O_p$ 로 표시한다.

- 평면기점은 다음과 같은 특성이 있다.

(1) 최소주응력이 표시되는 좌표에서 최소주응력이 작용하는 면과 평행하게 그은 선이 Mohr원과 만나는 점이 평면기점( $O_p$ )이다.

(2) 평면기점으로부터 임의의 평면에 평행하게 그은 선이 Mohr원과 교차하는 점의

좌표는 그 임의 평면에 작용하는  $(\sigma, \tau)$ 을 나타낸다.

(2)의 특성을 역으로 해석하면  $(\sigma, \tau)$ 를 아는 임의 평면으로부터 평면기점을 역으로 추적할 수 있다. 즉 Mohr원상에  $(\sigma, \tau)$ 을 표시한 후 임의평면에 평행하게 직선을 그어 Mohr원과 만나는 점이 평면기점이다.

#### 예제 8.1

다음 그림과 같이 주응력  $\sigma_1=4.0\text{t/m}^2$ ,  $\sigma_3=2.0\text{t/m}^2$ 이 작용하고 있다. 수직면에서  $30^\circ$  시계반대방향으로 기울어진 면 B-B에 작용하는 응력을 계산하여라.

- 1) 극점 이용
- 2) 공식 이용

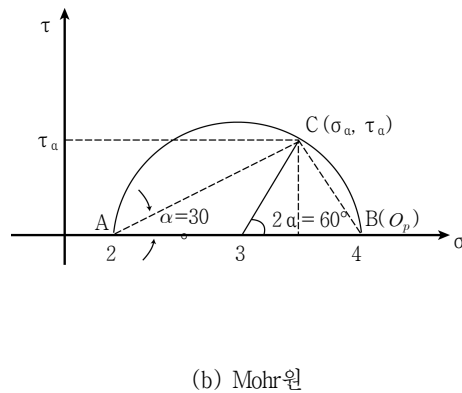
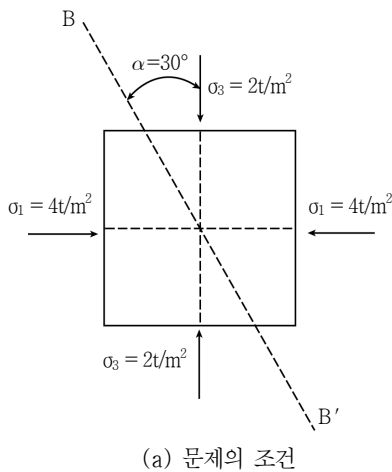


그림 8.5 예제 8.1

#### 풀이

- 1) 극점 이용

본 문제의 최소주응력이 작용하는 면은 수평이며 최소주응력  $\sigma_3=2.0\text{t/m}^2$ 에 해당하는 점은 A이다. A에서 최소주응력이 작용하는 면과 수평한 선을 작도하면 Mohr원과 만나는 점은 B이며 이점은 평면기점  $O_p$ 이다. 평면기점으로부터 수평 B-B'선에 작용하는 응력면은 BC이고 C점은 면 B-B'에 작용하는 응력점이다.

$$\sigma = 3.5\text{t/m}^2, \quad \tau = 0.87\text{t/m}^2$$

- 2) 공식 이용

식 8.1과 8.2를 이용하여 계산하면

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha = \frac{4+2}{2} + \frac{4-2}{2} \cos 60^\circ = 3.5\text{t/m}^2$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha = \frac{4-2}{2} \sin 60^\circ = 0.87\text{t/m}^2$$

## 예제 8.2

다음 그림과 같이 연직응력  $\sigma_y = 10\text{kN/m}^2$ , 수평응력  $\sigma_x = 5\text{kN/m}^2$ 이 작용하고 있으며 상하좌우면에 전단응력  $\tau_{xy} = 2\text{kN/m}^2$ 이 작용한다. 수평면에서  $50^\circ$  시계방향으로 기울어진 면 B-B'에 작용하는 응력을 계산하여라(부록 3-2의 식 이용).

- 1) 극점 이용
- 2) 공식 이용

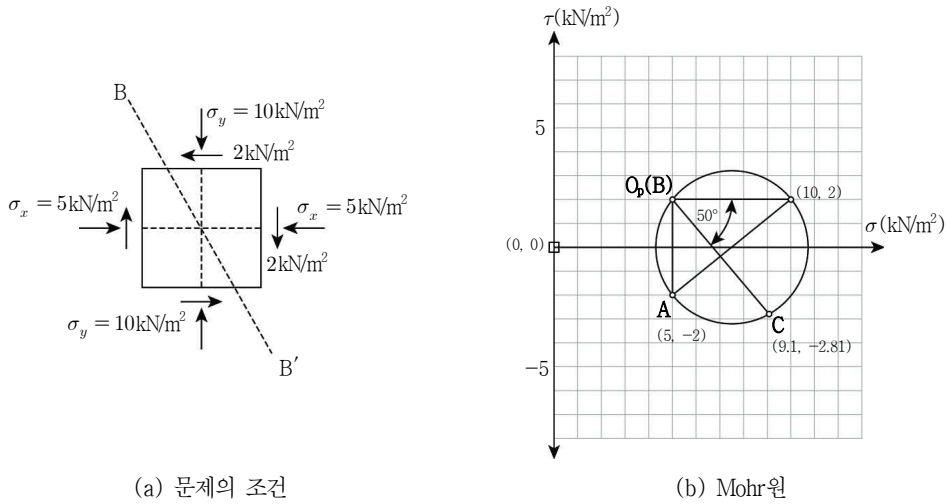


그림 8.8 예제 8.2

## 풀이

- 1) 극점 이용

본 문제의 응력  $\sigma = 5\text{kN/m}^2$ ,  $\tau = -2\text{kN/m}^2$ 이 작용하는 면은 수직이며 이에 해당하는 Mohr 응력원상의 점은 A이다. A에서 응력이 작용하는 면과 평행한 선을 작도하여 Mohr 원과 만나는 점은 B이며 이점은 평면기점  $O_p$ 이다. 평면기점으로부터 수평 B-B' 선에 작용하는 응력면은 BC이고 C점은 면 B-B'에 작용하는 응력점이다.

$$\sigma_n = 9.1\text{kN/m}^2, \tau_n = 2.81\text{kN/m}^2$$

- 2) 공식 이용

식 A8.7과 A8.8을 이용하여 계산하면

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \\ &= \frac{10 + 5}{2} + \frac{10 - 5}{2} \cos \{2 \times (-50)\} + (-2) \times \sin \{2 \times (-50)\} \\ &= 7.5 + 2.5 \times (-0.17) - 2 \times (-0.985) = 9.1\text{kN/m}^2 \\ \tau_n &= \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \\ &= \frac{10 - 5}{2} \sin (2 \times (-50)) - [(-2) \times \cos (2 \times (-50))] \\ &= 2.5 \times (-0.985) + 2 \times (-0.174) \\ &= -2.46 - 0.35 = -2.81\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

예제 8.3

식 (8.3)과 식 (8.4) 및 극점을 이용하여 그림 8-5(a), (b), (c), (d)와 같은 응력을 받는 요소에서 면  $EF$ 에 작용하는 수직응력과 전단응력을 구하라.

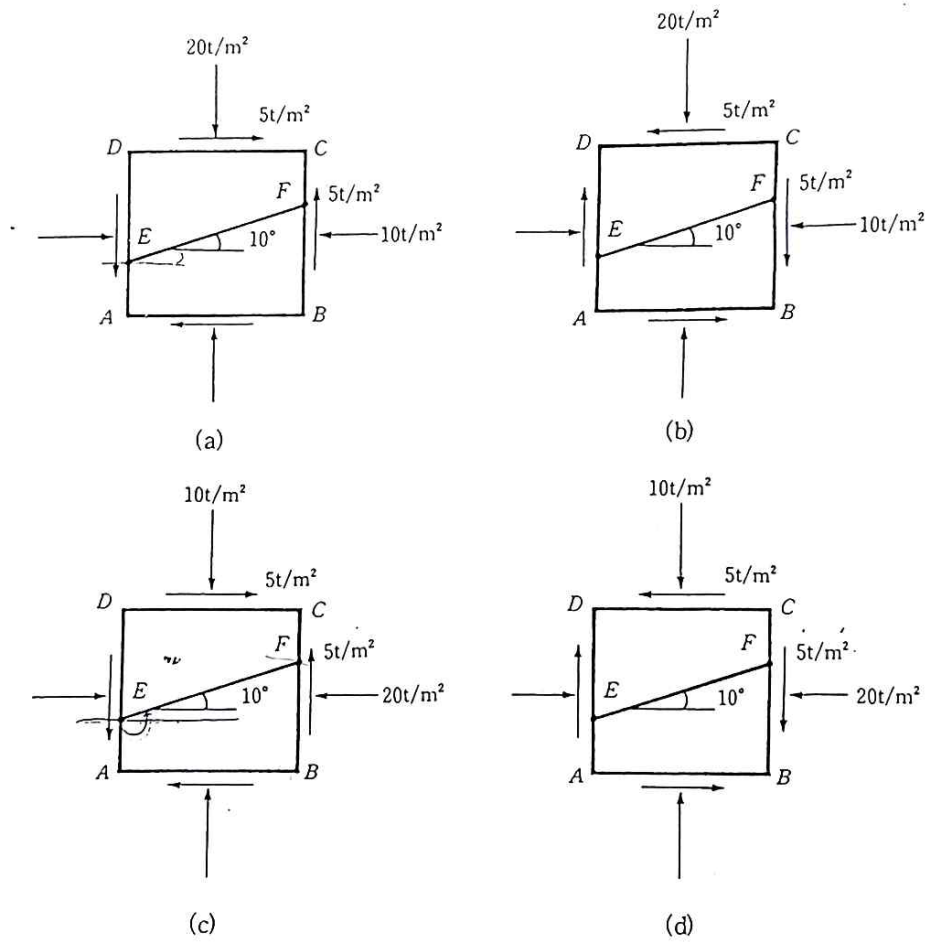
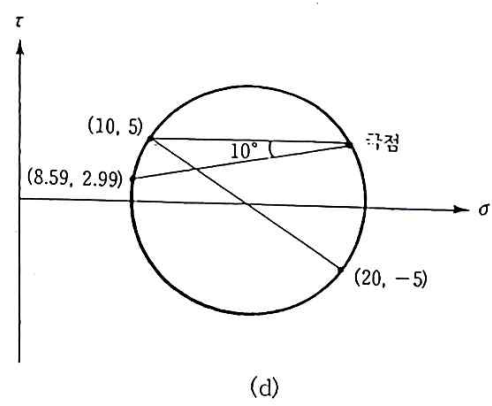
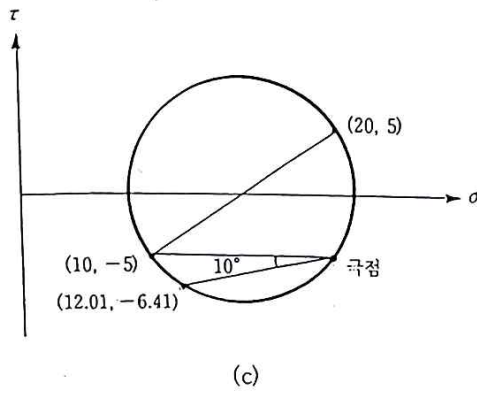
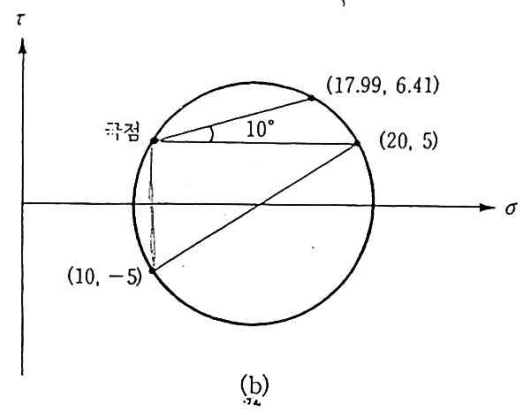
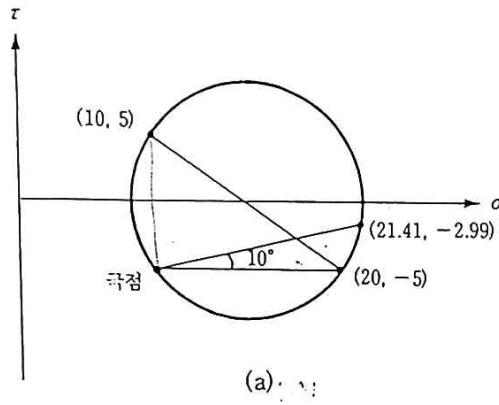


그림 8-5 예제 8.3

(2) 극점 이용



Ⅱ (1) 공식 이용

(a)  $\sigma_y = 20\text{t/m}^2$ 가 작용하는 면  $AB$ 와 면  $EF$ 의 반시계방향 경사각  $\theta = 10^\circ$

$$\sigma = \frac{20+10}{2} + \frac{20-10}{2}\cos(2 \times 10) + 5\sin(2 \times 10) = 21.41\text{t/m}^2$$

$$\tau = \frac{20-10}{2}\sin(2 \times 10) - 5\cos(2 \times 10) = -2.99\text{t/m}^2$$

(b)  $\sigma_y = 20\text{t/m}^2$ 가 작용하는 면  $AB$ 와 면  $EF$ 의 반시계방향 경사각  $\theta = 10^\circ$

$$\sigma = \frac{20+10}{2} + \frac{20-10}{2}\cos(2 \times 10) - 5\sin(2 \times 10) = 17.99\text{t/m}^2$$

$$\tau = \frac{20-10}{2}\sin(2 \times 10) + 5\cos(2 \times 10) = 6.41\text{t/m}^2$$

(c)  $\sigma_y = 20\text{t/m}^2$ 가 작용하는 면  $AD$ 와 면  $EF$ 의 반시계방향 경사각  $\theta = 100^\circ$

$$\sigma = \frac{20+10}{2} + \frac{20-10}{2}\cos(2 \times 100) - 5\sin(2 \times 100) = 12.01\text{t/m}^2$$

$$\tau = \frac{20-10}{2}\sin(2 \times 100) + 5\cos(2 \times 100) = -6.41\text{t/m}^2$$

(d)  $\sigma_y = 20\text{t/m}^2$ 가 작용하는 면  $AD$ 와 면  $EF$ 의 반시계방향 경사각  $\theta = 100^\circ$

$$\sigma = \frac{20+10}{2} + \frac{20-10}{2}\cos(2 \times 100) + 5\sin(2 \times 100) = 8.59\text{t/m}^2$$

$$\tau = \frac{20-10}{2}\sin(2 \times 100) - 5\cos(2 \times 100) = 2.99\text{t/m}^2$$

※ 최대 주응력 면에서 전단응력의 방향 :

시계방향이면 (+),

반 시계방향이면 (-)

## 8.2 Mohr-Coulomb 파괴이론

- 흙의 전단강도 : 흙 내부의 임의의 면을 따라 활동을 일으키려 하는 전단응력에 저항하는 단위면적당 최대저항력.
- Mohr는 파괴 시 활동면에서 나타나는 전단응력이 파괴면상의 수직응력의 어떤 함수에 도달할 때 파괴에 이른다는 사실.

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (8.4)$$

- Mohr : 곡선형태의 파괴포락선(failure envelope),

파괴포락선상의 모든 점은 주어진 수직응력에 대하여 전단응력이 도달할 수 있는 한계를 의미.

- Coulomb(1776) : Mohr가 제안한 파괴포락선이 실제 공학적 활용을 위해서는 이를 근사화한 직선으로 표시하는 것이 훨씬 편리하다고 주장함.

직선화하고 그 직선의 수직축 절편과 기울기를 점착력(cohesion,  $c$ )과 내부마찰각(internal friction angle) 또는 전단저항각(angle of shearing resistance,  $\phi$ )으로 정의.

- Mohr-Coulomb 파괴기준(failure criterion).

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (8.5)$$

여기서  $\tau_f$ 는 흙의 전단강도,  $\sigma$ 는 수직응력,  $c$ 는 점착력,  $\phi$ 는 내부마찰각.

- 점착력과 내부마찰각은 흙의 전단강도를 결정, 강도정수(strength parameter)라고 부름.

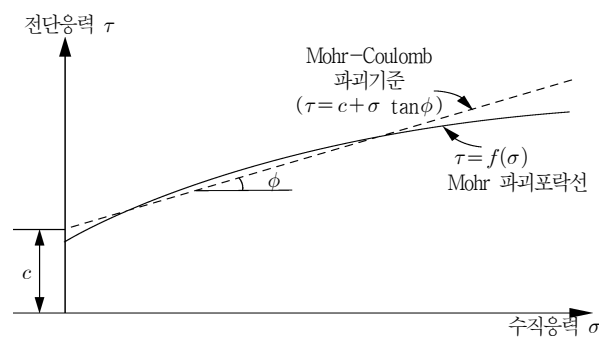


그림 8.7 Mohr-Coulomb 파괴포락선

- 유효응력 :

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (8.6)$$



여기서  $c'$ ,  $\phi'$ 은 유효응력으로 표시한 점착력과 내부마찰각,  $\sigma'$ 은 유효수직응력. 모래와 실트, 정규압밀점토는 점착력  $c \approx 0$ 이며 과압밀점토는  $c(>0)$ 인 값을 갖음.

● 전단파괴면의 경사( $\theta$ )를 구하기 위한 Mohr원.

- D점은 Mohr-Coulomb 파괴포락선과 접하는 점, 시료 파괴 시 전단파괴면의 ( $\sigma_f$ ,  $\tau_f$ ).
  - 최대 및 최소주응력이 작용하는 상태 :
    - 최소주응력이 작용하는 면과 최소주응력점이 만나는 A가 평면기점( $O_p$ ).
    - 평면기점과 파괴면의 좌표 D점을 연결하는 직선 AD가 전단파괴면.
    - 삼각형 OCD에서  $\angle DOC = \phi$ ,  $\angle ODC = 90^\circ$ 이고  $\angle OCD = 180^\circ - 2\theta$ .
- 따라서 계산된 삼각형 내각의 합 :

$$\phi + 90^\circ + (180^\circ - 2\theta) = 180^\circ \quad (8.7)$$

$$\theta = \frac{90^\circ + \phi}{2} = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (8.8)$$

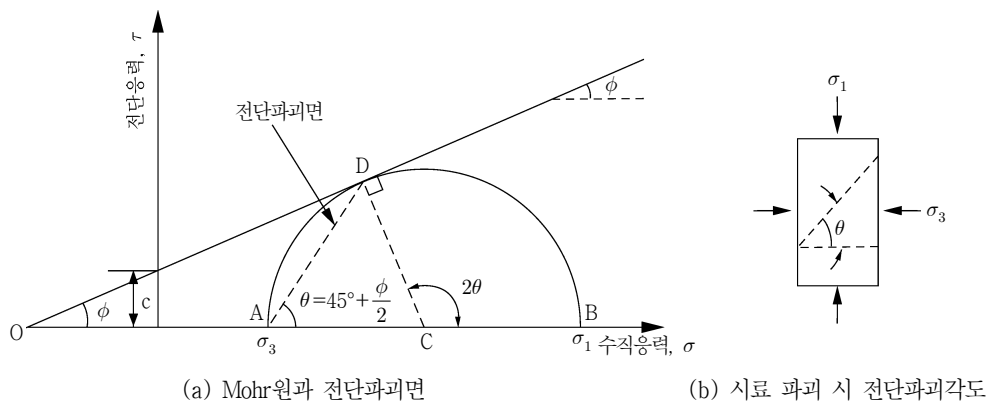


그림 8.8 Mohr원과 전단파괴면의 경사

### 8.3 흙의 전단강도를 구하는 시험

- 흙의 전단강도를 구하는 방법 : 1) 실내시험(laboratory test)
  - 2) 현장시험(field test), 원위치시험(in-situ test)
  - 3) 경험적 추정법.
- 실내 강도시험 : 1) 직접전단시험(direct shear test),
  - 2) 일축압축시험(uniaxial compression test),
  - 3) 삼축압축시험(triaxial compression test).

- 현장 강도시험 : 1) 표준관입시험,  
2) 콘관입시험,  
3) 베인시험,  
4) 공내재하시험 등 (제9장에서 소개)

### 8.3.1 직접전단시험

- 직접전단시험(direct shear test) :  
상하로 분할된 철제상자 내에 흙시료를 넣고 1개의 전단면에 따라 전단하는 시험.  
규격 : 6cm×6cm, 높이는 2cm.

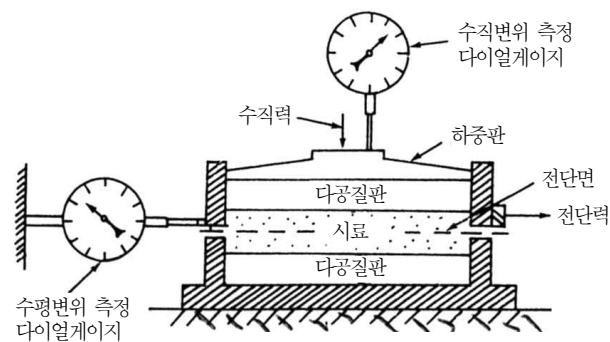


그림 8.9 직접전단시험 장치의 개요

- 직접전단시험으로 조밀한 모래(dense sand)에 대한 수평변위와 전단응력의 관계 :  
수직력이 증가함에 따라( $p_1 < p_2 < p_3$ ) 전단력( $T$ )이 증가하므로,  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ 의 관계.

