

# 제 1 장 토질공학의 기초

## ■ 흙의 생성 및 종류

- ▶ 생성원인 및 결과
- 물리적작용/화학적작용/용해작용
- ▶ 흙의 종류
- 잔적토(잔류=회강풍화토/유기질토)
- 퇴적토(퇴/호/퇴/빙/중/애)
- 특수토(매/유/괴/창/폐)
- ▶ 유기질토의 판정(중크롬산/강열감량법)

## ■ 3상관계 기본공식

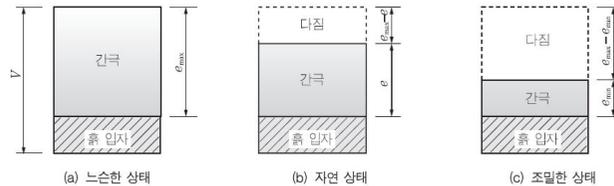
- ▶ 상태정수 표시개념
- $e = \frac{V_v}{V_s}$  (모래 : 0.4~1.0, 점토의 경우 0.8~3)
- $n = \frac{V_v}{V} \times 100(\%)$
- $n = \frac{e}{1+e} \times 100(\%)$
- $e = \frac{n}{100-n}$
- $S = \frac{V_w}{V_v} \times 100(\%)$
- $\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$
- $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$
- $G_s \cdot w = S \cdot e$
- ▶ 단위무게 개념
- $\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s + S \cdot e}{1+e} \cdot \gamma_w$
- $\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s}{1+e} \cdot \gamma_w = \frac{\gamma_t}{1 + \frac{w}{100}}$
- $\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s + e}{1+e} \cdot \gamma_w$
- $\gamma_{su} = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1+e} \cdot \gamma_w$
- $e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1$

## ■ 흙의 입도

- ▶ 목적 : **분급액등무구도** (흙분류/필터재료/액상화판정/동상판정/투수계수/그라우티빌리티/모관교)
- ▶ 시험방법 : 체분석+비중계분석
- ▶ 균등계수 :  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$  (자갈>4, 모래>6, 토사>10)
- ▶ 곡률계수 :  $C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$

## ■ 사질토의 상대밀도

- ▶ 정의 : 조립토의 조밀한 정도 판정기준
- ▶ 공식 :  $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 = \frac{\gamma_d - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_d} \times \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_d}$
- ▶ 이용 : **액조미파다** (액상화/조밀도판정/내부마찰각추정/얕은기초지지층/기초과괴형태/다짐관리)



## ■ 점성토의 컨시스턴시

- ▶ 정의 : **고반소액**으로 변화하는 연경도
- ▶ 시험방법 : 황동블래스, 1점법, Fall cone
- 1점법 :  $LL = w_n \left(\frac{N}{25}\right)^{0.123}$
- $w_s = w - \Delta w = w - \left(\frac{V - V_s}{W_s}\right) \cdot \gamma_w \times 100(\%)$
- ▶ 연경도의 공학적 의미
- $PI = LL - PL$
- $SI = PL - SL$
- $LI = \frac{w_n - PL}{\Pi} = \frac{w_n - PL}{LL - PL}$
- $CI = \frac{LL - w_n}{\Pi} = \frac{LL - w_n}{LL - PL}$
- $LI + CI = 1$ ,  $LI \approx 1$ 이면 불안정

- $FI = \frac{w_1 - w_2}{\log N_2 - \log N_1} = \frac{w_1 - w_2}{\log \frac{N_2}{N_1}}$
- $TI = \frac{PI}{FI}$  (TI 크면 활성도 큼)
- Skempton의 추정값
- $C_c' = 0.007(w_l - 10)$
- $C_c = 1.3C_c' = 0.009(w_l - 10)$
- $C_c'$  : 퇴비비한 시료의 압축지수
- $C_c$  : 호트리지지 않은 시료의 압축지수
- ▶ 연경도의 이용 : **강연정압밀액분할** (강도증가율/연경지수/KO/압축지수/압밀계수/액상화/분류/활성도)
- 강도 증가율 추정을 하는데 PI(스켄튼), LL(한스보) 이용
- $\alpha = \frac{C_u}{p} = 0.11 + 0.0037PI$  (Skempton)
- $\alpha = 0.45LL$  (Hansbo)