[Digital Direct/Residual Shear Apparatus cor](#)

Product Codes: 26-2114/01, 26-2114/02



**Shear Box Assembly 100 mm<sup>2</sup>**

Product Code: 26-2197

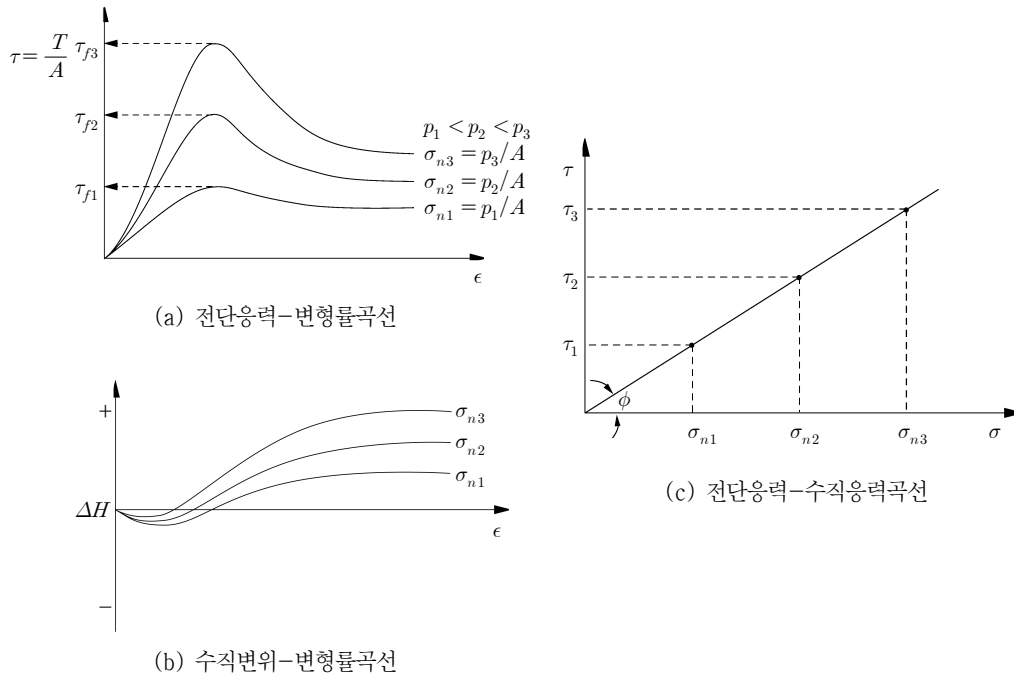


그림 8.10 직접전단시험 결과

- 조밀한 모래(그림 8.10b) :

전단 초기에는 약간 수축하는 모습을 보이다가 팽창하는 모습을 보인다.

이는 모래가 전단되는 과정에서 흙입자 상호간에 엮여 있는 상태가 풀리면서 입자가 회전 활동하며 다른 입자를 넘어 전단변위가 일어나므로 발생하는 현상.

- 느슨한 흙 :

흙이 전단되면서 체적이 감소되어 곡선이 가로축 아래에 그려짐(그림 8.21b 참조).

- 그림 8.10c는 그림 8.10a의 3개 곡선으로부터 수직응력과 최대전단응력점( $\tau_{f1}$ ,  $\tau_{f2}$ ,  $\tau_{f3}$ ) 취함.

이 선의 세로축의 절편과 각도를 재면 점착력( $c$ )과 내부마찰각( $\phi$ )을 구함.

• 직접전단시험은 조작이 간단하고 경제적이지만 다음과 같은 문제점 :

- ① 전단면에 응력분포가 불균일하며 최대전단면이 아닌 임의 면에서 강제로 전단됨.
- ② 시험을 시작할 때 주응력의 방향은 연직과 수평이지만, 전단 시에는 이 방향이 틀어지는 문제점발생(그림 8.11).
- ③ 시험을 수행하는 동안 간극수압의 측정이 곤란하기 때문에 유효응력으로의 변환 어렵고 상하 다공질판을 불투수판으로 교체하여 비배수시험을 할 수 있으나, 삼축압축시험에서처럼 배수조건 철저조절 불가.

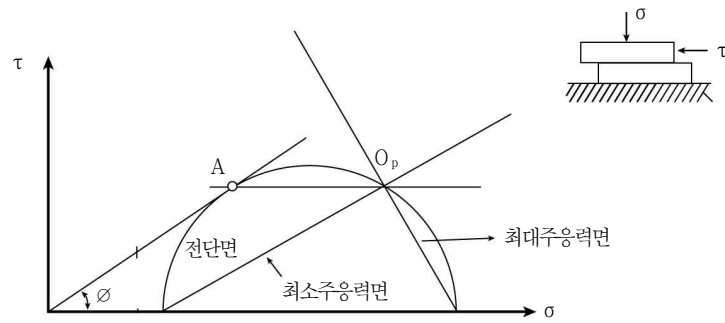


그림 8.10 직접전단시험으로 파괴될 때의 주응력방향의 변화

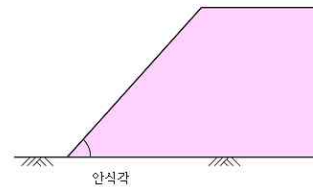
#### <안식각(angle of repose)>

##### 1) 개요

- ① 안식각이란 흙이나 모래 따위를 쌓아 올릴 때, 사면이 안정을 유지할 수 있는 최대경사각을 말하며, 자연경사각 또는 휴식각이라고도 한다.
- ② 안식각은 함수비, 입자크기와 입도분포 등의 영향을 받는다.

##### 2) 측정방법

- ① 실험적으로는 낮은 높이에서 조금씩 모래를 뿌려서 사면을 만들고 그 각도를 재거나,
- ② 용기 중에 건조모래의 사면을 만들어 두고 그 경사를 증가시켜 가며 활동을 일으키기 직전 또는 직후의 사면각도를 재서 안식각으로 한다.



##### 3) 특 징

- ① 흙과기의 경사각 = 안식각  $\times 2$
- ② 느슨하고 건조한 모래는 내부마찰각과 안식각이 거의 같음
- ③ 특히 흙이 다져져 있거나 다소의 함수량이 있거나 또는 사면길이에 비하여 입경이 무시할 수 없는 정도로 크거나(그의 극단적인 예는 돌쌓기가 있다)하면 겉보기점착력(입자의 맞물림 포함)이 생겨 그 흙의 내부마찰각보다 상당히 급한 경사각으로 안정을 이루게 되는데 이것은 안식각이라 할 수 없다.

## ADSP Dam Safety Survey (Swar Dam)

---



## Swar Dam Spillway Collapse(29<sup>th</sup> August 2018)

---



Duck Bill Spillway



Collapse & Overflow



Duck Bill Spillway



Collapse & Overflow



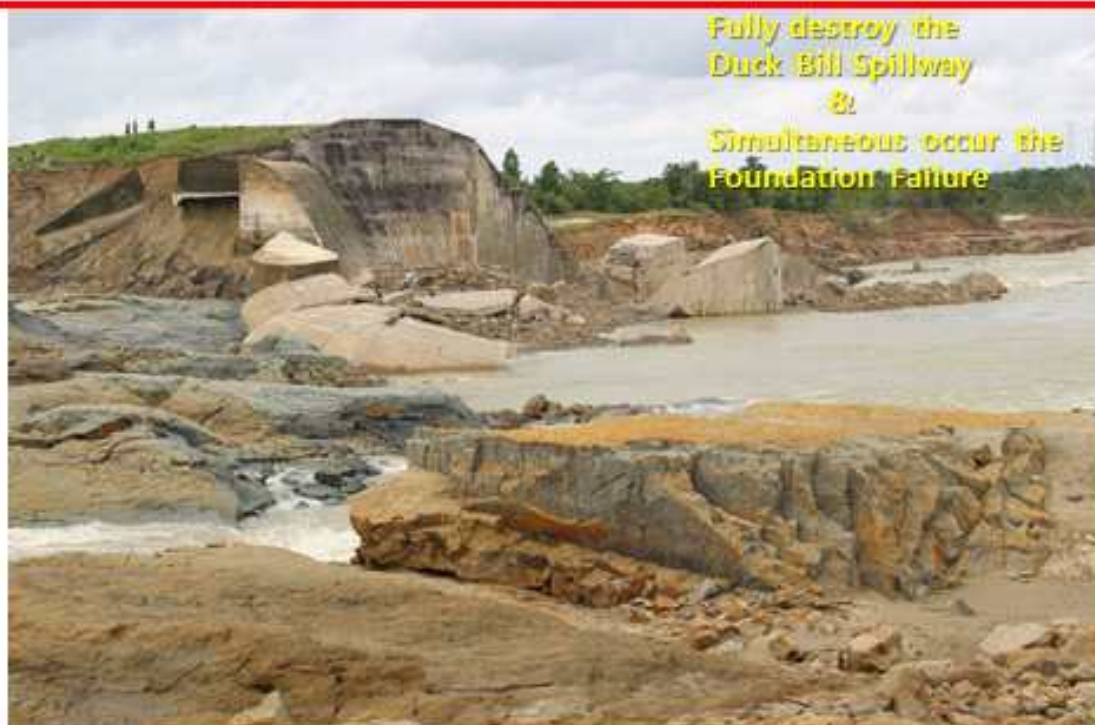
## After Swar Dam Spillway Collapse (30<sup>th</sup> August 2018)

---

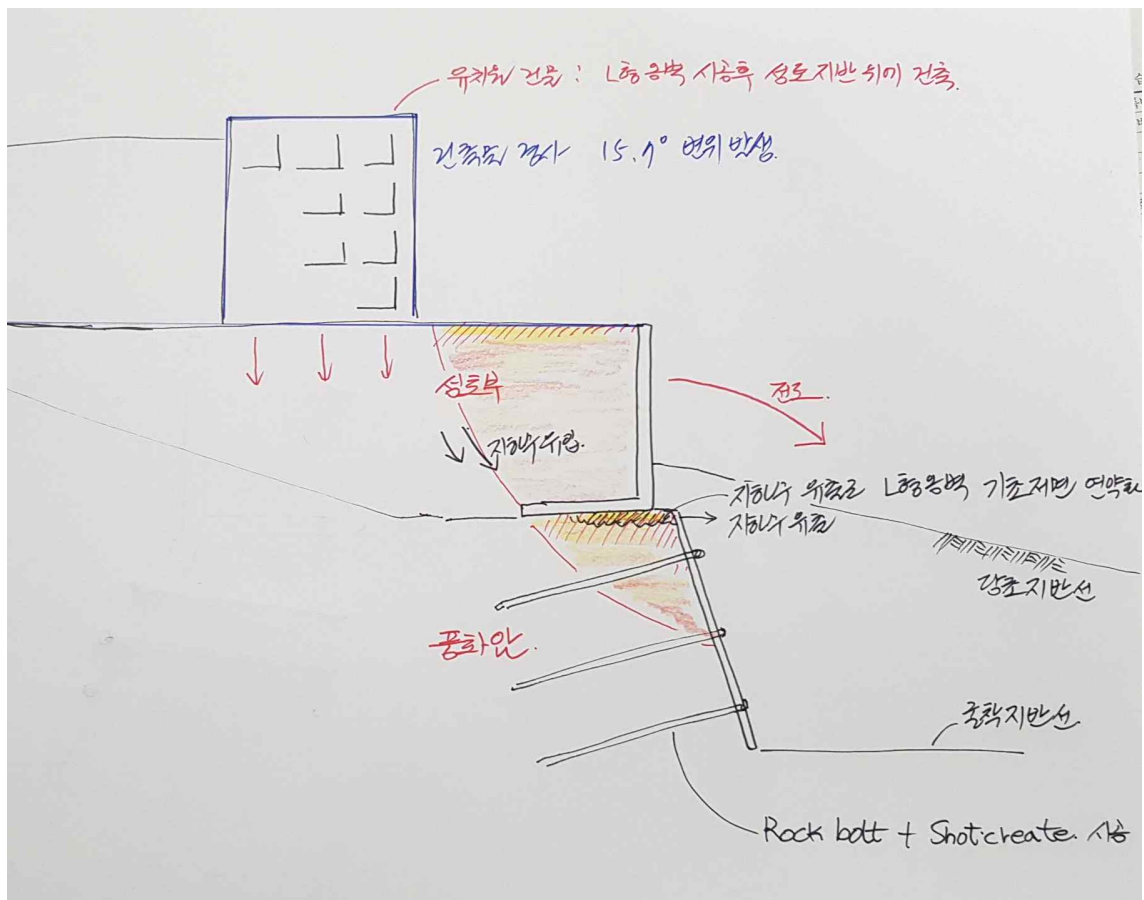


## After Swar Dam Spillway Collapse (30<sup>th</sup> August 2018)

---



## After Swar Dam Spillway Collapse (30<sup>th</sup> August 2018)



### 예제 8.2

건조한 사질토에 대하여 직접전단시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 전단박스의 크기는 6cm×6cm×2cm이다.

수직력(kN)	파괴 시 전단력(kN)
0.18	0.14
0.72	0.51
1.08	0.75

- 1) 이 흙의 전단강도 정수를 구하여라.
- 2) 이 모래 내부에 전단응력이 120kN/m<sup>2</sup>이고 수직응력이 225kN/m<sup>2</sup>인 점에서 파괴발생 여부를 검토하여라.

### 풀 이

- 1) 수직응력과 파괴 시 전단응력으로 환산하면

수직력 (kN)	수직응력, $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 전단력 (kN)	파괴 시 전단응력, $\tau_f$ (kN/m <sup>2</sup> )
0.18	50	0.14	38
0.72	200	0.51	142
1.08	300	0.75	208

$$A = 0.06 \times 0.06 = 3.6 \times 10^{-3}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{0.18}{(0.06)^2} = 50$$

계산 결과를 그림 8.11에 나타내었으며 여기에서 점착력 0, 내부마찰각  $\phi=35^\circ$ 를 구할 수 있다.

- 2)  $\sigma=225\text{kN/m}^2$ ,  $\tau=120\text{kN/m}^2$ 인 점(A)은 파괴포락선 아래에 작도되므로 파괴는 발생하지 않는다.

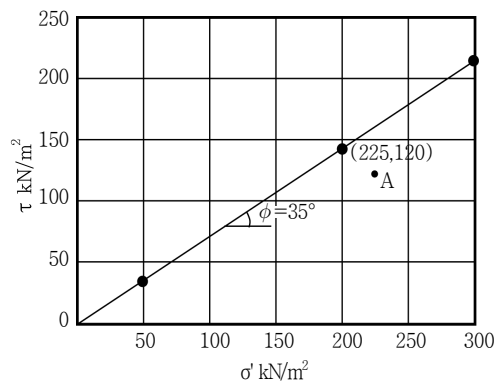


그림 8.11 예제 8.2

### 예제 8.3

어떤 느슨한 모래질 실트에 대하여 수직응력  $\sigma=10.0\text{kN/m}^2$ 을 가하고 직접전단시험을 실시한 결과 파괴 시 전단응력은  $\tau_f=4.0\text{kN/m}^2$ 이었다. 다음을 계산하여라.

- 1) 대상 흙의 내부마찰각  $\phi$ ,
- 2) 시료 파괴면의 각도  $\theta$ ,
- 3) 최대 및 최소주응력

### 풀 이



수직응력-전단응력 좌표계에 파괴 시 수직응력과 전단응력점을 찍어 D라 한다(그림 8.12 참조). D점을 통과하는 파괴포락선을 긋고 파괴면 OD의 D점으로부터 수선 CD를 작도한다. 수평축과의 교점 C로부터 CD를 반지름으로 Mohr원을 작도한다. D점에서 Mohr원은 파괴포락선에 접한다. D점에서 수직응력좌표계에 수선을 그어 E점을 잡는다.

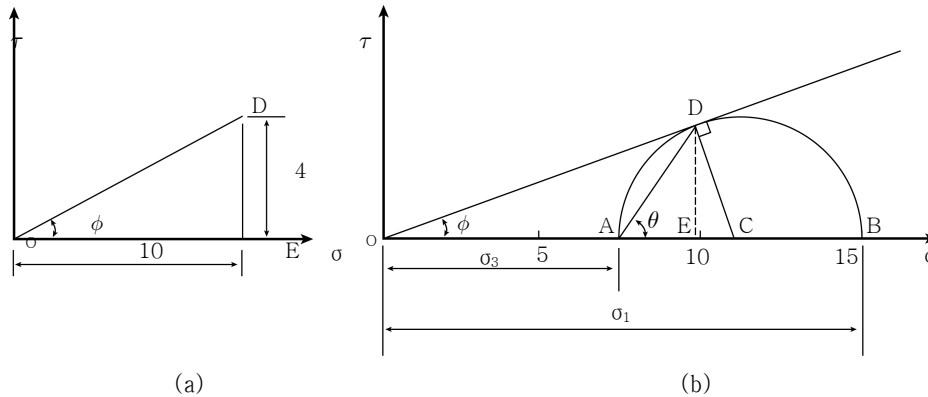


그림 8.12 예제 8.3

1) 흙의 내부마찰각은  $\tan \phi = \frac{DE}{OE}$  의 관계로부터

$$\tan \phi = \frac{4}{10} = 0.4 \quad \therefore \phi = 21.8^\circ$$

$$x \tan \theta = 4, \quad x = \frac{4}{\tan \theta}$$

2) 시료파괴면 각도  $\theta$ 는  $\theta$ 와  $\phi$ 의 관계(식 8.8)로부터

$$\theta = 40^\circ + \frac{\phi}{2} = 55.9^\circ$$

3) 그림 8.12의 Mohr원과 수평축의 교점 A, B점의 값이 최소 및 최대주응력이다.

도해법으로부터 최소주응력  $OA = \sigma_3 = 7.1 \text{ kN/m}^2$  최대주응력  $OB = \sigma_1 = 16.0 \text{ kN/m}^2$

$$\angle DCE = 180^\circ - 2\theta = 180^\circ - 2 \times 55.9^\circ = 68.2^\circ$$

$$\text{계산에 의한 } OA = OE - EA = 10 - 4 / \tan 55.9^\circ = 7.1 \text{ kN/m}^2$$

$$OC = OE + EC = 10 + 4 / \tan 68.2^\circ = 11.6 \text{ kN/m}^2$$

$$OB = OC + BC = 11.6 + (11.6 - 7.1) = 16.1 \text{ kN/m}^2$$

### 8.3.2 삼축압축시험

#### 1) 시험방법

- 삼축압축시험(triaxial compression test) :

흙의 전단강도정수를 측정하는 실내시험 중 가장 정밀하고 신뢰성 있는 시험.

- 삼축압축시험장치의 개요:

시료를 넣어 압력을 가하는 압축실과 가압장치,

간극수압 및 체적변화를 측정하는 주변장치로 구성.

- 보통 직경 38mm, 높이 76mm의 시료를 얇은 멤브레인으로 싸서 원통형의 압축실

에 안치하고 구속압(confining pressure, cell pressure)을 가함.

- 표준삼축압축시험장치는 구속응력을 최소주응력과 중간주응력이 같은 것( $\sigma_2 = \sigma_3$ ).
- 진삼축압축시험장치(true triaxial compression tester) : 최소주응력( $\sigma_3$ )과 중간주응력( $\sigma_2$ )을 구분하여 가함.
- 축차응력(deviator stress)을 가하여 전단파괴를 일으켜 흙의 강도측정.
- 축차응력 : 축응력인 최대주응력( $\sigma_1$ )에서 구속압인 최소주응력( $\sigma_3$ )을 뺀 값( $\sigma_1 - \sigma_3$ )

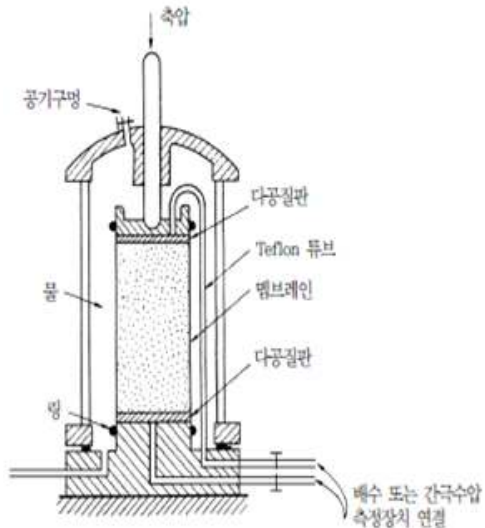


그림 8.13 삼축압축시험 장치의 개요



## Soil Strength (Triaxial)



The measurement of total stress or effective stress requires different procedures and therefore different equipment.

Total stresses are normally measured in a triaxial cell where the sample is subject to an all round confining pressure ( $\sigma_3$ ). A load is applied ( $\sigma_1$ ) through a piston onto a pressure pad, with the sample being confined within a rubber membrane so that no drainage in or out of the specimen is allowed. Pore water pressures are not normally measured and the undrained test is often referred to as the QU-TXL test.

By comparison, effective stresses when measured in a triaxial cell are more complex in their nature, as numerous parameters can be measured. These include back pressure, pore water pressure and volume change; all of which can be used to calculate the required engineering properties.

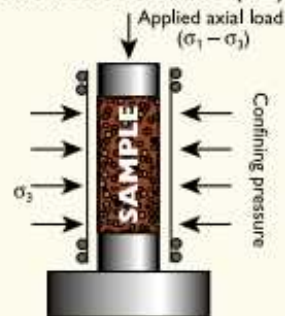
Effective stress tests are usually referred to as consolidated drained (CD) or consolidated undrained (CU). Generally the CD test is applicable to sands, while both the CU or CD test can be used with clays. There are many special test variations within these basic test groupings.

Our range of triaxial cells and accessories, used in conjunction with other equipment such as load frames, pressure sources and measurement devices, have been specifically designed to meet the wide ranging requirements of modern soil mechanics laboratories. Each system is easy to set up and use, providing accurate and repeatable measurements.