## ■ 흙의 이방성

- ▶ 이방성의 종류
- **전압침투토**(전장/압밀계수/침투유량(등/비)/투수계수/토압)
- 전단강도 고유이방성 : 생성과정(정규/과압밀)
- 압밀계수 ( $C_h = (2 \sim 10)C_v$ )
- 투수계수 : 수평/연직
- 토압계수 : 수동>정지>주동 (주동+수동=유도, 정지는 고유)

## ■ 점토광물

- ▶ 점토의 분류 : **KIM 안구활토** (Kao/Illite/Mont/구조/통일분류법/활성도/안정성)
- ▶ 점토광물의 기본구조 : **테시오지비** Tetrahedron, Silica Sheet, Octahedron, Gibbsite, Brucite
- ▶ 면모구조와 이산구조의 비교
- 전투형강이 (전기력/형 성/강도/투수/이중층)
- ▶ 흙의 구조 : 비단별-점면분(비점성토 단립, 별집 : 점성토는 면모구조, 분산구조)
- ▶ 점성토의 입자구조 : 직접적 결합이 아닌 전기화학적 힘에 의해 형성되며 평면이나 바늘형태를 이룸.

구분	면모구조	이산구조
전기력	인력 우세	반발력 우세
투수계수	크다	작다
형성과정	자연상태 퇴적시 건조층 다짐시	침강퇴적시, 혼합시 습윤층 다짐시, 교란토
강도	크다	작다
이중층의 두께	얇다	두껍다

## ■ 점토광물의 판정방법

**입사탄원X선** (입도/시차열/탄산염/원산지/XRD/SEM)

### ▶ 판정방법

1) 시차열분석(DTA, differential thermal analysis)  
물질을 균일하게 가열하거나 냉각시켜 표본이 겪는 화학 및 물리적 변화를 관찰하는 열분석이다. 표준 물질에 변화가 일어나지 않는 범위로 동시에 가열하거나 냉각시켜 분석한다. 표본과 표준 물질의 온도의 함수로서 나타난다.

### 2) 암석원산지분석(provenance)

주로 흑요석이나 기타 재질로 만든 석기의 암종을 감정한 후 주변의 지질환경과 관련하여 고인류가 사용했던 석기가 이동해 온 경로를 추정하는 과학적 분석방법이다. 암석원산지분석을 위해 암석의 박편이나 회유원소와 회토류원소 등을 분석하기도 한다.

### 3) X-선회절분석(XRD)

결정에 의한 X-선 회절현상을 이용하여 결정 내부구조를 해석하는 것이다. 전자선, 중성자선도 결정에 의해 회절하지만 X-선이 결정의 기하학적 특징을 가장 잘 보여준다. 결정의 X-선을 주로 다루는 연구 분야를 X-선 결정학이라고 한다.

### 4) 입도분석(grain size analysis)

점토의 입도 조성을 알기 위해 행해지며, 국제 토양화학법에 의하면 체사용법과 침전법을 사용한다. 이 분석을 통해 토양, 퇴적물, 또는 암석에서 입도 분포나 입도에 의한 통계적인 비율을 결정한다.

### 5) 탄산염분석

점토와 퇴적물 속의 CaCO<sub>3</sub>의 함량을 분석하는 일로서 이를 통하여 형성 당시의 식생이나 기후환경을 구분해 낸다.

#### ▶ 점토광물의 풍화 생성물

① 암석 풍화의 최종산물로서 규산염 이차광물은 카올리나이트(kaolinite), 일라이트(illite), 몬모릴로나이트(montmorillonite), 버미큘라이트(vermiculite) 및 녹니석(chlorite) 등이 있다. 점토광물분석(clay mineral analysis)은 이들을 X-선회절분석(X-ray Diffraction method, XRD) 등을 통하여 감정하는 것

② 원시료를 350℃나 550℃로 가열하거나, 글리콜리제이션(glycolization)을 통하여 광물마다 고유한 값을 가지는 규소 4면체와 8면체의 거리를 변화시킬 때 점토광물마다 상이한 팽창과 수축의 특이성을 나타낸다. 이를 통하여 점토광물을 구분할 수 있다.