## Types of Test

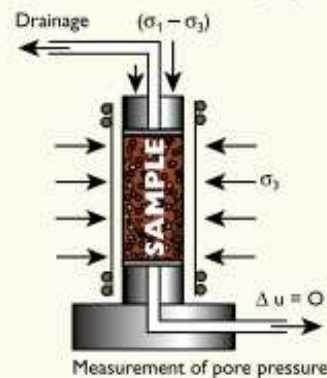
### Total Stress Measurement

**Quick undrained (QU) and Unconsolidated Undrained (UU)**

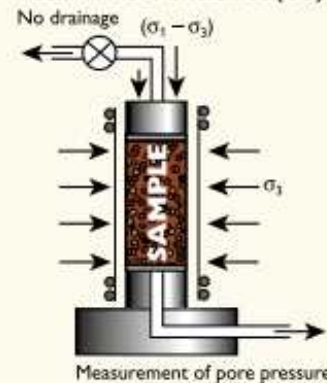


### Effective Stress Measurement

**Consolidated Drained (CD)**



**Consolidated Undrained (CU)**



## Effective Stress

$$\text{Effective Stress} = \text{Total Stress} - \text{Pore Water Pressure}$$

Effective Stress is drainage dependent (time and permeability dependent)

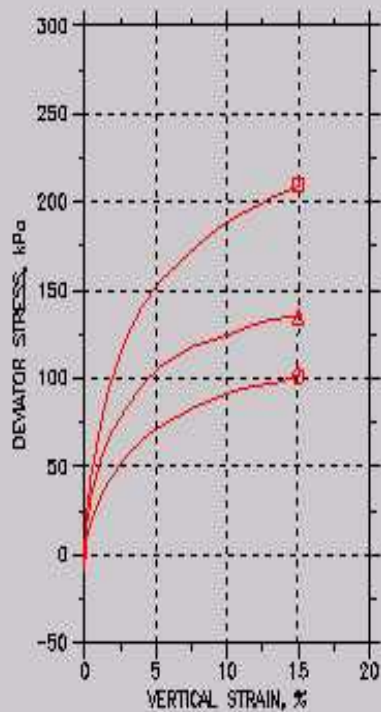
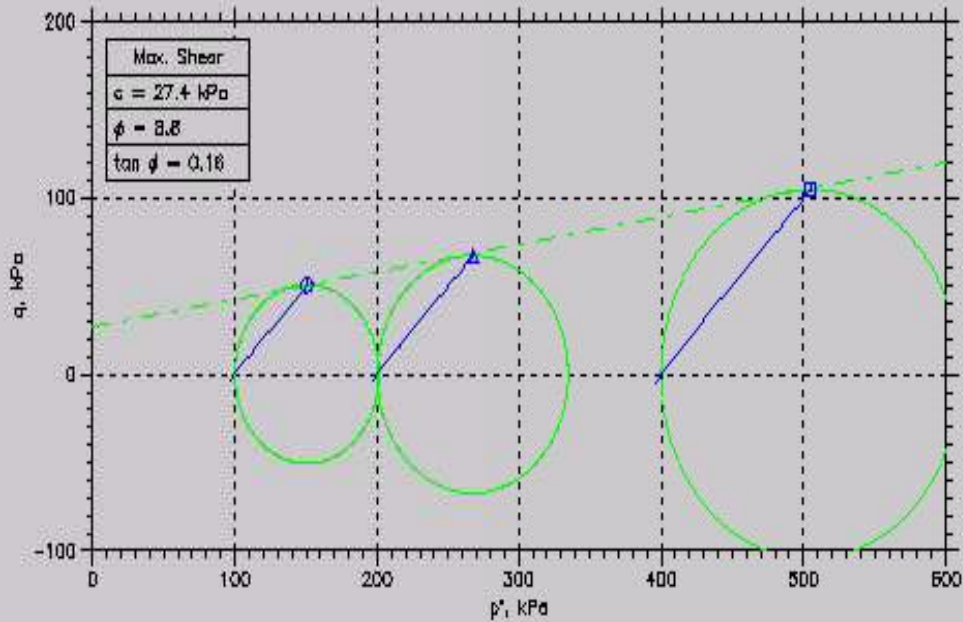


Strength depends on Effective Stress NOT Total Stress





# CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST



Symbol	○	△	□	
Sample No.	1	2	3	
Test No.	CU	CU	CU	
Depth	0	0	0	
Initial	Diameter, mm	50.25	50.25	50.27
	Height, mm	100.2	100	100.1
	Water Content, %	0.0	0.0	0.0
	Dry Density, N/m <sup>3</sup>	18670	18350	18110
	Saturation, %	0.0	0.0	0.0
Before Shear	Void Ratio	-1	-1	-1
	Water Content, %	1.4	2.0	1.2
	Dry Density, N/m <sup>3</sup>	18700	18200	18760
	Saturation, %	0.0	0.0	0.0
	Void Ratio	0	0	0
	Back Press., kPa	54.97	54.97	54.97
	Ver. Eff. Cone. Stress, kPa	100	200	400
	Shear Strength, kPa	50.64	67.36	104.7
	Strain at Failure, %	15	15	15
	Strain Rate, %/min	0.5	0.5	0.5
	B-Value	0.95	0.95	0.95
	Measured Specific Gravity	0	0	0
	Liquid Limit	0	0	0
	Plastic Limit	0	0	0

	Project Name				
	Location: Mok-Po				
	Project No.: ground-1				
	Boring No.: unknown				
	Sample Type: Tube				
	Description:				
	Remarks: This file uses 500 lbf.(2.2 kN) load cell , please use appropriate calibration factor if using 2500 lbf ( 11 kN).				

● 삼축압축시험 수행 순서.

- (1) 구속응력( $\sigma_3$ )을 가하고 24시간 압밀.
- (2) 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )을 가하여 시료를 파괴.

시료에 압력을 가하면 시료의 축방향으로 수축되면서 단면적 증가.  
축차응력을 계산할 때 다음 식을 이용하여 단면적 조정.

$$A_c = A_o \frac{(1 - \Delta V / V_o)}{1 - \Delta l / L_o} \quad (8.9)$$

여기서  $\Delta V$  : 전단 시 체적 변화량 - 뷰렛의 수두변화량을 측정,  
 $\Delta l$  : 전단 시 시료길이 변화량,  $V_o$  : 시료 원체적,  $L_o$  : 시료 원길이.

- (3) 간극수압을 측정.
- (4) 최대주응력( $\sigma_1$ ), 최소주응력( $\sigma_3$ )을 알아 Mohr원 작도(그림 8.4).

이후 구속응력을 3, 4회 변화시키면서 추가 Mohr원을 작도한 후,  
파괴포락선을 작도하여 강도정수( $c, \phi$ ) 구득.

• 삼축압축시험의 특징 :

- 전단파괴면이 대각선 또는 부푸는 형태(bulging)로 형성되며 시료의 응력조건을 조정하여 실제 지반이 받는 응력상태를 실험실에서 재현가능.
  - 현장의 시료가 받는 배수조건도 실험실에서 재현가능.
- 그러나, 실험장치조작과 시험방법이 복잡하여 시험이 어렵고 고비용인 단점.

## 2) 배수조건에 따른 시험방법의 분류

• 삼축압축시험 :

배수조건에 따라 압밀배수시험( $CD$ ), 압밀비배수시험( $CU$  또는  $\overline{CU}$ ),  
비압밀비배수( $UU$ )시험으로 분류.

### (1) 압밀배수시험(consolidated drained test, $CD$ test)

- 시료에 구속압을 가하여 충분히 압밀시킨 다음 과잉간극수압이 발생하지 않도록 축차응력을 서서히 가하여 배수조건에서 시료를 파괴시키는 시험.
- 주로 사질토나 점성토 위에 축조된 구조물의 장기 안정성을 파악하는 데 적용.
- 흙시료에 구속압( $\sigma_3$ )을 가하면 과잉간극수압  $u_e$ 가 발생.  
배수장치를 열어 24시간 과잉간극수압을 소산시켜 압밀한 후( $u_e=0$ ),  
간극수압의 변화가 0( $\Delta u_d=0$ )이 될 때 천천히 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 가함.
- 시료 내에 간극수압을 발생시키지 않으므로 유효응력과 전응력이 일치.

$$\text{파괴 시 구속압 : } \sigma_3 = \sigma_3' \quad (8.10a)$$

$$\text{파괴 시 축응력} : \sigma_1 = \sigma_1' = \sigma_3 + \Delta\sigma' \quad (8.10b)$$

- $CD$  시험은 축차응력을 가하는 동안 배수장치를 열어 배수를 허용하며, 간극수압의변화를 일으키지 않도록 축차응력의 재하속도가 매우 느려, 시험수행에 수일 또는 수주가 소요.
- 간극수압 측정하여 유효응력강도정수를 구하는 압밀비배수시험( $\overline{CU}$  시험) 대체.

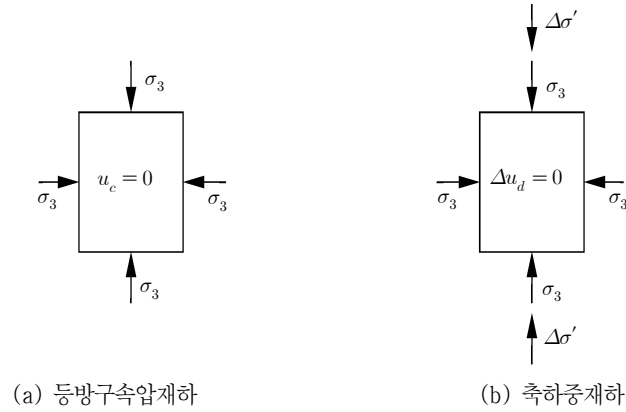


그림 8.14 압밀배수시험( $CD$  test)

(2) 압밀비배수시험(consolidated undrained test,  $CU$  또는  $\overline{CU}$  test)

- 시료에 구속압을 가하여 충분히 압밀시킨 다음 물의 배출을 허용하지 않는 비배수상태로 축차응력을 가하여 시료를 전단시키는 시험.
- 이는 성토한 지 오랜 시간이 경과하여 이미 성토하중에 대한 압밀이 완료된 상태에서 상부에 추가성토가 급속히 일어나는 경우(즉 추가성토 기간 동안 압밀이 충분히 이루어지지 못할 정도로) 성토 구조물의 안정성을 평가에 사용.
- 간극수압이 0이 될 때( $u_c=0$ )까지 구속압  $\sigma_3$ 를 가하여 충분히 압밀 시킨다. 압밀이 완료된 후 배수장치를 잠가 축하중 재하기간 동안 배수가 일어나지 않는 상태, 즉 비배수상태로 두고 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )을 가한다.
- 시료전단이 발생하는 동안 시료 내에서는 과잉간극수압이 발생( $\Delta u_d \neq 0$ ). 축차응력을 가하는 동안 과잉간극수압( $\Delta u_d$ ) 측정가능.

$$\text{파괴 시 구속압(전응력)} : \sigma_3 \quad (8.11a)$$

$$\text{파괴 시 유효구속압} : \sigma_3' = \sigma_3 - \Delta u_d \quad (8.11b)$$

$$\text{파괴 시 축응력(전응력)} : \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma \quad (8.11c)$$

$$\text{파괴 시 유효축응력} : \sigma_1' = \sigma_1 - \Delta u_d \quad (8.11d)$$

여기서  $\Delta\sigma$  : 축차응력,  $\Delta u_d$  : 축응력 재하기간 동안 과잉간극수압.

- $CU$ (전응력 강도정수)시험 : 파괴 시의 구속압과 축응력을 전응력으로 보아 강도정수를 구하는 시험.
- $\overline{CU}$ (유효응력강도정수) 시험 : 시험 시 간극수압을 측정하여 구속압과 축응력을 유효응력으로 보아 강도정수를 구하는 시험.
- $\overline{CU}$  시험으로 구한 강도정수는  $CD$  시험에 의한 값과 대략 같다.  
따라서 장시간을 요하는  $CD$  시험 대신 시험수행.

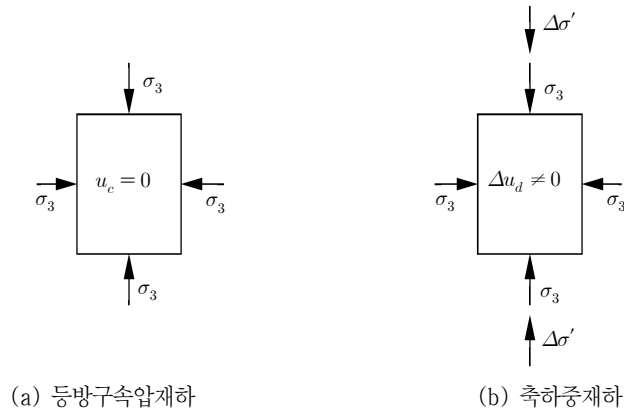
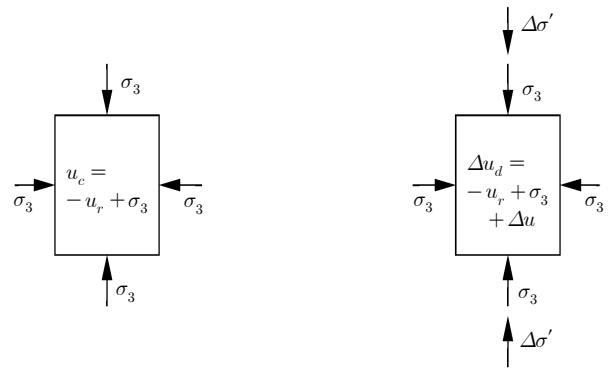


그림 8.15 압밀비배수시험( $CU$  test)

(3) 비압밀비배수시험(undrained unconsolidated test,  $UU$  test)

- 점성토지반에 성토나 구조물기초를 급속 시공할 때 시공완료 시까지 과잉간극수압  
→ 충분히 소산되지 않아 원지반의 압밀이 완벽히 일어나지 않은 상태.
- 이러한 구조물의 시공 직후의 안정성 해석, 구조물의 시공속도가 과잉간극수압의 소산속도보다 빠른 단기 안정성 해석에 사용하는 시험.
- 시료를 삼축실제 안치한 후 시료에서 물이 배수되지 않도록 배수장치를 닫고, 구속압을 가하여 시료를 파괴하는 시험.
- 시료장착 후 압밀시키는 과정을 생략하고 시료파괴 시에도 배수를 허용하지 않으므로 비압밀비배수시험.
- 전응력 표시의 Mohr원으로 표시하여 포락선으로부터 비배수전단강도( $c_u$  또는  $s_u$ ).
- 시료의 축압작용 전 각각 다른 구속압에 의한 압밀과정이 없어 포화지반에서는 마찰각( $\phi$ )이 0으로 나타나므로  $\phi=0$  해석.
- 비압밀비배수시험 시 시료 내 간극수압의 변화는 다음 그림과 같다.





(a) 시료의 압밀 없음 (b) 구속압의 재하

그림 8.16 비압밀비배수시험(UU test)  
( $u_r$ : 현장에서 채취된 시료의 잔류간극수압)

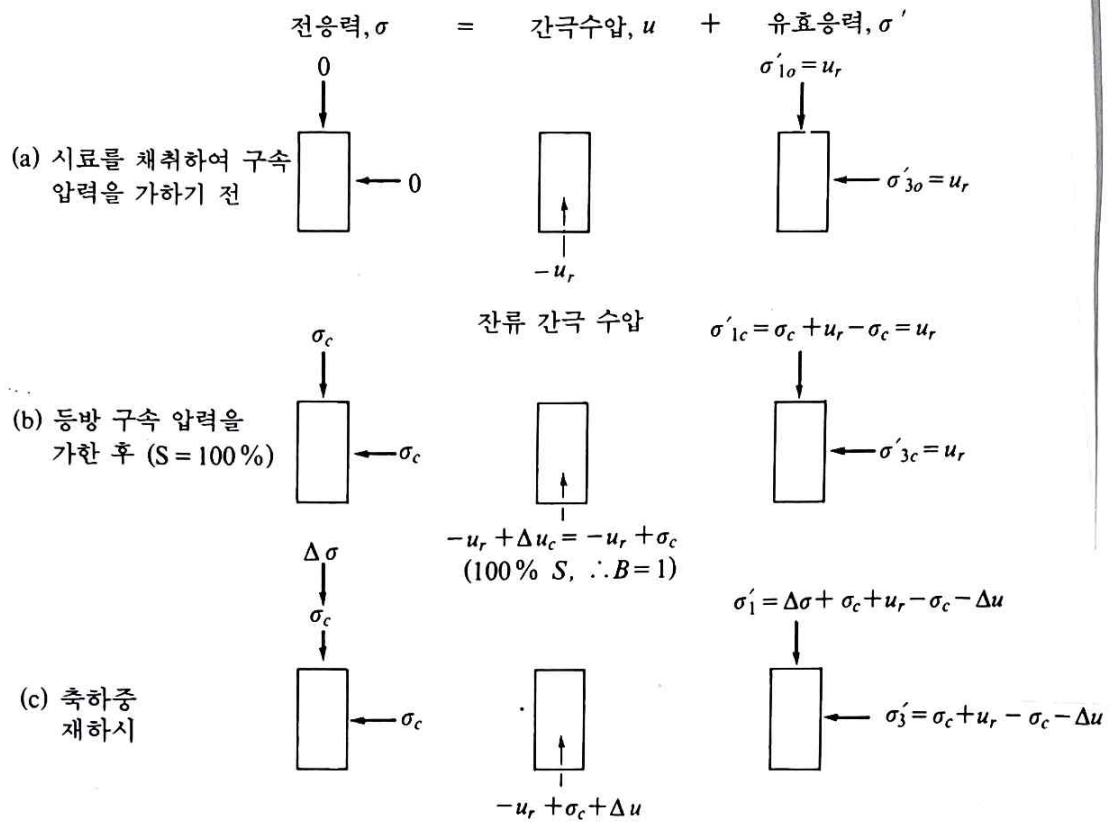


그림 9·26 UU 3축압축시험의 여러 단계에서의 전응력, 간극수압 및 유효응력

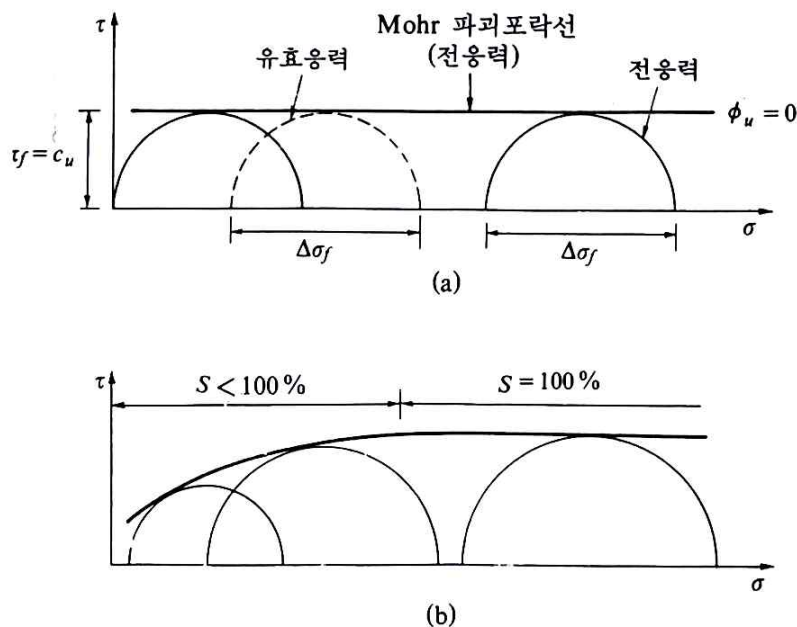


그림 9·27 UU 시험으로 얻은 Mohr 포락선 (a) 완전히 포화된 점토 (b) 불포화토

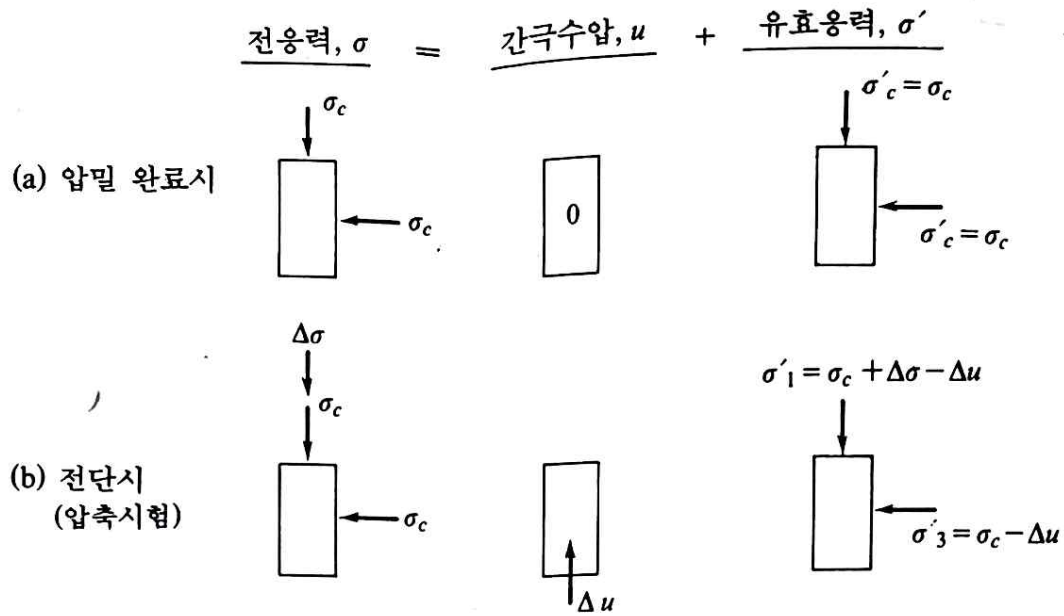


그림 9·28 CU 시험에서 압밀 단계와 전단 단계에서의 전응력, 간극수압 및 유효응력

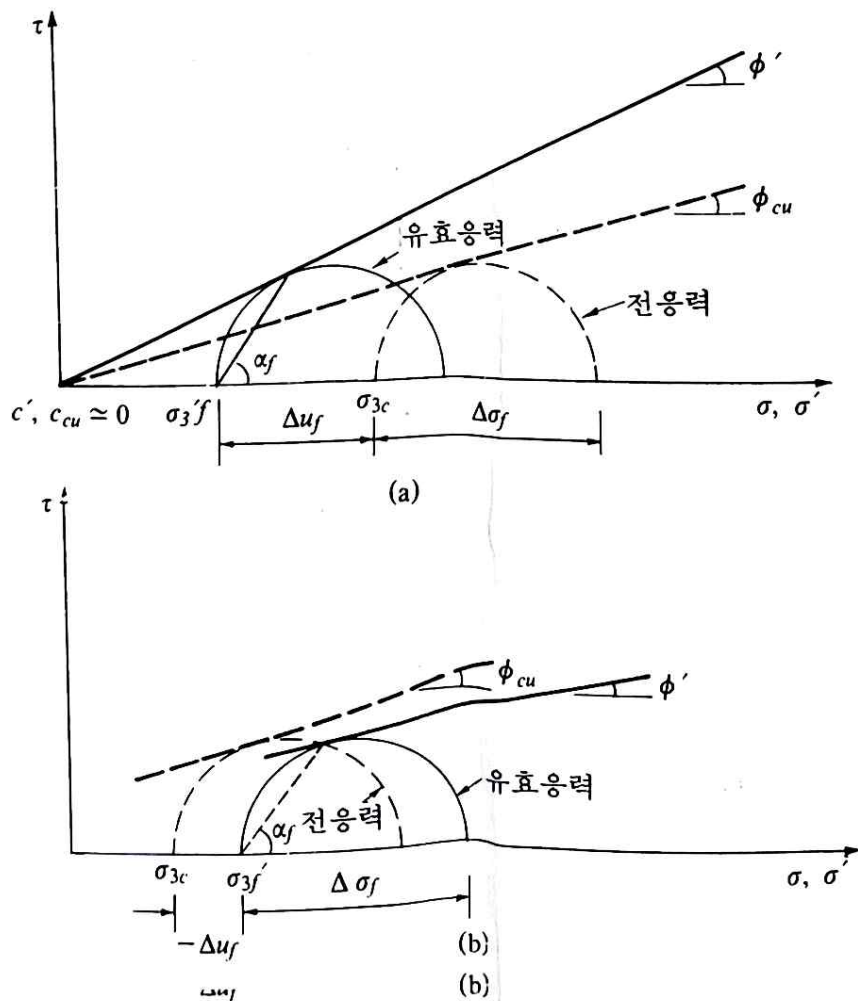


그림 9·30 CU 시험으로 구한 Mohr 포락선 (a) 정규압밀 점토 (b) 과압밀 점토



## Soil Lathes

Soil Lathe - Hand Operated for 38 mm diameter specimens up to 100 mm long

Product Code: 23-5800



## ► Compaction & CBR

### MultiPlex 50 Load Frame

Product Code: 25-3700/01



**Product Standards:**

**Marshall**

#### Specifications

CBR Penetration	Yes
Unconfined Compression	Yes
Consolidated Undrained	No
Consolidated Drained	No
Marshall Stability and Flow	Yes
Power Supply	220-240 V AC, 50-60 Hz, 1 ph
Dimensions (mm)	550 x 400 x 1470
Max Vertical Clearance (mm)	800
Horizontal Clearance (mm)	265
Platen dia (mm)	133
Platen Travel (mm)	100
Platen Speed Range	0.5 to 50.8 mm/min
Rapid Approach Speed	40 mm/min
Weight (kg)	100 (shipping 113)

#### Manual Accessories:

Clamped Boss Load Ring - 2 kN (78-0060)  
 Clamped Boss Load Ring - 3 kN (78-0160)  
 Clamped Boss Load Ring - 4.5 kN (78-0260)  
 Clamped Boss Load Ring - 10 kN (78-0460)  
 Clamped Boss Load Ring - 28 kN (78-0760)  
 Clamped Boss Load Ring - 50 kN (78-0860)  
 Penetration Dial Gauge BS (24-9186)  
 Penetration/Swell Dial Gauge ASTM (24-9184)

#### Electronic Accessories:

50 kN S-Type Load Cell (27-1559)  
 CBR Penetration Transducer 50 mm travel fitted with 5-pin DIN plug (27-1705)  
 DSU 27-1300/01 and 27-1300/02

**Alternative frame to product: 24-9150/01**

### 8.3.3 일축압축시험

- 일축압축시험(unconfined compression test) : 비압밀비배수시험(UU test)에서 구속 응력  $\sigma_3$ 를 0으로 놓고 축응력을 가해 강도를 측정하는 시험.