## ■ SEM & XRD

### ▶ 주사전자현미경(SEM)

① 정의 : SEM은 주사전자현미경(SEM;scanning electronical microscope)의 약어로 토립자나 암석의 미세입자 및 조직을 관찰하는데 이용.

② 원리 : 주사전자현미경(SEM;scanning electronical microscope)의 분석원리는 광선의 세기, 직경, 거리를 적정하게 한 전자를 시료의 표면에 주사시키고(scanning) 영상을 얻기 위해 형광면에 주사시킴으로써 상(image)을 얻고 화면을 카메라로 촬영함.

### ③ 시료준비 및 촬영

- 적당한 크기(예 1cm)의 정육면체를 PVC 몰드에 넣고 합성수지를 충분히 침투시킴.
- 경화된 부분을 Diamond bit 로 절단하고 금으로 코팅함.
- 전자선을 주사하여 확대 촬영하며 촬영배율을 입자크기에 따라 2,000 ~ 20,000배 정도임.

### ④ 이용성

- 토립자 또는 암석의 미세한 입자형태와 조직을 관찰함.
- 흙과 Fly ash, Bentonite와 같은 재료를 혼합하였을 때 화학적 생성물을 판정함.
- 약액주입시 약액의 침투 또는 혼합상태를 관찰함.

### ▶ XRD

#### ① 개요

XRD는 X-Ray Diffraction의 약어로 X-선 회절이라고도 하며, X-선을 이용하여 흡입자나 암석에 있는 광물성분과 양을 정량적으로 파악하는 장비.

#### ② 측정원리

- X-선 회절(XRD : X-Ray Diffraction)에 이용되는 파장은 0.05 ~ 0.25nm인 극히 짧은 파장이며 이 X-선을 시료에 가하면 99%이상은 시료를 투과하고 1%이하가 회절되어 나옴.
- 회절되어 나오는 전자선들을 전자검출기로 검출하여 상대적인 크기인 회절강도로 나타냄.

#### ③ 측정방법

- 시료준비는 No.200체 (0.074mm)이하로 분쇄함.
- 건조로(105±5℃)에 1시간 가온하여 수분을 건조시킴.
- 분석기로 X-선 투과하여 회절강도 구함.

#### ④ 이용

- 흙, 암석에 있는 광물성분과 각 광물성분의 양을 파악함.
- 지반개량 첨가제에 의한 개량 전후의 반응 생성물, 개량효과를 파악함.

## ■ 흙의 공학적 분류

▶ 목적 : **그역시택시** (그룹화/역학성능 추정/시험계획/객관적 자료/시공계획)

▶ 분류방법 : USCS, AASHTO, MIT, BS, 삼각분류

▶ 통일분류법과 AASHTO의 비교 (쌍벽)

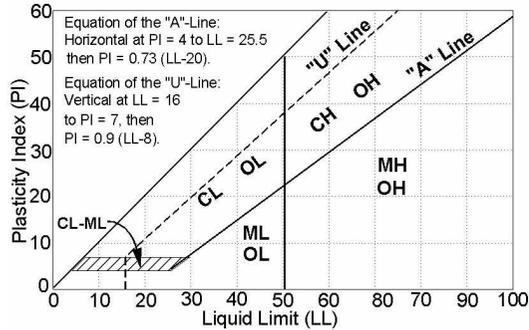
### - 차이점 : **모유점분조기**

- 모래자갈구분 : U는 4.75mm, A는 2mm
- 유기물 : U만 표시
- 점토실트구분 : U는 A라인으로 A는 PI=10%로
- 분류목적 : A는 도로,활주로만 U는 만능
- 조립세립구분 : 75 $\mu$ m 이용은 같지만 U는 50% pass, A는 35% pass 기준으로 구분 → 이것만 AASHTO가 합리적(세립분은 약간의 영향도 큼)
- 기호 : USCS는 기호가 알아보기 쉽다.