- 주로 불교란 점성토에 적용, 사질토는 공시체 자립할 수 없는 시료에 적용불가.
- 일축압축시험으로부터 구한 흙의 최대압축강도를 일축압축강도,  $q_u$ 로 표시.
- $\phi=0$ 인 경우, 비배수전단강도  $c_u$  :

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (8.12)$$

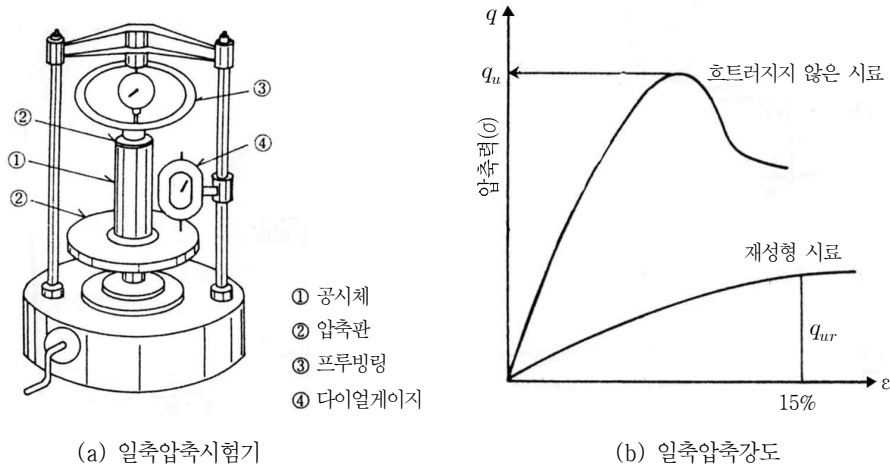


그림 8.17 일축압축시험기 및 일축압축강도의 측정

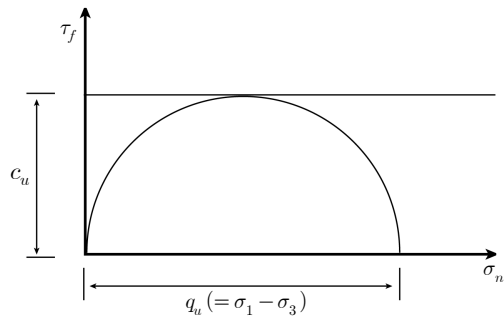


그림 8.18 Mohr원으로 나타난 일축압축시험 결과

- 자연퇴적점토를 함수비 변화 없이 재성형(remolding)하면 일축압축강도는 감소.
- 예민비(sensitivity,  $S_t$ ) : 불교란시료의 일축압축강도( $q_u$ )와 교란시료(재성형시료의 일축압축강도( $q_{ur}$ ))와의 비.
- 예민비는 교란 시 흙입자의 배열이 변화함으로 발생하는 강도차이 파악.

$$S_t = \frac{q_u}{q_{ur}} \quad (8.13)$$

- 예민비 : 보통 1.5~100의 범위.  
     4~ 8 : 예민점토,  
     8~16 : 초예민점토.
- 스칸디나비아 삼국 : 예민비가 16~80 정도인 초예민점토 ⇒ Quick clay.
- Quick clay 형성과정 :
  - (1) 빙하기에 점토층이 해저에서 형성. ⇒  
 형성된 점토는 염도가 있는 해수의 영향으로 면모구조상태가 됨.
  - (2) 빙하기가 지나고 간빙기가 출현으로 바다를 덮고 있던 빙하가 녹아 없어짐 ⇒  
 빙하의 무게로 인해 눌러 있던 해저지반이 상승하여 육지화 됨.
  - (3) 육지로 노출된 면모구조의 점토층은 강우로 인한 담수의 침투 ⇒  
 염분이 점토로 부터 빠져나가 면모구조는 유지하나 매우 불안정한 상태로 변함  
 ⇒ 이와 같은 점토를 Quick clay.
- Quick clay의 불안정성 : 시료가 불교란 시의 강도와 교란되었을 경우  
     액체상태로 변화되는 강도발현.

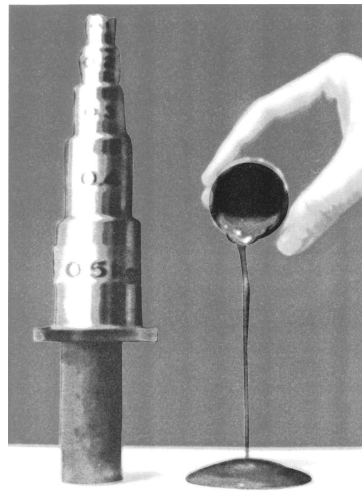


그림 8.19 초예민점토의 교란 여부에 따른 강도 비교(Mitchell and Soga, 2004)

- 텍소트로피현상(Thixotropy phenomenon) : 재성형된 점토는 이후 함수비 변화  
     없이 오랜 시간 방치하면 시간경과에 따라 강도가 회복되는 현상.
- 텍소트로피현상으로 인한 강도 증가 : 원래의 점토강도까지는 형성되지 않는데,  
     이는 원점토의 강도 형성기간은 지질학적인 오랜 기간 동안에 형성된 것임에 비하여  
     텍소트로피현상으로 인한 강도증가는 수개월이나 수년 동안 이루어짐.
- 텍소트로피현상에 의한 강도증가의 원인 :
  - 교란으로부터 이산구조화된 점토가 면모화하려는 경향에 기인.



대체로 물을 많이 흡수하는 몬트모리로나이트(Montmorillonite)가 카올리나이트(Kaolinite)보다 텍소트로피효과가 크다.

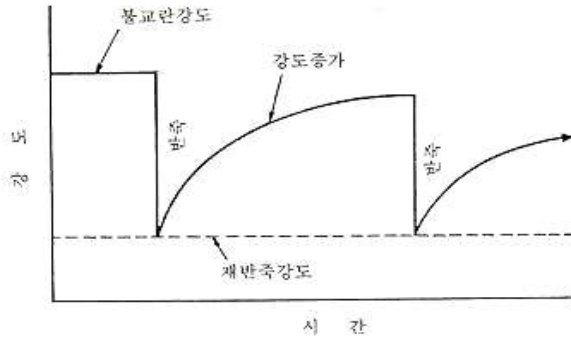


그림 2.27 흙의 Thixotropy 현상

## 2. Thixotropy 강도비

- 1) 텍소트로피 강도비는 교란시점에서의 비배수강도에 대한 시간경과에 따른 비배수강도의 비를 말한다.

$$\text{즉, 텍소트로피 강도비} = \frac{S_u(t)}{S_u(t=0)} = \frac{\text{교란후 } t\text{시간경과시 비배수강도}}{\text{교란시점에서의 비배수강도}}$$

- 2) 강도비 범위는 대략 1.3~1.5정도이다.

## 3. 영향요소

- 1) 액성지수가 클수록 크다.
- 2) 교란정도가 작을수록 크다.
- 3) 몬모릴로나이트 점토광물 함유율이 많을수록 크다.
- 4) 대부분 흙은 강도를 부분적으로만 회복된다.
- 5) 텍소트로피에 의한 강도회복율은 정치시간의 초기에 크다.

## 4. 실무적용시 유의사항

- 1) 텍소트로피 강도비와 시간관계로 점토지반 말뚝재하시험과 연약지반 개량 후의 현장시험 결과를 결정할 수 있다.

점토지반의 향타말뚝 지지력 회복 : 정재하시험 20~30일 후에 실시

→ 지지력회복 원인 : 과잉간극수압 소산에 따른 압1차밀, 2차압밀, 텍소트로피, Ageing

- 2) 베인전단시험 시 베인을 삽입하고 일정한 시간(약 3분정도)이 경과한 후 시험을 실시 함.

→ 왜냐하면 베인 삽입시 발생한 과잉간극수압이 시간이 지나면서 소산되면서 텍소트로피에 의한 강도증가가 발생하기 때문임

### 예제 8.5

불교란(intact) 포화점토와 이를 재성형(remold)한 시료에 대하여 일축압축강도시험을 수행한 결과 각각  $q_u = 124\text{kPa}$ ,  $27\text{kPa}$ 로 나타났다. 다음에 답하여라.

- 1) 이 점토의 예민비를 계산하고 예민점토 여부를 평가하여라.

- 2) 불교란시료에 대하여 일축압축시험 시 최대 및 최소주응력은?
- 3) 불교란시료의 비배수전단강도는?

풀 이

- 1) 식 8.12를 이용하여 계산한 결과

$$S_t = \frac{q_u}{q_{ur}} = \frac{124}{27} = 4.6$$

이다. 예민비가 4와 8 사이에 있으므로 예민점토이다.

- 2) 그림 8.19에 의하면 일축압축강도가 최대주응력, 즉  $\sigma_1 = q_u = 124\text{kPa}$ 이다. 구속응력이 0이므로 최소주응력  $\sigma_3 = 0\text{kPa}$ 이다.

- 3) 불교란시료의 비배수전단강도는 식 8.12에 의하여

$$c_u = \frac{q_u}{2} = \frac{124}{2} = 62\text{kPa}$$

이다.

## 8.4 사질토의 전단강도

### 8.4.1 입자의 거동

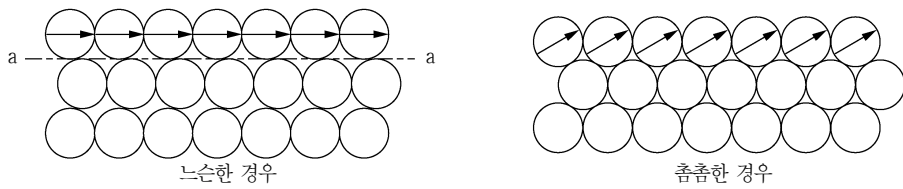
- 모래와 자갈과 같은 사질토의 전단강도 :

입자 상호간의 활동(sliding)과 회전(rolling)으로 생기는 마찰저항(frictional resistance)과 엇물림(interlocking)으로 인하여 발현.

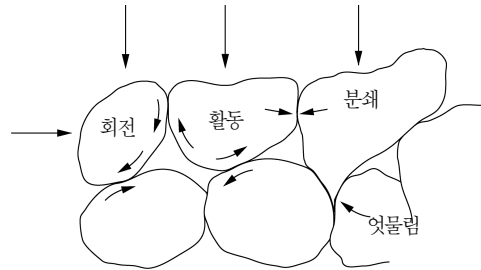
- 사질토의 전단이 이루어질 때의 입자의 변위모습(그림 8.21),

- 느슨한 모래 : 전단을 받아 입자의 변위는 활동에 의하여 주로 나타남.

- 촘촘한 모래 : 입자가 활동과 회전이 모두 일어나면서 입자를 타고 넘는 작용이 일어나 상하간의 변위(부풀림, dilatancy)가 나타남.  $\Rightarrow$  일부 입자는 상호 엇물려 있는 관계로 이들에 대한 변위가 발생하면 입자의 파쇄(crushing)가 발생.



(a) 입자의 변위



(b) 입자 사이 상세거동(김상규, 1991)

그림 8.20 사질토 입자의 거동

- 느슨한 모래와 촉촉한 모래의 전단시험에서 얻은 전단응력과 변위, 체적변화.

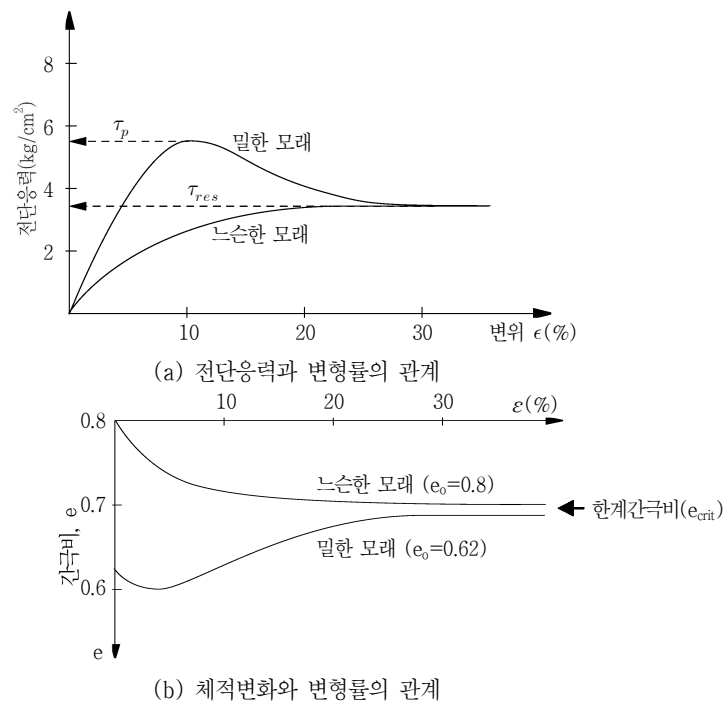


그림 8.21 사질토의 밀도에 따른 전단응력과 간극의 변화

- 느슨한 모래 : 전단응력이 파괴점에 도달할 때까지 전단변위의 증가에 따라 계속해서 증가한 후 일정한 값에 수렴.
- 촉촉한 모래 : 전단변위의 증가에 따라 전단응력이 첨두전단강도(peak shear strength,  $\tau_p$ )에 도달한 후 이후 전단변위의 증가에 따라 감소하여 일정한 값에 수렴.
- 극한전단강도(ultimate shear strength), 잔류전단강도(residual shear strength,

$\tau_{res}$ ) : 느슨한 모래나 촘촘한 모래 모두 전단변위 후 수렴한 전단강도는

매우 유사한 값을 갖게 되는데 이때의 전단강도.

- 한계간극비(critical void ratio,  $e_{crit}$ ) : 전단변위가 증가하나 전단강도는 더 이상 증가하지 않고 일정한 상태를 나타낼 때를 한계상태(critical state)라고 하고, 이때의 간극비.

- 체적변화(간극비)와 변형률의 관계(그림 8.22b) :

- ① 촘촘한 모래 : 초기에 체적이 약간감소하나 이후 팽창하여 첨두 전단강도 부근의 전단변위부터는 일정한 값으로 수렴.

· 전단 시 시료팽창이 일어나는 이유 : 시료가 촘촘해 엇물려 있는 입자가 상호 타고 넘으며 변위가 일어나는 과정에서 부풀어 오르는 현상  $\Rightarrow$  다일러텐시(dilatancy)현상.

- ② 느슨한 사질토 : 전단변위가 일어남에 따라 지속적 감소하다가 일정한 값에 수렴.

- Bhudu(2007) : 첨두전단강도(peak shear strength,  $\tau_p$ ) 발현 시 나타는 마찰각에 입자고유의 활동저항, 다일러텐시, 입자엇물림, 입자재배열 등의 거동이 마찰각의 값에 미치는 영향을 그림으로 표시. 다음과 같은 식 제안.

$$\text{잔류강도 또는 극한 상태 시 전단강도} : \tau_{cs} = (\sigma'_n)_f \tan \phi'_{cs} \quad (8.14a)$$

$$\text{팽창토 또는 첨두전단강도} : \tau_p = (\sigma'_n)_f \tan(\phi'_{cs} + \alpha_p) = (\sigma'_n)_f \tan \phi'_p \quad (8.14b)$$

여기서  $(\sigma'_n)_f$  : 파괴상태에서의 유효수직응력,

$\phi'_p$  : 첨두내부마찰각(peak friction angle),

$\phi'_{cs}$  : 한계상태내부마찰각(critical state friction angle),

$\alpha_p$  :  $\phi'_p$  와  $\phi'_{cs}$  의 차이 마찰각, 그림 8.22의 수직축  $\phi'_{cs}$  를 초과하는 값.

$\alpha_p$  :  $(\sigma'_n)_f$  이 증가함에 따라 그 영향력이 감소하는 것(그림 8.23 참조).

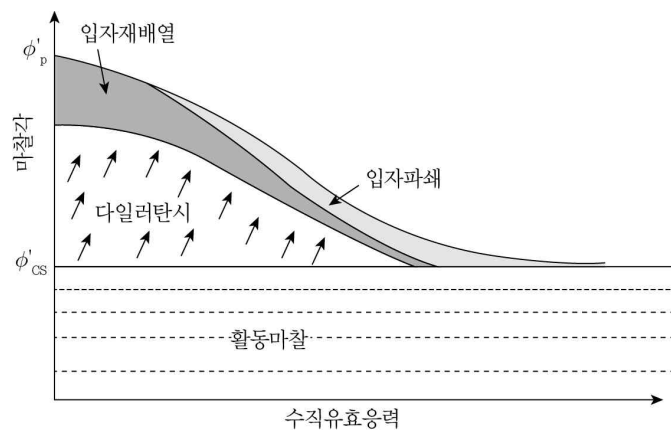


그림 8.23 흙입자 내부마찰각에 대한 입자거동의 기여도(Bhudu, 2007)

#### 예제 8.6

어느 조밀한 모래시료에 3회의  $CD$  삼축시험을 실시하여 다음과 같은 최대, 최소주응력값을 얻었다. 실험시료에 대하여 다음에 답하시오.

시험횟수	$\sigma_3'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_1'$ (kN/m <sup>2</sup> )	
		첨두전단 시	극한전단 시
1	200	810	510
2	300	1,230	780
3	400	1,600	1,100

- 1) 극한전단 시 Mohr원과 파괴포락선, 한계상태내부마찰각( $\phi_{cs}'$ )을 구하여라.
- 2) 첨두전단 시 Mohr원과 파괴포락선, 첨두내부마찰각( $\phi_p'$ )을 구하여라.
- 3) 이 시료의 다일러탄시험상에 의하여 증가된 마찰각의 차( $\alpha_p$ )는 얼마인가?

#### 풀이

- 1) 극한전단 시의 Mohr원과 파괴포락선을 그림 8.24에 실선으로 도시하였다. 그 결과 극한전단 시의 한계상태내부마찰각( $\phi_{cs}'$ )은  $28^\circ$ 로 나타났다.
- 2) 첨두전단 시의 Mohr원과 파괴포락선을 그림 8.24에 점선으로 도시하였다. 그 결과 첨두전단 시의 첨두내부마찰각( $\phi_p'$ )은  $37^\circ$ 로 나타났다.

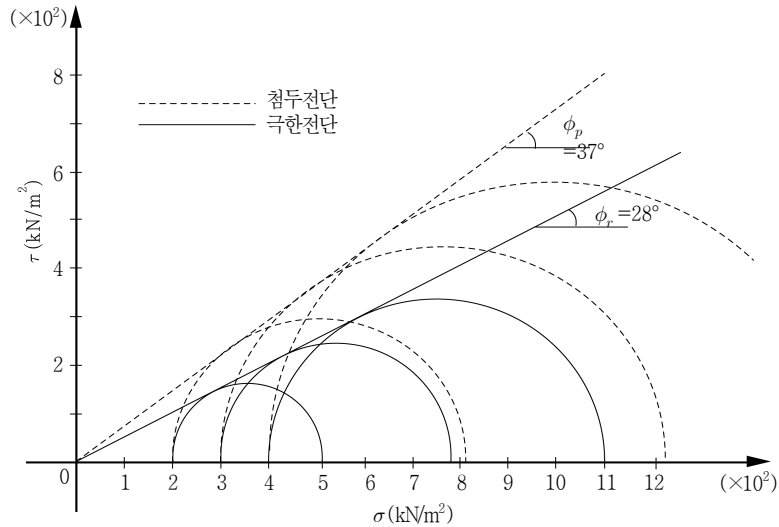


그림 8.24 예제 8.6

- 3) 증가된 마찰각의 차는  $\alpha_p = \phi_p' - \phi_{cs}'$  이므로(식 8.14b 참조)

$$\alpha_p = \phi_p' - \phi_{cs}' = 37^\circ - 28^\circ = 9^\circ \text{이다.}$$

### 8.4.2 영향요소

- 모래의 전단강도에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있으나 그중 가장 큰 영향을 미치는 것은 상대밀도.  $\Rightarrow$  상대밀도가 큰 흙일수록 촘촘하여 내부마찰각이 커진다.

- Lee and Seed(1967)  $\Rightarrow$

캘리포니아 Sacramento 모래의 상대밀도에 대한 간극비와 내부마찰각의 값.

표 8.1 상대밀도와 간극비, 내부마찰각의 관계(Lee and Seed, 1967)

상대밀도(%)	간극비	내부마찰각(°)
38	0.87	34
60	0.78	37
78	0.71	39
100	0.61	41

- 미 해군성(NAVFAC, 1971) ⇒

사질토의 간극비, 단위중량, 상대밀도에 대한 내부마찰각의 변화(그림 8.25).

· 사질토의 단위중량이 커질수록, 상대밀도가 증가할수록 내부마찰각 증가.

- Ladd et al.(1977) : 중간주응력을 고려한 전단강도연구. ⇒

전단되는 동안 중간주응력( $\sigma_2$ )방향의 변위( $\epsilon_2$ )가 0(zero)인 상태로 수행.

· 평면변형전단시험(plane shear test) 결과 ⇒

내부마찰각( $\phi$ )은  $\sigma_2 = \sigma_3$ 로 수행한 표준삼축압축시험의 값에 비하여 2~3° 크다.

· 평면변형상태의 응력구조물 : 제방이나 옹벽, 터널 등 한 방향으로 긴 구조물.

※ 평면응력(Plane stress)

1) 중간주응력( $\sigma_2$ )과 최소주응력( $\sigma_3$ )이 같다고 가정하여 최대주응력( $\sigma_1$ )과 최소주응력( $\sigma_3$ )만 고려한 2차원응력을 말함

2) 즉, 표준삼축압축시험은 평면응력상태의 시험법임

3) 적용 : Mohr 파괴이론, 삼축압축시험



(삼축압축시험)(평면응력상태)

### 8.4.3 액상화현상

- 액상화현상(liquefaction phenomenon) : 느슨하게 퇴적된 사질토지반에 갑자기 충격을 가하면 지반의 전단강도가 현격히 감소하여 원래의 지지력을 상실해 액체처럼 유동하게 되는 현상.

⇒ 지하수로 포화되어 있는 느슨한 가는 모래나 실트질 토질에 진동을 가하면 흙 알갱이 입자 간의 접점을 통하여 상부 퇴적토의 하중을 전달하던 흙의 구조가 일시적으로 붕괴되면서 지하수에 흙이 떠 있는 상태로 액체처럼 거동하는 현상.

⇒ 이러한 현상은 점착력이 없고 진동으로 인한 흙의 붕괴 시 발생하는 간극수압이 단시간에 충분히 소산될 수 없는 투수성이 적은 토질에서 발생.

- 점토는 투수계수가 적으나 흙 자체의 점착력이 있어 발생하지 않음.

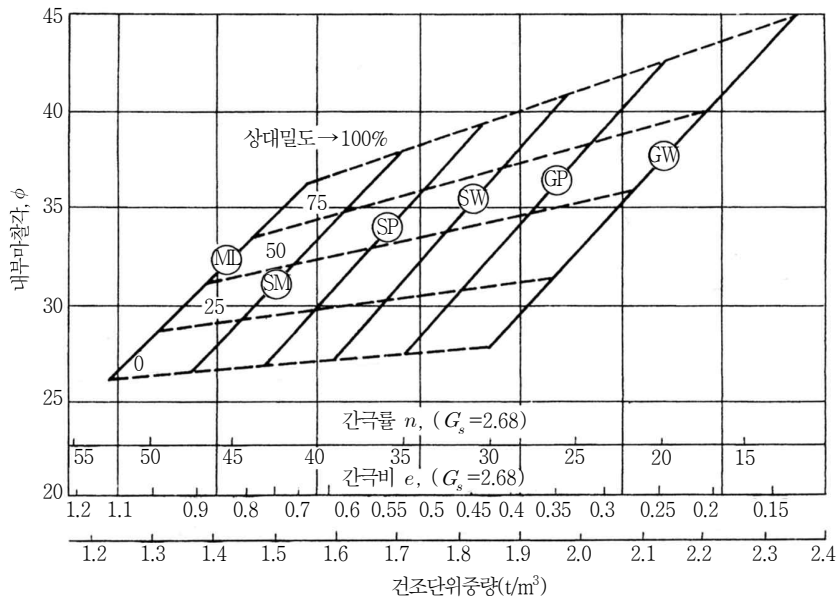
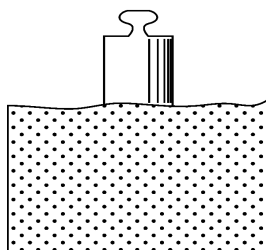


그림 8.25 사질토의 간극비, 단위중량, 상대밀도, 내부마찰각의 관계(NAVFAC, 1971)

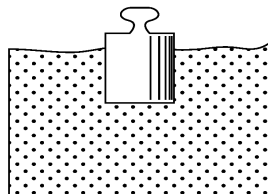
- 액상화가 일어나는 일반적인 조건 :

- (1) 입자가 둥글고 실트질 입자 포함.
- (2) 유효경이 0.1mm보다 작고 균등계수가 5보다 작음.
- (3) 간극물이 최소 44% 이상.
- (4) 지하수로 포화됨.

- 액상화가 발생하면 그림 8.26a, 8.26b에 나타난 바와 같이 액상화가 발생한 토층의 상부에 있는 물체가 토층에 가라앉는 현상이 발생.
- 액상화가 발생한 흙에서 발생한 과잉간극수압으로 인하여 토층 사이의 물이 지표로 솟아오르는 현상이 발생.
- 그림 8.26c는 1990년 샌프란시스코 지역에 발생한 노마프리에이터 지진 시 느슨한 입상토 퇴적지역에 발생한 액상화로 인하여 물이 지표부로 솟아나와 형성된 지표부.
- 그림 8.27에는 1964년 일본 니이가타현에 발생한 지진으로 인한 지반의 액상화로 인하여 아파트단지가 기울어진 모습.



(a) 발생 전



(b) 발생 후



(c) 물젓구침현상의 흔적

그림 8.25 액상화현상



그림 8.26 지진 발생 시 나타난 액상화현상에 의한 아파트 건물의 기울



포항지진 액상화 현상! 국내 처음 발견! 심한 가뭄지역인데 물과 모래가 솟구쳤습니다. 논밭이라 그나마 천만다행이지 만약 이 위에 건물이 있었다면! 상상조차 하기 싫어집니다.





<http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=001&oid=056&aid=0010525957>

- 액상화현상 방지 : 자연퇴적된 지층의 간극비가 한계간극비보다 적도록 개선.
- 해안가 단지조성 : 준설매립으로 해사를 이용하여 시공하는 경우가 많은데,  
준설퇴적토를 해수가 있는 상태에서 느슨하게 수중 퇴적.  
⇒ 이로 인하여 형성된 느슨한 지층은 지진 발생 시 액상화 발생.
- 액상화에 의한 사질토 피해방지 : 사질토 밀도증대에 효과적인 진동개량공법 이용.

## 8.5 점성토의 전단강도

- 점성토는 투수계수가 작으므로 배수가 불량하여 하중작용 시 과잉간극수압을 유발하게 된다. 유발된 과잉간극수압은 시간이 경과하면서 소산되며 강도가 증가하게 된다.

### 8.5.1 압밀배수(CD) 전단강도

- 압밀배수시험 : 현장조건과 유사한 구속압을 가하여 압밀시킨 다음 배수상태를 유지하며 축차응력을 가하여 전단강도정수를 구하는 시험.

- 압밀배수시험 결과 나타나는 정규압밀점토와 과압밀점토의 축차응력-축변형률곡선과 체적-축변형률곡선을 나타내면 그림 8.27과 같다.

· 그림 8.27a : 과압밀점토가 받을 수 있는 축차응력의 크기는 정규압밀점토보다 크며 밀한 사질토에서 나타나는 것과 유사한 침투전단강도의 특성.

⇒ 정규압밀점토는 느슨한 사질토의 것과 유사한 거동.

· 그림 8.27b : 체적변화도 과압밀점토는 시험 시의 구속압이 현장의 구속압보다 작아 축변형이 진행됨에 따라 팽창하는 특성을 보임, 정규압밀점토는 지속적으로 감소.

- 그림 8.28 : CD시험을 구속압의 크기를 달리하여 수행하여 작성한 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 정규압밀점토와 과압밀점토로 나누어 나타냄.

⇒ 두 가지 경우 모두 구속압의 크기가 증가함에 따라 시료의 압밀이 이루어져 Mohr원이 증가. 파괴포락선도 내부마찰각  $\phi$ 의 각도로 증가함.

- 정규압밀점토 : 전단강도축(수직축)의 절편인 점착력이 0(zero).

- 과압밀점토 : 현장수직응력보다 큰 응력으로 사전압밀이 이루어졌던 관계로 점착력이 0이 아님.

- 점토에 대한 삼축압축시험의 결과를 식 :

$$\text{정규압밀점토의 경우 : } \tau_{nc} = \sigma \tan \phi \quad (8.15a)$$

$$\text{과압밀점토의 경우 : } \tau_{oc} = c + \sigma \tan \phi \quad (8.15b)$$

여기서  $\tau_{nc}$ 는 정규압밀점토의 전단강도,  $\tau_{oc}$ 는 과압밀점토의 전단강도.

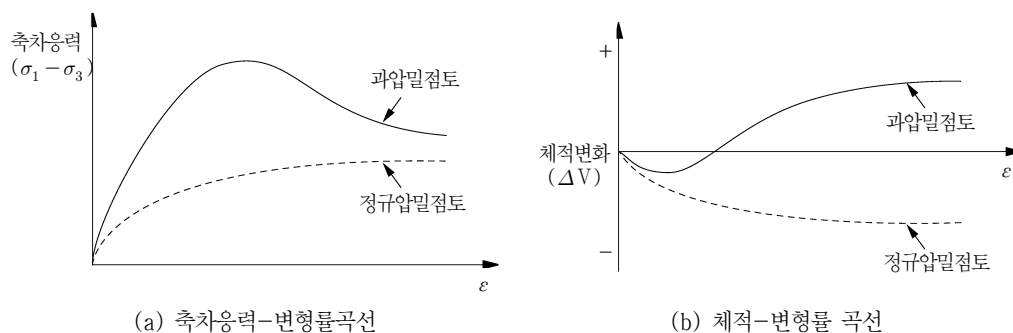
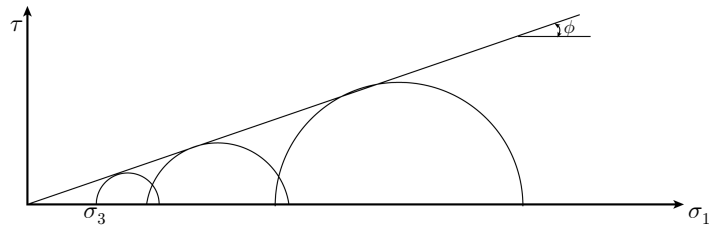
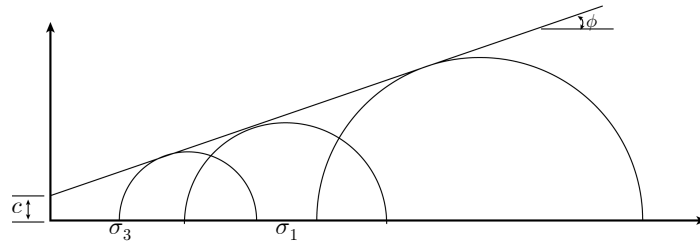


그림 8.27 압밀배수시험 결과 나타나는 응력-변형률 및 체적-변형률곡선



(a) 정규압밀점토



(b) 과압밀점토

그림 8.29 압밀배수(CD)시험에 의한 Mohr-Coulomb 파괴포락선

- 그림 8.29 : 점토를 처음에 등방의 구속압( $\sigma_c = \sigma'_p$ )으로 압밀시킨 다음 구속압을  $\sigma_c = \sigma'_3$ 로 감소시켜 과압밀을 일으킨 상태에서 CD 시험을 실시, Mohr 원과 파괴포락선.

⇒ 삼축시험으로 구한 파괴포락선은 2개의 직선(그림 8.29의 ac, ab).

· o-a의 경로 : 정규압밀점토가 압밀되는 과정으로 이에 대한 전단강도 파괴포락선은 점착력이 0으로 원점을 지나는 것.

· a-b 과정 : 압력을 제거하여 시료가 과압밀상태에 있으며 해당 압밀압을 구속압으로 하여 CD 시험을 한 전단강도는 정규압밀점토보다 크고 강도 축에 절편(점착력)  $c \neq 0$ 인 상태가 됨.

· 이러한 점토 :  $\sigma_c = \sigma'_p$ 가 선행압밀압력이 되고

· 이보다 작은 경우 : 삼축압축시험 시 과압밀점토의 특성,

· 이보다 큰 경우 : 정규압밀점토의 특성.

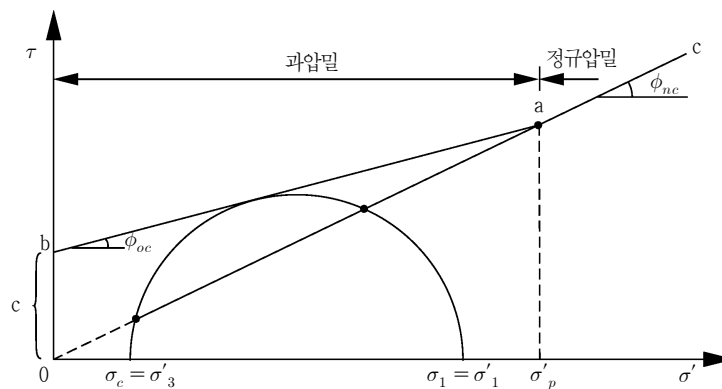


그림 8.29 NC 및 OC 점성토의 Mohr 원과 파괴포락선의 관계

### 예제 8.6

정규압밀점토에 대하여 압밀배수(CD) 삼축압축시험을 실시하였다. 시험결과 파괴 시  $\sigma_{3f}=300 \text{ kN/m}^2$ , 축차응력  $\Delta\sigma_f = \sigma_{1f} - \sigma_{3f} = 300 \text{ kN/m}^2$ 이었다. 다음에 답하여라.

- 1) Mohr원과 파괴포락선을 작도하여라.
- 2) 이 점토의 강도정수는 얼마인가?
- 3) 파괴면이 최대주응력면과 이루는 각은?
- 4) 파괴면에서의 수직응력,  $\sigma_f$ 과 전단응력  $\tau_f$ 은 얼마인가?

풀이

- 1) 파괴 시 최대주응력은  $\sigma_{1f} = \sigma_{3f} + \Delta\sigma_f = 300 + 300 = 600 \text{ kN/m}^2$ 이다.

$\sigma_{3f} = 300 \text{ kN/m}^2$ ,  $\sigma_{1f} = 600 \text{ kN/m}^2$ 을 지름으로 하여 Mohr원을 작도한다. 정규압밀점토이므로 좌표 원점로부터 Mohr원에 접하도록 파괴포락선을 작도하면 그림 8.30과 같다.

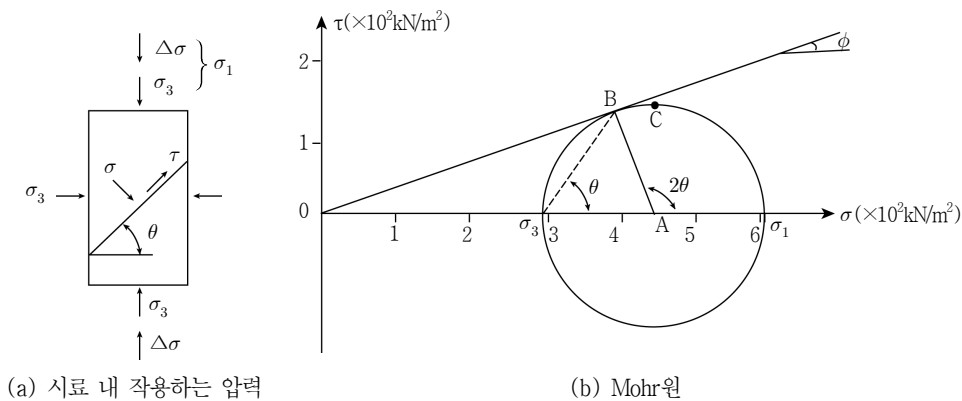


그림 8.30 예제 8.6

- 2) 그림 8.30으로부터 내부마찰각을 직접 측정하면  $\phi = 19^\circ$ 이다.

$$\text{또는 } \sin\phi = \frac{AB}{OA} = \frac{\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}}{\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}} = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}} = \frac{600 - 300}{600 + 300} = 0.33 \text{ 이므로}$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{1}{3}\right) = 19.5^\circ$$

- 3) 식 8.8로부터  $\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} = 45^\circ + \frac{19.5^\circ}{2} = 54.8^\circ$

- 4) 식 8.1로부터 수직응력은

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \\ &= \frac{600 + 300}{2} + \frac{600 - 300}{2} \cos(2 \times 54.8^\circ) = 450 - 50 = 400 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

식 8.2로부터 전단응력은

$$\tau_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta = \frac{600 - 300}{2} \sin(2 \times 54.8^\circ) = 141 \text{ kN/m}^2$$

이 계산으로부터 알 수 있는 것은 시료가 받을 수 있는 최대전단응력은 그림의 C점에서  $\tau_{\max} = 150 \text{ kN/m}^2$ 로 수직응력  $\sigma_1 = 450 \text{ kN/m}^2$  (주응력면과 이루는 각  $\theta = 45^\circ$ )에서 나타나나 실제로는 이보다 작은  $\sigma_f$ 와  $\tau_f$ 에서 파괴됨을 알 수 있다.

## 8.5.2 압밀비배수( $CU$ 또는 $\overline{CU}$ ) 강도정수

- 압밀비배수 삼축압축시험 : 시료를 배수상태로 두고 압밀한 후 비배수상태에서 시료를 전단하여 강도정수를 구하는 시험.

· 축하중의 재하단계에서 과잉간극수압을 유발하므로 이를 적용하여 유효강도정수( $c'$ ,  $\phi'$ )를 구하는데( $\overline{CU}$  시험), 압밀배수( $CD$ ) 삼축압축시험에서 구한 강도정수(그림 8.28b)와 근사한 값을 주므로 시간소요가 많은  $CD$  시험을 대체하여 많이 사용된다.

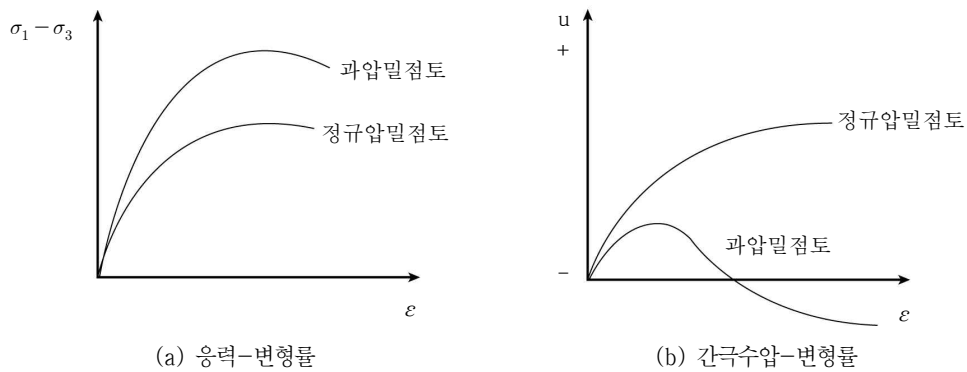


그림 8.31 압밀비배수시험에 의한 응력-변형률, 간극수압-변형률곡선

- 그림 8.31 :  $CU$  시험에 의한 응력-변형률, 간극수압-변형률곡선을 도시.

-  $CU$  시험에 의한 응력-변형률 변화추이 :

과압밀점토는 촘촘한 사질토를,

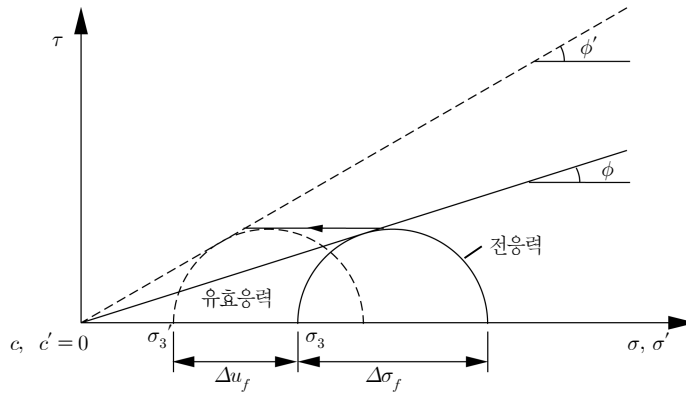
정규압밀점토는 느슨한 사질토의 거동과 유사.