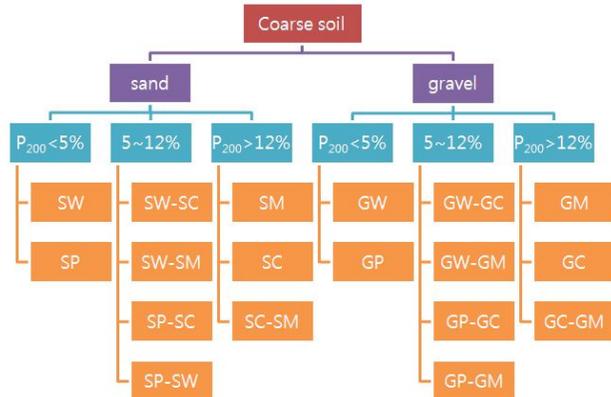
▶ 소성도 : 세립토와 조립토 중 세립분 12% 이상인 흙의 분류

- A선의 소성지수 : 0.73(LL-20) : clay와 silt를 구분하는 선
- U선의 소성지수 : 0.9(LL-8)

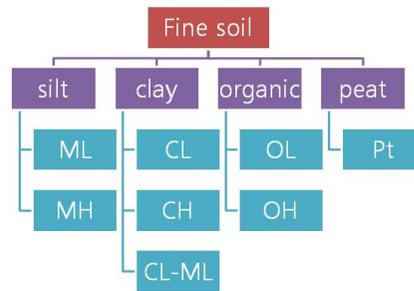
- B선의 액성한계 : 50% : 압축성 LH의 경계
- 몬모릴로나이트는 대개 CH
- 일라이트는 대개 CL
- 카올리나이트는 대개 ML
- 소성도의 이용 : **분구활강차** (분류/점사구분/활성도/강도증가율/차수제 판정)



▶ 조립토의 통일분류



▶ 세립토의 통일분류



■ 건조작용 및 고결작용

▶ 건조작용(Desiccation)의 정의

- ① 점토가 물밑에서 퇴적이 되고 지하수위가 하강하거나 조류차가 큰 경우 저조기때에는 점토가 대기중에 노출하게 됨.
- ② 오랜 시간이 경과되면서 점토 표층부는 대기 또는 일조에 의해 건조한 부분이 생기게 되며 이를 건조작용(Desiccation)이라 하고 이와 같은 현상에 의해 생성된 점토를 건조점토라고 함.
- ③ 점토의 건조로 수분이 증발하여 전단강도가 증가하며 모관작용으로 부의 간극수압이 생겨 유효응력이 증가됨에 따라 하부점토보다 강도가 더 큼.

- ④ 유효응력 ( $\bar{\sigma}$ ) = 전응력 ( $\sigma$ ) - 간극수압 ( $-u$ ) =  $\sigma + u$  가 됨.
- ⑤ 지표면의 점토(soft clay)는 수분의 증발로 모세관(Capillary) 현상이 일어나서 흙 속이 간극수압을 Negative Value로 감소시켜 유효응력(Effective stress)을 증가시키고 간극비(void ratio)를 감소시킴 → 지표면의 점토가 굳어지고 Drying Crust 가 형성되는 현상.

▶ 발생 메카니즘

- ① 수분증발 → 모관현상 → 부의 간극수압 → 유효응력 증가 → 간극비 감소 → 드라이 크러스트
- ② 용광로나 보일러 주변의 점토 성분이 고온에 의해 점토의 함수비가 줄어들어 견고하게 굳어지는 현상도 같은 현상이다.

▶ Drying crust의 깊이에 영향을 주는 요인

- ① 기상조건(climate condition)
- ② 지하수위(ground water table)
- ③ 흙의 permeability

④ 조경으로 인한 함수비의 감소 등

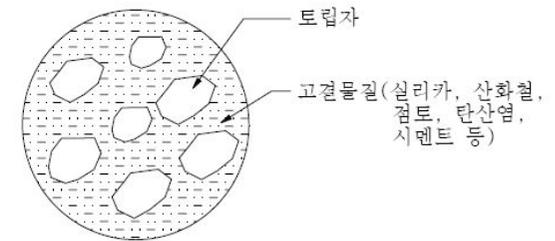
▶ Desiccation의 결과

Desiccation의 결과로 형성되는 crack의 간격은 crack 깊이의 10배 정도이며 crack의 형성으로 투수계수가 높아진다.

▶ 고결작용(Cementation)의 정의

① 고결은 퇴적물의 광물, 외부에서 이동된 광물, 고결물질등이 퇴적물을 굳게 만드는 현상이고, 인공적으로는 지반 주입공법이 해당됨.