- 간극수압-변형률곡선(그림 8.31b) :

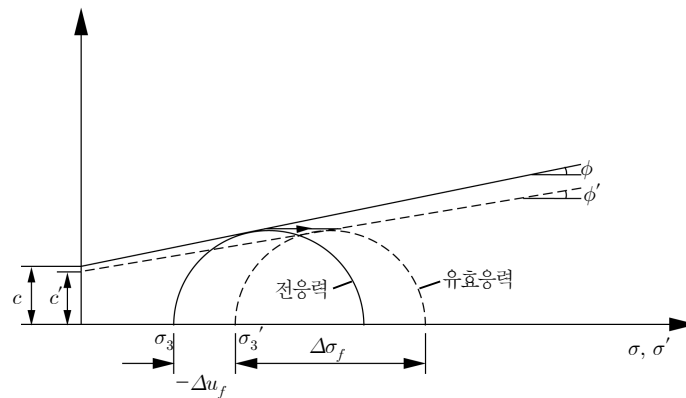
· 과압밀점토 : 변형이 진행되면서 초기보다 간극수압이 감소.

· 정규압밀점토 : 초기보다 간극수압이 증가하는 모습.

-  $CD$  시험의 체적변화에서도 알 수 있는 바와 같이 과압밀점토는 변형이 진행되면서 체적이 팽창함으로 인하여 증가한 공극을 간극수가 채워주지 못하므로 간극수압이 감소하며, 정규압밀점토는 변형이 진행되면서 체적이 감소하므로 공극도 감소하여 간극수압이 증가.



(a) 정규압밀점토



(b) 과압밀점토

그림 8.32 압밀비배수시험에 의한 Mohr-Coulomb 파괴포락선 작도(전응력과 유효응력원의 위치 주목)

- 그림 8.32 : 압밀비배수시험에 의해 구한 정규압밀점토와 과압밀점토의 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 도시.

·  $CD$  시험의 경우와 같이 정규압밀점토는 원점을 통과하고,

과압밀점토는 점착력을 가져 절편이 있음.

· 정규압밀점토 : 정의 간극수압이 발생하여, 이를 고려하여 파괴포락선을 작도한 결과 유효응력전단강도정수( $c', \phi'$ )가 전응력전단강도정수( $c, \phi$ )보다 크게 나타났다

(Mohr원이 좌측으로 이동).

· 과압밀점토 : 부의 간극수압이 나타나므로 전응력과 유효응력으로 구한 Mohr원의 위치가 정규압밀점토의 경우와 반대로 이동하는 것으로 나타난다(우측으로 이동).

- 전응력강도정수( $c, \phi$ ) : 지반이 외력의 작용으로 압밀되어 평형을 유지하다 외력이 추가 작용될 때 적용할 수 있다.

· 일례로 제방에 수위가 급강하하였을 때 흙댐 심벽의 안정성 해석이나 연약지반상의 제방에 추가 제방을 건설할 때 안정성 해석 등.

· 간극수압측정을 병행한  $\overline{CU}$ 에서 유효응력강도정수는  $CD$  시험의 강도정수와 동일하므로 유효응력 안정해석 시 사용.

### 예제 8.7

정규압밀된 불교란 점성토에 대하여  $\overline{CU}$  실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 표에 나타난 시험결과로부터 다음의 경우에 대하여 파괴포곡선, Mohr원, 마찰각을 구하여라.

셀압 $\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	축응력, $\sigma_1$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 축차응력, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 간극수압계수 $u_f$ (kN/m <sup>2</sup> )
200	350	150	102
400	680	280	210
600	1,010	410	320

- 1) 전응력의 경우
- 2) 유효응력의 경우

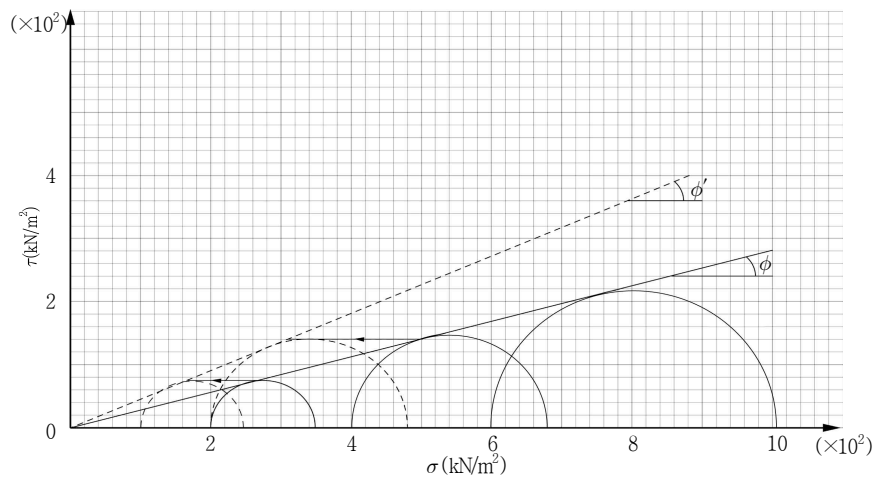


그림 8.34 예제 8.8

### 풀이

- 1) 전응력으로 구한 축응력과 셀압을 이용하여 그린 Mohr원과 파괴포락선을 실선으로 그림 8.33에 나타내었다. 전응력의 경우 내부마찰각은 그림으로부터 직접 측정하거나 기하학적인 관계식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \frac{150}{350 + 200} = 0.273 \quad \text{따라서 } \phi' = \sin^{-1} 0.273 = 15.8^\circ$$

- 2) Mohr원과 파괴포락선을 그림에 점선으로 나타내었다. 유효응력의 경우도 내부마찰각은 그림으로부터 직접 측정하거나 기하학적인 관계식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 유효응력으로 구한 셀압과 축응력은 다음과 같이

$$\begin{aligned} \sigma'_3 &= \sigma_3 - u_f = 200 - 102 = 98 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_1 &= \sigma_1 - u_f = 350 - 102 = 248 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

으로 계산된다. 따라서

$$\sin \phi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} = \frac{150}{248 + 98} = 0.43 \quad \text{따라서 } \phi' = \sin^{-1} 0.43 = 25.6^\circ \text{ 이다.}$$



### 8.5.3 비압밀비배수(UU) 강도정수

- 비압밀비배수 삼축압축시험 : 시료의 사전압밀과정을 거치지 않고 비배수 상태에서 전응력으로 파괴하여 파괴포락선을 작도한다(그림 8.34).

· 이 경우 배수를 허용하지 않으므로 구속압의 증가량만큼 간극수압이 증가하고, 시료가 압밀이 되지 않아 포락선은 수평선으로 도시된다. 이때의 절편은 비배수전단강도(undrained shear strength,  $S_u$ ) 또는 비배수점착력(undrained cohesion,  $C_u$ ).

$$S_u (= c_u) = \frac{1}{2}(\sigma_{1f} - \sigma_{3f}) \quad (8.16)$$

여기서  $\sigma_{3f}$ ,  $\sigma_{1f}$ 는 파괴 시의 전응력으로 구한 구속압 및 축응력.

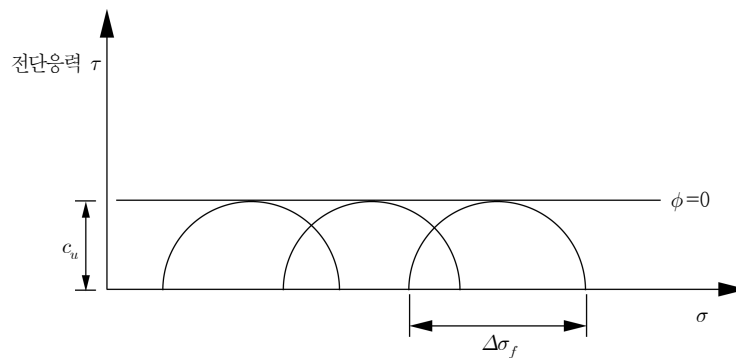


그림 8.34 비압밀비배수 삼축압축시험의 Mohr 원과 파괴포락선

- 비배수전단강도의 현장유효응력( $\sigma'_o$ )과의 비에 대하여 Skempton과 Ladd :

$$\text{정규압밀점토(Skempton)} : \frac{C_u}{\sigma'_o} = 0.11 + 0.0037PI \quad (8.17a)$$

$$\text{과압밀점토(Ladd)} : \frac{C_u}{\sigma'_o} = 0.11 + 0.0037PI(OCR)^{0.8} \quad (8.17b)$$

여기서  $PI$ 는 소성지수,  $OCR$ 은 과압밀비이다.

- 부분포화점토(partially saturated clay)에 대하여 비압밀비배수 전단시험을 실시 :

· 파괴 시 축차응력이 구속압의 증가에 따라 증가하녀 초기구속압 부근에서 곡선.

이는 시료 내에 공기가 있어 구속압을 간극수가 아닌 흙이 일부 부담하기 때문.

· 구속압이 커지면 공기가 간극수 속으로 녹아들어 포화상태( $S=1$ )에 도달하며, 파괴포락선은 수평하게 된다.

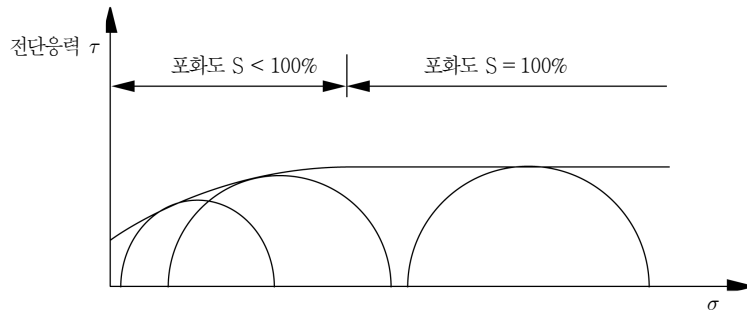


그림 8.35 불포화토의 비압밀비배수시험의 Mohr원과 파괴포락선

#### 예제 8.8

포화된 점토시료를 직경 3.8cm, 길이 7.6cm로 성형하여 *CD* 및 *UU* 삼축압축시험을 실시하였다. 시험결과가 다음 표와 같을 때 각 시험에 대한 강도정수를 구하여라.

시험방법	구속압, $\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	축하중 (kg)	축방향 변형 $\Delta l$ (mm)	부피변화, $\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )
<i>UU</i>	2.0	22.8	9.85	—
	4.0	23.7	9.54	—
	6.0	24.1	9.79	—
<i>CD</i>	2.0	46.7	10.81	6.6
	4.0	84.8	12.26	8.2
	6.0	126.5	14.17	9.5

#### 풀 이

파괴 시의 축차응력은 축하중을 파괴 시의 단면적으로 나누어 구한다. 파괴 시의 단면적은 식 8.9를 이용하여 구한다. 시험 전의 점토길이  $L_o$ 는 7.6cm, 시료의 단면적  $A_o=11.34\text{cm}^2$ , 시료의 체적  $V_o=86\text{cm}^3$ 이었다.

$$A_c = A_o \frac{(1 - \Delta V/V_o)}{1 - \Delta l/L_o} \quad (8.9)$$

수정된 단면적  $A_c$ 를 구하고 축차응력과 주응력을 다음 표와 같이 구하였다.

시험방법	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta l/L_o$	$\Delta V/V_o$	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )
<i>UU</i>	2.0	0.130	—	11.69	1.95	3.95
	4.0	0.126	—	12.92	1.83	5.83
	6.0	0.129	—	13.02	1.85	7.85
<i>CD</i>	2.0	0.142	0.077	12.22	3.82	5.82
	4.0	0.161	0.095	12.25	6.91	10.90
	6.0	0.186	0.110	12.40	10.20	16.20

이 결과를 이용하여 파괴 시의 Mohr원과 파괴포락선을 그려 그림 8.36에 나타내었다.

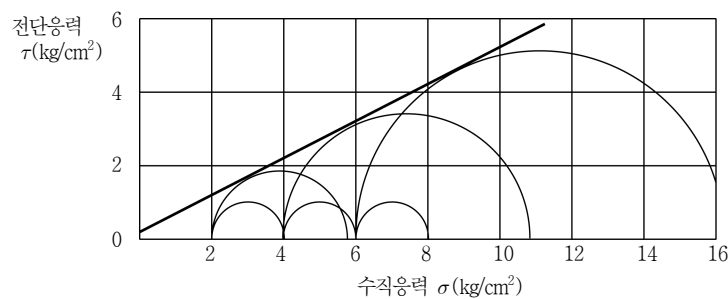


그림 8.36 예제 8.8

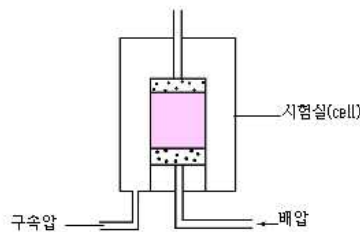
이 그림으로부터  $UU$  시험의 강도정수  $c_u = 1.1 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_u = 0^\circ$   
 $CD$  시험의 강도정수  $c_u = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_u = 25^\circ$   
 이다.

## 8.5.4 배압

- 배압(back pressure) : 포화점토를 시료채취과정이나 운반과정에서 응력이완이나 수분이 증발하게 되면 불포화토의 상태가 될 수 있다. 이 경우 실험실에서 흡시료를 100% 포화시키기 위하여 흡시료 속으로 수압을 가하여 기포를 제거하는 수압.
- 삼축압축시험에서 배압을 주는 목적 :  
 ⇒ 시료를 완전포화시켜 현장의 포화된 간극수압조건을 재현하기 위함.
- 배압을 적용할 때는 시료에 손상을 주지 않기 위하여 배압( $\sigma_B$ )을 가한 만큼 구속압( $\sigma_3$ )도 동시에 증가하여  $\sigma_3 > \sigma_B$  상태가 유지되어야 한다.

### 1. 개 요

- 1) 현장에서 완전포화상태로 있는 흙을 채취하여 시험실에서 공시체를 만들었을 때 수분의 증발 등에 의해 시료가 불포화상태가 된다면 현장의 실제 거동과 상이한 거동을 하게 될 것이다.



- 2) 따라서, 시험에 앞서 공시체를 포화상태로 만들어 주기 위하여 시료 내부에 수압을 가해주는 데 이 수압을 배압(Back Pressure)이라 한다.(배압의 크기는 통상  $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ 이다)

### 2. 배압목적[불포화토를 포화토로 만드는 이유]

- 1) 시료에 공기가 유입되어 불포화상태가 되면
  - ①  $UU$ 시험시 정확한  $\phi = 0$ 해석이 곤란하고,
  - ② 또한,  $CU$ 시험에서는 정확한 간극수압 측정이 곤란하다.
- 2) 따라서, 유린된 기포를 원상태로 용해시키기 위해서는 공시체가 원상태의 수압을 받도록 시료에 별도의 수압을 가해주어야 한다.

### 3. 배압 방법

- 1) 먼저 시료를 수조에 담아 약 20시간 정도 충분히 포화시킨다
- 2) 시료를 삼축압축시험기에 넣고 구속압력과 배압을 동시에 조금씩 가한다.  
 → 이때 각 단계별 압력의 증가량은  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 이 적당

- 3) 다음에 다시 구속압력( $\Delta\sigma_3$ )을 증가시키고 이때 유발된 과잉간극수압( $\Delta u$ )을 측정한다
- 4) 간극수압계수 B를 계산하여 포화도를 판단한다.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \geq 0.95 \text{ 이면 OK}$$

- 5)  $B < 0.95$ 이면 다시 포화시켜 위의 과정을 반복한다.

#### 4. 배압시 주의사항

- 1) 배압은 반드시 구속압력과 동시에 가해야 하며, 배압이 구속압력보다 커지면 시료가 교란되므로 주의하여야 한다.
- 2) 배압을 가할 때에는 공시체 내외부가 평형이 되도록 하중을 여러 단계로 나누어 가해야 한다.
- 3) 배압은 시료속의 유효응력을 변화시키지 못하므로 작용 시켜준 Back Pressure 만큼 구속응력을 증가시켜 주어야 한다.
- 4)  $B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} < 0.97$ 이면 UU-Test 자체가 쓸모없다.

## 8.6 간극수압계수

- 삼축압축시험에서 점토에 압력이 작용하면 과잉간극수압이 발생.
- 간극수압계수(porewater pressure) : 전응력증가량( $\Delta\sigma$ )에 대한 간극수압증가량( $\Delta u$ )의 비( $=\Delta u/\Delta\sigma$ ).
- 간극수압계수의 종류 :
  - 등방압에 대한 간극수압계수 B, 축차응력에 대한 간극수압계수 D,
  - 이들을 조합한 3축응력에 대한 간극수압계수  $A(=D/B)$ .

### 8.6.1 등방압축으로 생기는 간극수압

- 흙시료에 등방삼축응력이  $\Delta\sigma_3$  만큼 증가, 유효응력증가분  $\Delta\sigma_3'$  :

$$\Delta\sigma_3' = \Delta\sigma_3 - \Delta u \quad (8.18)$$

- 유효응력변화에 의한 시료의 체적변화( $\Delta V_v$ ) :

$$\Delta V_v = m_v V_0 (\Delta\sigma_3 - \Delta u) \quad (8.19)$$

여기서  $m_v$ 는 흙시료의 체적 압축계수,  $V_0$ 는 흙시료의 초기체적.

- 식 8.19 : 식 7.32( $\Delta H = H_0 m_v \Delta\sigma'$ )으로부터 시료의 단면적을 곱하여 부피로 변환한 식  $\Delta V_v = m_v V_0 \Delta\sigma'$ 을 이용한 것. 이를  $m_v$ 에 대해 정리 :

$$m_v = \frac{\Delta V_v}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta \sigma'} \quad (8.20)$$

- 간극 속에 포함된 물과 공기의 체적변화계수를  $m_f$ 라고 하면 :

$$m_f = \frac{\Delta V_f}{n \cdot V_0} \cdot \frac{1}{\Delta u} \quad (8.21)$$

여기서  $n$ 은 간극률,  $\Delta V_f$ 는 간극 속 물과 공기의 부피,  $\Delta u$ 는 간극수압의 변화분.

$$\Delta V_f = m_f n V_0 \Delta u \quad (8.22)$$

- 물과 공기가 배출되는 것이 방지되어 있다면 : 식 8.19와 식 8.20은 같으므로 (즉,  $\Delta V_v = \Delta V_f$ ) 이를 간극수압변화  $\Delta u$ 에 대하여 정리하면 식 8.23과 같다.

$$\begin{aligned} m_v V_0 (\Delta \sigma_3 - \Delta u) &= m_f n V_0 \Delta u \\ \Delta u (m_f n + m_v) &= m_v \Delta \sigma_3 \\ \Delta u &= \frac{m_v}{m_v + n \cdot m_f} \cdot \Delta \sigma_3 = \frac{1}{1 + n \cdot \frac{m_f}{m_v}} \cdot \Delta \sigma_3 = B \Delta \sigma_3 \end{aligned} \quad (8.23)$$

여기서  $B = \frac{1}{1 + n \cdot \frac{m_f}{m_v}}$  로 한다. 식 8.23을  $B$ 에 대하여 정리하면

$$B = \frac{1}{1 + n \frac{m_f}{m_v}} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (8.24)$$

- 계수  $B$  : 등방구속압( $\Delta \sigma_3$ )이 작용한 상태에서 생긴 간극수압계수.  
간극수압계수는 완전포화 시는 1.0( $\because m_f=0$ ), 완전건조 시는 0(zero)( $\because \Delta u=0$ ).
- 불포화토의 간극압계수  $B$ 와 포화도  $S$ 의 관계 : 그림 8.37에 나타냄.  
대체로  $B$ 계수가 0.9 이상이면 시료가 포화되었다고 본다.

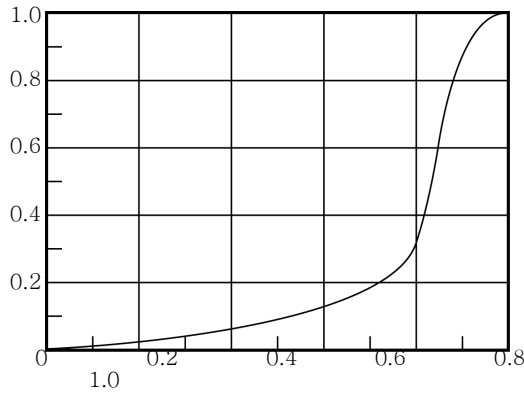


그림 8.37 불포화토의 간극압계수  $B$ 와 포화도  $S$ 의 관계

### 8.6.2 일축압축으로 인한 간극수압

- 횡방향 구속 없이 일축압축증가가  $\Delta\sigma_1$ 로 가해질 때 횡방향 응력변화 :

$$\sigma_2' = \sigma_3' = -\Delta u \quad (8.25)$$

이는 팽창 시 간극수압변화를 나타냄.

- 일축압축증가로 인한 체적변화 :

$$\Delta V_v = m_v V_0 (\Delta\sigma_1 - \Delta u) + 2m_e V_0 (-\Delta u) \quad (8.26)$$

- 간극수압의 변화에 의한 간극수부피의 변화 :

$$\Delta V_f = n V_0 m_f \Delta u \quad (8.27)$$

- 일축압축으로 인한 흙의 체적변화, 내부공기와 물의 변화는 같으므로( $\Delta V_v = \Delta V_f$ ).

식 8.26과 식 8.27을 같게 놓으면

$$\begin{aligned} m_v(\Delta\sigma_1 - \Delta u) + 2m_e V_0 (-\Delta u) &= n V_0 m_f \Delta u \\ \Delta u (n m_f + m_v + 2m_e) &= m_v \Delta\sigma_1 \\ \Delta u &= \frac{m_v}{n m_f + m_v + 2m_e} \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{1}{n \cdot \frac{m_f}{m_v} + 1 + 2 \frac{m_e}{m_v}} \cdot \Delta\sigma_1 \end{aligned} \quad (8.28)$$

여기서  $D = \frac{1}{n \cdot \frac{m_f}{m_v} + 1 + 2 \frac{m_e}{m_v}}$  로 놓으면

$$D = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1} \quad (8.29)$$

$D$ 는 일축압축 시 간극수압계수.

### 8.6.3 삼축압축 시 간극수압

- 위의 두 조건 작용 시 간극수압의 합 :

$$\begin{aligned} \Delta u &= B\Delta\sigma_3 + D(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \\ &= B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \end{aligned} \quad (8.30)$$

여기서  $A = D/B$  : 삼축압축 작용 시 간극수압계수.

- 만일 포화된 흙의  $B=1$ 이라고 하여 식 8.30을 변형 :

$$\Delta u - \Delta \sigma_3 = A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (8.31)$$

$$\text{즉 } A = \frac{\Delta u - \Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3} \quad (8.32)$$

삼축강도시험에서는 구속응력을 일정하게 하므로  $\Delta \sigma_3 = 0$ .

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} \quad (8.33)$$

- 흙의 종류에 따른 간극수압계수  $A$ 의 변화율

표 8.2 흙의 종류에 따른 간극수압계수  $A$ 의 변화

흙의 종류	$A$ 값
예민점토	1.5~2.5
정규압밀점토	0.7~1.3
약간 과압밀점토	0.3~0.7
심한 과압밀점토	-0.5~0
매우 느슨한 모래	2~3

#### 예제 8.9

불교란 과압밀시료에 대하여  $\overline{CU}$  시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

셀압력, $\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 축차응력, $(\sigma_{1f} - \sigma_3)$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 간극수압 $u_f$ (kN/m <sup>2</sup> )
100	410	-65
200	510	-10
400	730	80
600	970	180

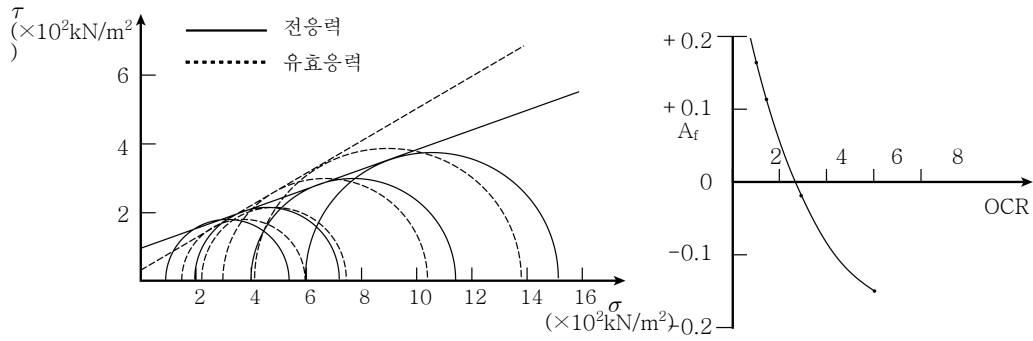
- 1) Mohr-Coulomb 파괴포락선을 전응력과 유효응력에 대하여 작도하여라.
- 2) 전응력과 유효응력에 대한 강도정수는?
- 3) 대상 점성토의 선형압밀하중이 600kN/m<sup>2</sup>이라고 할 때, OCR 대비 간극수압계수의 변화를 도시하여라.

#### 풀 이

- 1) 위의 표로부터 전응력과 유효응력에 의한 최대 및 최소주응력을 다음 표와 같이 구한다. 이를 이용하여 Mohr원과 파괴포락선을 작성하여 그림 8.38에 나타내었다.

$\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{1f}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{3f}(=\sigma_3 - u_f)$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{1f}(=\sigma_{1f} - u_f)$ (kN/m <sup>2</sup> )
100	510	165	575
200	710	210	720
400	1,130	320	1,050
600	1,570	420	1,390





(a) Mohr-Coulomb 파괴포락선

(b) OCR과 간극수압계수 A

그림 8.38 예제 8.9

2) 전응력과 유효응력에 대한 강도정수는 그림 8.38로부터

전응력의 경우 :  $c_u = 110 \text{ kN/m}^2$ ,  $\phi_u = 19^\circ$

유효응력의 경우 :  $c' = 20 \text{ kN/m}^2$ ,  $\phi' = 25.5^\circ$

이다.

3) 삼축압축시험의 경우 시험하는 동안 셀압의 변화가 없으므로  $\Delta\sigma_3 = 0$ 이다.

따라서  $\Delta\sigma_1 = \sigma_{1f} - \sigma_3$ 로 쓸 수 있다.  $\Delta u_d = u_f$ 로 쓸 수 있으므로 OCR과 간극수압계수 A의 관계는 다음 표와 같이 계산된다.

$\sigma_3 \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$\sigma_p \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$\text{OCR} (= \frac{\sigma_p}{\sigma_3})$	$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}$
100	600	6	-0.159 (= -0.65/4.1)
200		3	-0.02
400		1.5	0.110
600		1.0	0.185

OCR과 간극수압계수 A의 관계를 그림으로 나타내면 그림 8.38b와 같으며 표 8.2에 의하면 실험토는 심한 과압밀점토임을 알 수 있다.

## 8.7 응력경로(Stress Path)

### 8.7.1 응력경로의 정의

- 최대전단응력을 나타내는 Mohr원의 1점의 좌표를 ( $p$ ,  $q$ ), 이는 다음 식 :

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (8.34a)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (8.34b)$$

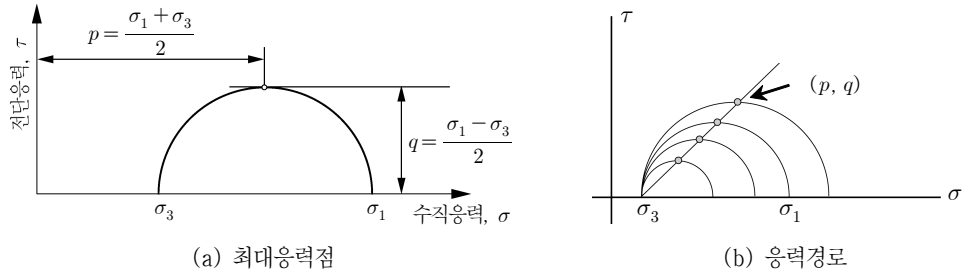


그림 8.39 최대응력점과 응력경로

- 응력경로(stress path) : 지반 내에 응력이 변하는 동안의 응력상태에 대해  $p, q$  점을 연결하는 선을 그어 응력변화이력을 표시한 것.

- 응력경로 : 유효응력경로( $p', q'$ )와 전응력경로( $p, q$ )로 구분, 유효응력경로 :

$$p' = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - u) + (\sigma_3 - u)] (=p - u) \quad (8.35a)$$

$$q' = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - u) - (\sigma_3 - u)] (=q) \quad (8.35b)$$

## 8.7.2 $K_f$ 선

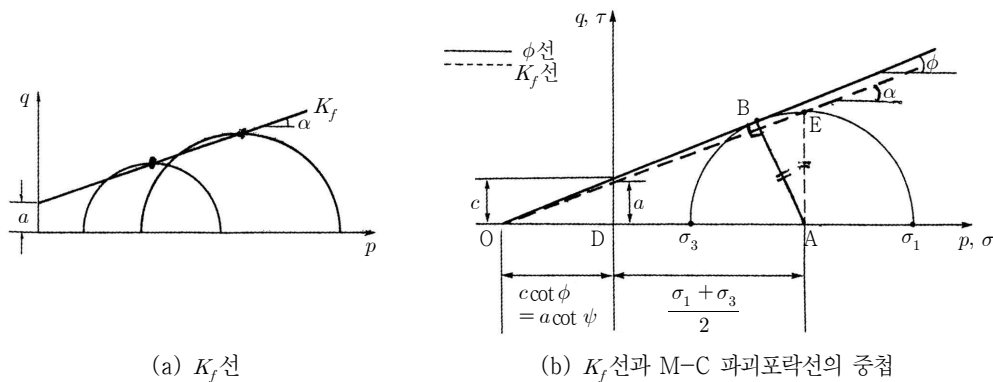
- 그림 8.40a : 구속압을 달리하여 그린 Mohr원의 최대전단응력점 ( $p, q$ )를 이은 것.

⇒ 이 선을  $K_f$ 선 또는 수정파괴포락선,

$K_f$ 선의 수직절편을  $a$ , 기울기를  $\alpha$ 로 놓아 Mohr-Coulomb 파괴포락선으로부터 얻은 전단강도정수  $c, \phi$ 와 구분하여 다음과 같이 표현.

$$q_f = a + p_f \tan \alpha \quad (8.36)$$

여기서  $a$  :  $q$ 축의 절편,  $p_f$  : 최대전단응력,  $\alpha$  :  $K_f$ 선의 기울기이다.



(a)  $K_f$ 선

(b)  $K_f$ 선과 M-C 파괴포락선의 중첩

그림 8.40  $K_f$ 선과 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 관계

-  $K_f$  선을 Mohr-Coulomb 파괴포락선과 중첩하여 그림 8.40b에 나타냄.

그림으로부터  $OA \sin \phi$ 와  $OA \tan \alpha$ 는 Mohr원의 반지름과 같아 동일.

$$\sin \phi = \tan \alpha \quad (8.37a)$$

p축의 음의 부분 OD는  $K_f$ 선과 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 절편.

$$c \cot \phi = a \cot \alpha \quad (8.37b)$$

- 식 8.37b에 식 8.37a를 대입하면 다음과 같은 관계가 성립.

$$c = \frac{a}{\cos \phi} \quad (8.37c)$$

#### 예제 8.10

포화점토시료에 대하여 압밀비배수시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$K_f$  선을 이용하여 유효응력강도정수를 구하라.

셀압력, $\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 축차응력, $(\sigma_{1f} - \sigma_3)$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 간극수압 $u_f$ (kN/m <sup>2</sup> )
150	172	70
300	321	134
450	484	192

#### 풀이

주어진 시험자료로부터 파괴 시의 응력경로점 ( $p'$ ,  $q'$ )을 다음과 같이 계산하였다.

$\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{1f}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{3f} (= \sigma_3 - u_f)$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_{1f} (= \sigma_{1f} - u_f)$ (kN/m <sup>2</sup> )	$p' = \frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2}$	$q' = \frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$
150	322	80	252	166	86
300	621	166	487	327	161
450	934	258	742	500	242

응력경로점 ( $p'$ ,  $q'$ )을 이용하여 수정파괴포락선을 구하면 그림 8.41과 같다.

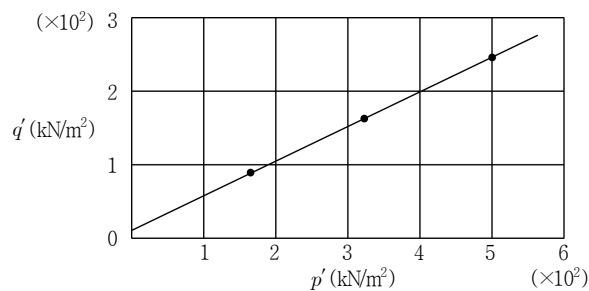


그림 8.41 예제 8.10

그림으로부터 절편을 구하면  $a' = 15 \text{ kN/m}^2$ , 기울기  $\alpha' = 24.5^\circ$ 이다. 식 8.37a, 8.37c를 이용하여 전단강도정수를 구하면

$$\phi' = \sin^{-1}(\tan \alpha') = \sin^{-1}(0.445) = 26.4^\circ$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi} = \frac{15}{\cos 26.4^\circ} = 17 \text{ kN/m}^2$$

이다.

### 8.7.3 압밀시험의 응력경로

- 그림 8.42 : 압밀시험에서 하중을 증가시켜 압밀이 진행되는 동안의 전응력경로와 유효응력경로를 나타낸 것.

· 처음 이전하중에서 시료에 가해진 응력상태는 Mohr원 I로 표현.

이미 이전하중단계의 압밀이 완료되었으므로 과잉간극수압은 0.

다음 단계의 하중이 가해지는 순간 실선의 Mohr원 1로 이동하고(응력경로는  $X \rightarrow Y$ 로 이동), 이후 압밀이 진행되면서 Mohr원 4로 이동하여 가해진 하중단계의 압밀이 완료(응력경로는  $Y \rightarrow Z$ 로 이동).

· 실선으로 된 Mohr원의 응력경로 : 전응력경로.

· 점선으로 된 Mohr원 : 압밀이 진행되는 동안의 유효응력원의 변화를 나타냄.

초기 Mohr원 I로부터 II, III을 거쳐 IV에서 완료되고,

Mohr원 IV는 Mohr원 4와 동일. 점선으로 된 Mohr원의 응력경로는 유효응력경로.

· 압밀과정 중 Mohr원 2와 II, 3과 III는 그 크기가 동일. 즉 전응력 Mohr원 2와 유효응력 Mohr원 II의 최대주응력의 차이는 과잉간극수압  $\Delta u$ 를 나타냄.

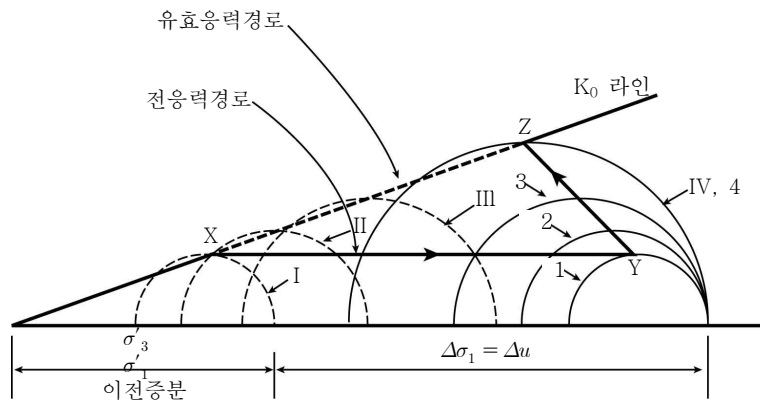


그림 8.42 압밀시험에서 응력경로

### 8.7.4 삼축압축시험의 응력경로

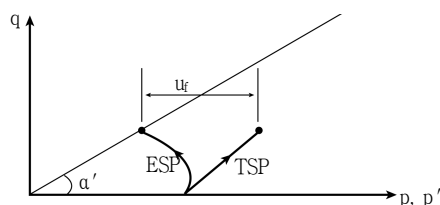
- 삼축압축시험에서 점토를 등방압밀시킨 후 비배수조건에서 전단시키는  $\overline{CU}$  시험을 실시하면 압밀이 완료될 때의 응력경로는  $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$ 이므로

$$p = p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (8.38a)$$

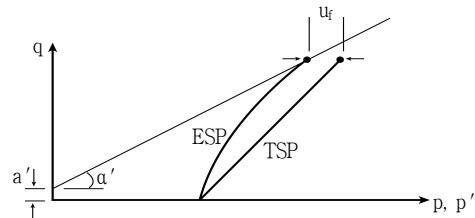
$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 0 \quad (8.38b)$$

이고  $p-q$ 도의 가로축상에 있다.

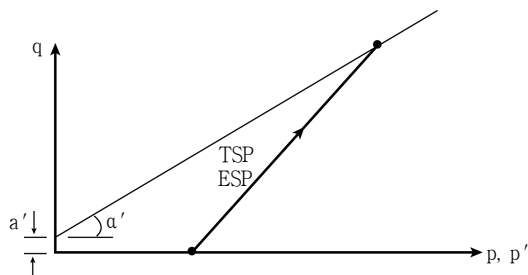
- 식 8.38a, 8.38b를 이용 축차응력이 증가할 때의  $(p, q)$ 를 계산하여 점을 찍으면 :  
 $\Rightarrow$  그림 8.43a에 보인 바와 같이 수평선과  $45^\circ$ 를 이루는 경로상에 직선으로 도시됨.
- $45^\circ$  경로상에 찍힌 이유 : 삼축압축시험은 셀압( $\sigma_3$ )이 일정하여  $(p, q)$  모두 최대주응력  $\sigma_1$ 만이 증가하기 때문.
- 전응력경로(total stress path, TSP) : 이와 같이 간극수압을 고려하지 않고 도시한  $(p, q)$  응력경로.
- CU 시험에서는 간극수압  $u$ 를 측정.  
 식 8.35a, 8.35b를 이용하여  $(p', q')$ 를 계산하여 유효응력경로(effective stress path, ESP)를 구함.
- 정규압밀점토의 경우 정의 간극수압이 발생 : TSP의 좌측에 그림 8.43a의 곡선과 같이 나타난다.
- 그림 8.43b : 과압밀점토의 TSP와 ESP를 도시한 것.
- TSP : 정규압밀점토와 마찬가지로  $45^\circ$ 의 직선으로 나타남.
- ESP : 정규압밀점토의 경우 간극수압의 발생 정도가 정규압밀점토보다 매우 적은 관계로 TSP와 같은 방향의 경로를 따라 이동하는 곡선.
- 점토를 압밀배수(CD) 시험으로 전단시킨 경우 :  
 그림 8.43c에 나타내었는데 간극수압이 발생하지 않게( $u=0$ ) 시료를 전단시키는 관계로 TSP와 ESP는 일치하며 오른쪽 상향으로  $45^\circ$  각도로 증가한다.



(a) 압밀배수시험-정규압밀점토의 경우



(b) 압밀배수시험-과압밀점토의 경우



(c) 압밀배수시험

그림 8.44 삼축압축시험의 전응력경로와 유효응력경로

### 8.3.7 응력경로

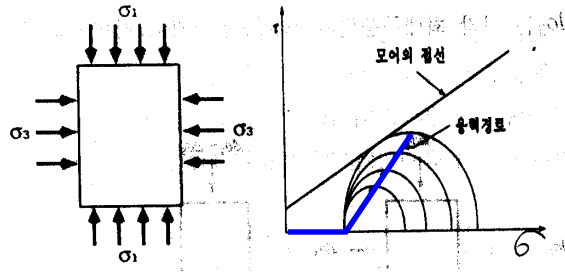
#### 1. 개요

- 1) 외부하중으로 인하여 흙 입자의 응력이 변해가는 과정을 직선 혹은 곡선으로 연결하여 그려진 선을 응력경로라 하며, 통상 Mohr원의 정점을 연결한 선을 말한다.
- 2) 응력경로(Stress Path)를 나타내는 방법에는 모아원에 의한 방법과 p-q 다이어그램에 의한 방법이 있는데, 모아원을 그려 응력경로를 나타내면 복잡해지고 혼돈될 우려가 있어 주로 P-q Diagram을 그려 나타낸다.

#### 2. Stress Pass 표시방법

##### 1) Mohr원에 의한 방법

삼축압축시험에서 구속압력  $\sigma_3$ 를 일정하게 유지한 상태에서 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )을 증가시켜 시료를 전단시키는 과정을 응력경로로 나타내면 아래의 그림과 같다. 모아원의 정점을 연결한 선이 응력경로이다.



##### 2) p-q Diagram에 의한 방법

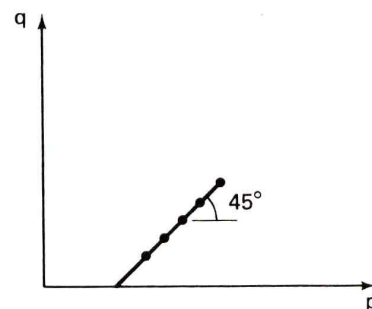
- ① 응력경로를 Mohr원으로 표시하면 응력이 바뀔 때마다 계속하여 그려야 하므로 복잡하고 번거롭다. 그래서, 모아원의 정점을 취하여 응력의 경로를 표시하는 p-q 다이어그램에 의한 방법을 주로 사용한다
- ② 모아원의 횡좌표 및 종좌표를 각각 p와 q로 정의한다.

- 전응력 경로(TSP)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, q = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

- 유효응력 경로(ESP)

$$p' = p - u, q' = q$$



☞ p는 항상 양(+)의 값이지만, q는  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$ 의 대소에 따라 양(+) 또는 음(-)의 값을 가진다.

즉,  $\sigma_v > \sigma_h$  이면,  $q > 0$  이고,

$\sigma_v < \sigma_h$  이면,  $q < 0$  이고,

$\sigma_v = \sigma_h$  이면, q는 횡축(p축)에 놓임

### 3. 응력경로 특징

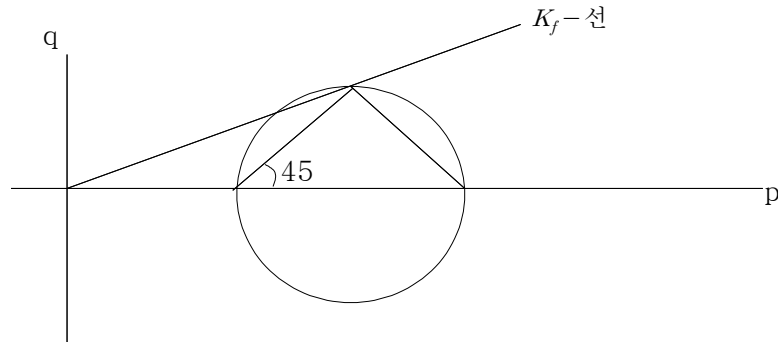
1)  $q$  값에 따른 연직응력 및 수평응력의 크기 비교

①  $q=0$ 이면,  $\sigma_v = \sigma_h$  (등방응력상태)

②  $q>0$ 이면,  $\sigma_v > \sigma_h$

③  $q<0$ 이면,  $\sigma_v < \sigma_h$

2)  $p$ - $q$  평면상의 한 점  $M(p, q)$ 을 알면 최대주응력( $\sigma_1$ )과 최소주응력( $\sigma_3$ )을 구할 수 있다.  $M$ 에서 그린 연직선 기준 좌우로 각각  $45^\circ$ (1:1경사) 되는 직선을 그려  $p$ 축과의 교점을 구하면 이 교점들이 각각  $\sigma_1$ 과  $\sigma_3$ 이다.



3) 만약 유효응력경로(ESP)가 전응력경로(TSP)보다 왼쪽에 있으면 ( $P > P'$ ) 양(+)의 간극수압이 작용하고, 오른쪽에 있으면( $P < P'$ ) 음(-)의 간극수압이 작용한다.

— 두 응력경로의 간격은 과잉간극수압의 크기를 나타낸다.

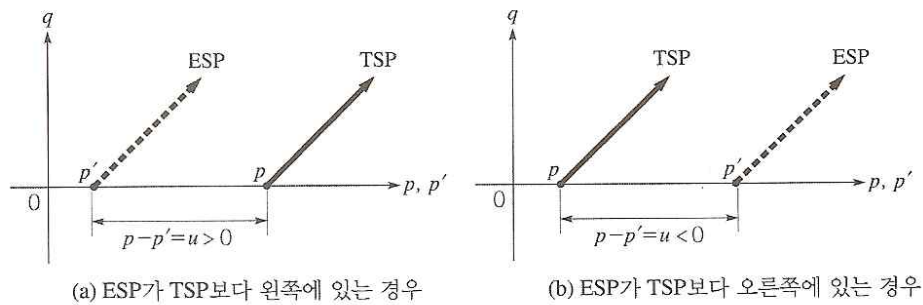


그림 7.79 TSP와 ESP의 위치에 따른  $p, q$ 의 대소 및 간극수압

### 4. 응력비

응력비(Stress ratio)란 연직응력에 대한 수평응력의 비를 말하며  $K$ 로 나타낸다.

$$\text{즉, } K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \text{ (전응력)} \quad K = \frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} \text{ (유효응력)}$$



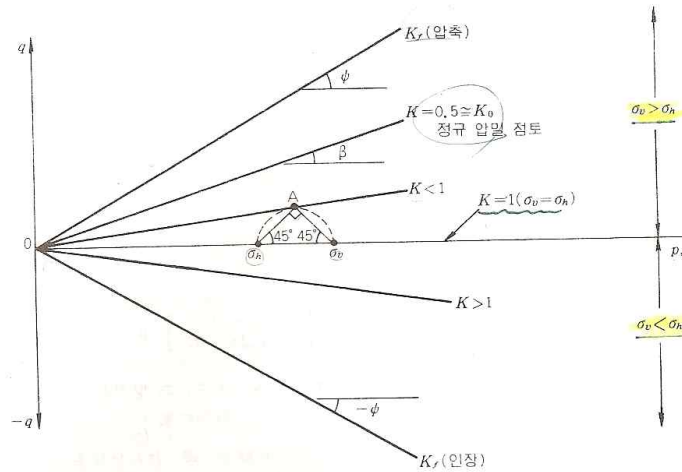
여기서,  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$ 는 연직방향 및 수평방향의 전응력

이것은 토압계수와 유사한 개념으로서 파괴상태에서는 다음과 같이 정의한다.

$$K_f = \frac{\sigma_{hf}}{\sigma_{vf}}$$

응력비가 일정하면 응력경로가 직선이 됨을 쉽게 알 수 있다. 초기의 응력상태가

$\sigma_{vi} = \sigma_{hi} = 0$ 일때 응력비  $K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ 를 각각 일정하게 작용시킨 응력경로를 나타내면 다음과 같다.



여기서 응력경로의 기울기는 일반적으로  $\beta$ 을 쓰며 특히 파괴상태에서는  $K_f$ 선 및  $\psi$ 로 표기하는데 이들 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{q}{p} = \tan \beta = \frac{1-K}{1+K}, \quad K = \frac{1-\tan \beta}{1+\tan \beta}$$

- 파괴상태는

$$\frac{q_f}{p_f} = \tan \psi = \frac{1-K_f}{1+K_f}, \quad K_f = \frac{1-\tan \psi}{1+\tan \psi}$$

● 여러 가지 경우의 응력비

- $K_f$  : 파괴시의 응력비로써 파괴상태 모아원의 정점을 연결한 선의 기울기
- $K_o$  : 정지상태의 응력비로써 정지상태 모아원의 정점을 연결한 선의 기울기
- $K_A$  : 주동파괴상태 모아원의 정점을 연결한 선의 기울기(주동토압계수)
- $K_P$  : 수동파괴상태 모아원의 정점을 연결한 선의 기울기(수동토압계수)

5. 응력경로에 따른 연직응력과 수평응력의 변화

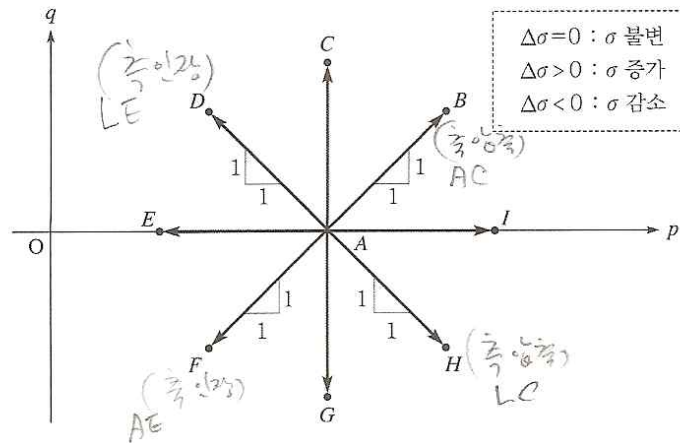


그림 7.81 여러 방향의 응력경로

- 1)  $O \rightarrow A : \Delta\sigma_v = \Delta\sigma_h > 0$  (등방압축과정)
- 2)  $A \rightarrow B : \Delta\sigma_v > 0, \Delta\sigma_h = 0$  (일축압축과정)
- 3)  $A \rightarrow C : \Delta\sigma_v > 0, \Delta\sigma_h = -\Delta\sigma_v$
- 4)  $A \rightarrow D : \Delta\sigma_v = 0, \Delta\sigma_h < 0$  (주동과정)
- 5)  $A \rightarrow E : \Delta\sigma_v = \Delta\sigma_h < 0$  (등방인장과정)
- 6)  $A \rightarrow F : \Delta\sigma_v < 0, \Delta\sigma_h = 0$  (일축인장과정)
- 7)  $A \rightarrow G : \Delta\sigma_v < 0, \Delta\sigma_h > 0$
- 8)  $A \rightarrow H : \Delta\sigma_v = 0, \Delta\sigma_h > 0$  (수동과정)

예제 8.11

구속응력( $\sigma_3$ )을  $2\text{kg/cm}^2$ 으로 두고 압밀비배수 삼축압축시험( $\overline{CU}$ )을 실시하여 다음과 같은 자료를 얻었다.

시편변형률( $\Delta L/L$ )	0	0.01	0.02	0.04	0.08	0.12
$(\sigma_1 - \sigma_3)(\text{kg/cm}^2)$	0	1.38	2.40	3.12	3.68	4.10
$u(\text{kg/cm}^2)$	0	0.52	0.80	0.88	0.92	0.87

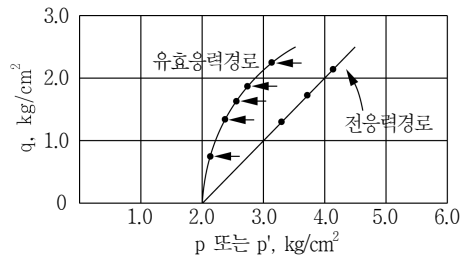
- 1) 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)를 도시하여라.
- 2) 시편변형률에 대한 A계수 변화를 그림으로 도시하여라.

풀이

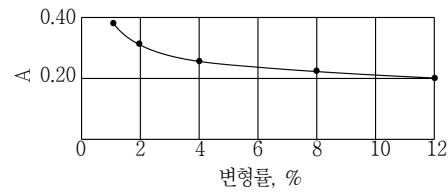
- 1) 시편변형률에 대한  $p, p', q$ 값을 계산하여 표로 나타내면 다음과 같다.

시편변형률 ( $\Delta L/L$ )	0	0.01	0.02	0.04	0.08	0.12
$\sigma_1 (\text{kg/cm}^2)$	2.0	3.28	4.40	5.12	5.68	6.10
$p$	2.0	2.69	3.20	3.56	3.84	4.05
$p' (=p-u)$	2.0	2.17	2.40	2.68	2.92	3.18
$q (=q')$	0	0.69	1.20	1.56	1.84	2.05

전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)를 각각  $(p, q)$ ,  $(p', q)$ 를 이용하여 시편변형률의 증가에 따라 도시하면 그림 8.46a와 같이 나타난다.



(a) 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)



(b) A계수 변화

그림 8.44 예제 8.11

2) 시편변형률에 대한 A계수 변화는 삼축압축시험에서 A계수식 8.31을 이용하면

$$\Delta l/L = 0.01 \text{ 일 때 } A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} = \frac{0.52}{1.38} = 0.37$$

$$\Delta l/L = 0.02 \text{ 일 때 } A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} = \frac{0.80}{2.40} = 0.33 \text{ 으로 구할 수 있다.}$$

나머지 부분에 대해서도 같은 계산을 반복하여 나타내면

시편변형률 ( $\Delta l/L$ )	0	0.01	0.02	0.04	0.08	0.12
A	0	0.37	0.33	0.28	0.25	0.21

시편변형률에 대하여 A계수 변화를 그림 8.46b에 나타내었다.



8.1 다음 그림에 보인 요소에 작용하는 응력에 대하여 다음에 답하여라.

- 1) Mohr원을 작도하고 평면기점을 표시하여라.
- 2) 최대 및 최소주응력을 구하여라. 평면기점을 이용하여 그림에 보인 요소에 주응력면과 작용하는 주응력을 표시하여라.
- 3) 요소에 나타난 바와 같은 수평면에  $35^\circ$  기울어진 평면에 작용하는 수직응력  $\sigma$  및 전단응력  $\tau$ 를 결정하여라.

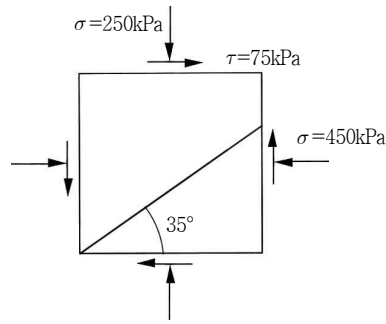


그림 8.45 연습문제 8.1

8.2 어느 점의 최대주응력이  $30\text{kN/m}^2$ , 최소주응력이  $7.5\text{kN/m}^2$ 이며 최대주응력은 수평면에 작용하고 있다. 다음에 답하여라.

- 1) Mohr원을 작도하고 평면기점을 표시하여라.
- 2) 최대전단응력점을 표시하고 이때의 수직응력과 전단응력수평면에 대한 기울기를 구하여라.
- 3) 수평면에 대하여 시계반대방향으로  $20^\circ$  기울어진 평면에서의 수직응력  $\sigma$  및 전단응력  $\tau$ 를 결정하여라.

8.3 어느 수평면에 수직응력  $\sigma = 150\text{kN/m}^2$ , 전단응력  $\tau = 50\text{kN/m}^2$ 이 작용하고 있다. 이 수평면과 수직이 아닌 수직응력  $\sigma = 40\text{kN/m}^2$ , 전단응력  $\tau = -5\text{kN/m}^2$ 이 작용하는 다른 평면이 있다고 할 때 다음에 답하여라(힌트 : Mohr원의 중심은 두 점으로부터 같은 거리).

- 1) Mohr원을 작도하고 평면기점을 표시하여라.
- 2) 최대 및 최소주응력점과 주응력면을 작도하여라. 최대 및 최소주응력은 얼마인가?
- 3) 수직응력  $\sigma = 40\text{kN/m}^2$ , 전단응력  $\tau = -5\text{kN/m}^2$ 이 작용하는 평면이 수평면에 대한 기울기는 얼마인가?

8.4 시료가 파괴점에 도달하였을 때의 수직응력과 전단응력을 그림에 보인 요소에 나타내었다. 다음 물음에 답하여라.

- 1) Mohr원을 작도하고 평면기점을 표시하여라.
- 2) 최대 및 최소주응력을 구하여라. 최대주응력면이 수평면에 대하여 가지는 기울기를 계산하여라.
- 3) 이 흙의 내부마찰각을 계산하여라(점착력  $c = 0\text{kN/m}^2$ 으로 가정).

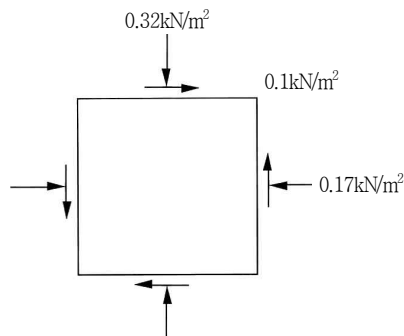


그림 8.46 연습문제 8.4

8.5 다음 그림에서  $\sigma_1 = 3\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_3 = 1\text{kg/cm}^2$ 일 때,  $\theta = 30^\circ$ 의 단면에 작용하는 수직응력  $\sigma$ 과 전단응력  $\tau$ 를 Mohr원을 이용하여 구하라.

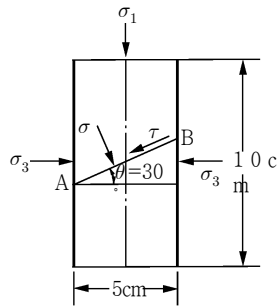


그림 8.47 연습문제 8.5

8.6 점착력  $15\text{kN/m}^2$  내부마찰각  $32^\circ$ 인 흙 속의 어느 한 면에 작용하는 수직응력이  $180\text{ kN/m}^2$ , 간극수압  $30\text{kN/m}^2$ 이라고 할 때 이 면에서 흙의 전단강도를 계산하여라.

8.7 어떤 흙시료의 직접전단시험 결과, 다음 표의 값을 얻었다. 시료의 전단면 면적은  $19.63\text{cm}^2$ 이다. 다음에 답하여라.

1) 전단강도  $\tau$ 를 구하라.

2) 점착력  $c=0$ 으로 하여, 이 흙의 내부마찰각  $\phi$ 을 구하라.

	수직하중 $P=40\text{kg}$								
수평변위	0	2	22	50	95	109	120	139	168
전단력	0	4.4	12.6	18.5	23.6	24.0	24.2	23.2	21.6

8.8 해안 점성토를 채취하여 직접전단시험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 사용한 전단박스의 크기는  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , 높이는  $2.5\text{cm}$ 이다. 수직응력에 대한 파괴 시의 전단응력의 관계를 도식하고 점토시료의 마찰각을 산출하여라.

시험번호	수직력(kg)	파괴 시 전단력(kg)
1	0.025	0.014
2	0.040	0.022
3	0.050	0.028
4	0.055	0.031

8.9 모래에 대하여 직접전단강도시험을 수행하여 수직응력  $\sigma=244\text{kN/m}^2$ , 전단응력  $\tau=140\text{ kN/m}^2$ 에서 파괴에 도달하였다.

1) 이 시료의 건조상태에서의 내부마찰각을 계산하여라.

2) 파괴면이 수평면인 상태에서 파괴 시 최대주응력을 계산하여라.

3) 최대주응력면의 수평면에 대한 기울기를 계산하여라.

(힌트 : 평면기점을 찾아 최대주응력점과 연결)

8.10 현장에서 채취한 포화점성토에 대하여 일축압축시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

응력(kN/m <sup>2</sup> )	변형률
0	0
100	0.004
200	0.008
300	0.017
350	0.027
320	0.070

- 1) 응력변형률곡선을 그리고 일축압축강도  $q_u$ 와 점착력  $c$ 를 계산하여라.
- 2) 도시된 곡선의 기울기로부터 파괴응력의 50%에 대한 탄성계수  $E$ 를 계산하여라. 여기서 압축 응력  $\epsilon$ 와 변형률  $\sigma$ 은  $\sigma = E \cdot \epsilon$ 의 관계가 있다.

8.11 사질토의 내부마찰각이 32°이고 점성은 없다고 할 때 다음에 답하여라.

- 1) 수직응력 350kN/m<sup>2</sup>를 가하고 직접전단강도시험을 한다고 할 때 이 시료가 파괴되기 위하여 요구되는 전단응력은?
- 2) 동일 시료에 대하여 구속압 350kN/m<sup>2</sup>를 가하고 CD 삼축압축시험을 하였다. 시료가 파괴되기 위하여 소요되는 축차응력  $\sigma_1 - \sigma_3$ 을 계산하여라. 만일 시료의 직경이 5cm이면 파괴 시 시료에 가해진 축하중은?

8.12 어떤 시료 흙에 관하여  $CD$  삼축압축시험을 한 결과 다음 값을 얻었다.

$\sigma_3=0.5\text{kg/cm}^2$		$\sigma_3=1.5\text{kg/cm}^2$		$\sigma_3=2.5\text{kg/cm}^2$	
$\epsilon(\%)$	$\sigma_1 - \sigma_3(\text{kg/cm}^2)$	$\epsilon(\%)$	$\sigma_1 - \sigma_3(\text{kg/cm}^2)$	$\epsilon(\%)$	$\sigma_1 - \sigma_3(\text{kg/cm}^2)$
0.2	0.74	0.2	1.08	0.2	1.32
0.4	1.61	0.4	2.22	0.4	2.71
0.6	2.36	0.6	3.25	0.6	4.01
0.8	3.20	0.8	4.40	0.8	5.49
1.0	3.82	1.0	5.42	1.0	6.73
1.2	4.71	1.2	6.09	1.2	7.35
1.4	5.44	1.4	6.43	1.4	7.71
1.6	5.79	1.6	6.01	1.6	7.97
1.8	6.00	1.8	6.64	1.8	8.22
2.0	5.81	2.0	6.83	2.0	8.30
2.2	5.49	2.2	7.05	2.2	8.42
		2.4	6.92	2.4	8.50
		2.6	6.73	2.6	8.13
		2.8	6.51	2.8	7.92
				3.0	7.76

- 1) 변형률에 대한 축차응력의 관계곡선을 구하여라.
- 2) 파괴 시의 Mohr원과 파괴포락선을 작도하여라.
- 3) 내부마찰각  $\phi$ 와 점착력을 구하여라.
- 4)  $K_f$ 선을 그린 후  $p$ - $q$  도상에 이 흙의 응력경로를 그려라.

8.13 Kaolinite 시료에 대하여  $CD$  삼축압축시험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 시료는 재성형시료이고 정규압밀점토이다. 초기등방압축을 한 후 건조상태에서 전단을 수행하였다.

- 1) Mohr원과 파괴포락선을 작도하여라.
- 2) 전단강도정수  $c'$ ,  $\phi'$ 를 구하여라.

시험횟수	셀압( $\text{kN/m}^2$ )	축차응력, $\sigma_1 - \sigma_3(\text{kN/m}^2)$
1	70	140
2	140	245
3	280	455
4	420	665
5	560	840



8.14 포화점토에 대하여 압밀비배수( $\overline{CU}$ ) 삼축압축시험을 행한 다음 아래의 결과를 얻었다.

횟수	축압 $\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴시 축차응력 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 간극수압 $u$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	50	53.7	1
2	100	72.0	7
3	150	81.0	12

- 1) 전응력상태와 유효응력상태에서 Mohr원과 파괴포락선을 구하여라.
- 2) 전응력에 의한 강도정수  $c$ ,  $\phi$ 를 구하여라.
- 3) 유효응력에 의한 강도정수  $c$ ,  $\phi$ 를 구하여라.

8.15 모래샘플에 대하여 3개의  $\overline{CU}$  시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

셀압 $\sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 축차응력, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	파괴 시 간극수압 $u_f$ (kN/m <sup>2</sup> )
25	100	-5
100	317	0
250	634	29

- 1) 파괴 시 유효응력에 대한 Mohr원과 파괴포락선을 작도하여라.
- 2) 이 시료의 내부마찰각은?
- 3) 이 시료에 셀압  $\sigma_3 = 25 \text{ kN/m}^2$ 를 가하여  $CD$  삼축압축시험을 실시하였다. 파괴에 도달하기 위하여 필요한 축차응력을 계산하여라.

8.16 3.5cm 직경의 모래시료에 대하여  $\overline{CU}$  시험을 수행하였다. 구속압  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ 를 가하고 파괴 축하중은  $45 \text{ kg}$ , 이때의 간극수압은  $u = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 이었다.

- 1) 이 시료의 유효내부마찰각은?
- 2) 실험시료의 느슨/밀한(loose/dense) 여부를 평가하여라. 그 이유는?
- 3) 이 시료에 구속압을  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ 를 가하고  $\overline{CU}$  시험을 반복하여 나타날 시료의 느슨/밀한(loose/dense)거동 여부를 평가하고 그 근거를 설명하여라(이때 간극수압  $u = 0.0 \text{ kg/cm}^2$ ).

8.17 불교란 점토시료에 대하여  $\overline{CU}$  시험을 수행하여 다음 결과를 얻었다.(단위 :  $\text{kN/m}^2$ )

	1회	2회
구속압( $\sigma_3$ )	100	200
파괴 시 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )	220	375
파괴 시 간극수압( $u_f$ )	-30	-24

- 1) 파괴 시 유효응력에 대한 Mohr원과 파괴포락선을 작도하여라.
- 2) 이 시료의 점착력과 내부마찰각은?
- 3) 이 시료에 셀압  $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ 를 가하여  $CD$  삼축압축시험을 실시하였다. 파괴에 도달하기 위하여 필요한 축차응력을 계산하여라.

8.18 1) 문제 8.17의 시료에 대하여 수정파괴포락선( $K_f$ )을 구하여라.

- 2) 수정파괴포락선을 이용하여 이 시료의 점착력과 내부마찰각을 계산하여라.

8.19 흙의 전체단위중량  $16 \text{ kN/m}^3$ , 포화단위중량  $18 \text{ kN/m}^3$ 인 점토지반이 있다. 이 점토의 소성지수를 35%라고 할 때 지반의 깊이 5m, 10m, 15m에서의 비배수점착력을 계산하여라(지하수위는 지표 하 3m에 있는 것으로 가정, 식 8.17a 이용).

8.20 문제 8.19를 점토의 OCR=2.5에 대하여 다시 계산하여라(식 8.17b 이용).

## 참 고 문 헌

1. 권호진, 박준범, 송영우, 이영생(2008), 토질역학, 구미서관.
2. 김상규(1991), 토질역학, 동명사.
3. Bhudu, M.(2007), Soil Mechanics and Foundations, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York.
4. Coulomb, C.A.(1776) "Essais Sur une application des regles des maxims etminimas a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture", Mem. Acad. Roy. Pres. Divers, Sav.5, 7, Paris.
5. Lamb, T.W. and Whitman, R.V.(1969), Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
6. Lee, K.L. and Seed, H.B.(1967), "Drained Strength Characteristics of Sands", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.93, No.SM6, pp.117-141.
7. NAVFAC(1971), Design Manual-Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, *NAVFAC DM-7*, US Dapartment of Navy, Washington D.C.
8. Skempton, A.W.(1948) "The  $\phi=0$  Analysis for Stability and its Theoretical Basis", *Proceedings of 2nd International Conf., Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, Vol.1, p.72.
9. Skempton, A.W.(1954), "The Pore Water Coefficients A and B", *Geotechnique*, Vol.4, pp.143-147.
10. Taylor, D.W.(1948), Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
11. Terzaghi, K.(1943), Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
12. Terzaghi and Peck(1967), Soil Mechanics and Engineering Practice, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York.