② 지반고결로 전단강도  $S=c+\sigma \tan\phi$  에서 점착력성분의 증가로 전단강도가 커짐.



▶ 고결작용의 평가

- ① 건조작용은 함수비 감소로 인한 유효응력 증가, 고결작용은 점착력 증가를 수반함.
- ② 작용정도에 따라 다르나 2가지 작용으로 지반의 전단강도, 압축성, 투수성의 변화가 발생됨.

철수실탄사시반

철분/탄산염/실리카/수산화물/사질토/점성효과/시간효과/반죽강도 저하

■ 화학적 풍화지수

▶ 정의 : CWI(chemical weathering index)란 풍화에 예민한 광물의 화학적 분석을 통한 인덱스.

▶ 공학적 표현

- 알페티롤 over 100

$$- \left( \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O}{\text{all chemical components}} \right) \text{mole} \times 100\%$$

- 지수이므로 차원이 없다.

▶ CWI에 의한 풍화도 구분

- CWI가 20보다 크면 강풍화 or 거의 완전한 풍화
- 20이하이면 화학적 풍화가 아직 진행 중

CWI	class	Weathering
13~15	I	fresh rock
15~20	II	slightly weathered
	III	moderately weathered
20~40	IV	highly weathered
	V	completely weathered
40~60	VI	residual soil
60~90	VII	weathered hard pan

### ■ 비표면적과 비체적

▶ 비표면적 : 흡입자 1g당표면적(토립자크기가 감소할수록 비표면적은 급속히 증가:K→i→m순으로 비표면적이큼, 물리적특성, 전기, 형성, 강도, 투수성 이중층두께)

▶ 비체적: 1+e(e:간극비)로 정의됨. 흙의 삼상(단위중량, 압밀침하량)과 한계상태이론과 관계 있음.

### ■ 3대 점토광물

	K	I	M
구조	G+S	S+G+S	S+G+S
결합	수소	동형치환	동형치환
활성	소	중	대
결합력	대	중	소
USCS	ML	CL	CH

### ■ 리칭현상

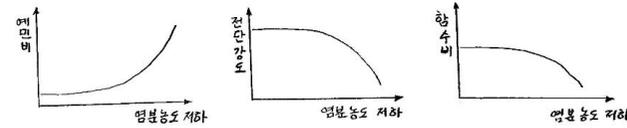
▶ 정의 : 염분의 이탈로 흙의 구조가 바뀌어 강도가 저하되는 현상을 칭한다. 리칭이 충분히 진행 → 약간의 교란에도 액상화하는 초예민 점토를 → quick clay라고 한다.

▶ 발생기구

- 염분을 함유한 점토질 흙의 구조가 면모구조 → 이산구조로 변화하는 현상으로 염분이 있어 미세 흡입자의 결합력이 커지나, 염분이 없어지면 결합력이 약해져서 미세 흡입자의 sheet가 떨어지는 현상으로 "이중층의 두께가 커져서 이온결합이 약해지는 현상"이다.

- 점토입자가 해수에 퇴적되면 면모구조가 되고, 담수에 퇴적되면 이산구조가 된다. 면모구조는 분산구조보다 투수성과 강도가 크다.

### ▶ 리칭의 특징



예민비	명칭
$S_t \geq 8$	Quick clay
$S_t \geq 64$	Extra quick clay

- ① 염분농도가 저하할수록 예민비가 증가
  - ② 염분용출 → 부착력 감소 → 전단강도 감소
  - ③ Quick clay의 자연함수비( $w_n$ )는 거의 일정하지만 LL감소 →  $LI \geq 1$  → 액성상태
- ▶ 평가
- ① 해성점토가 담수화하는 과정에서 리칭발생
  - ② 약액주입공법 적용시 지반내에서 그라우트의 주성분인 실리카 성분이 유실되는 리칭현상을 충분히 고려해야 함.

### ■ 흙의 팽창과 비한

▶ 정의

- ① 흙이 부푸는 현상 : 사질토(bulking), 점토(swelling)
- ② 비화작용은 slaking이며 slake(-을 둔화시키다, 약화시키다)의 사전적 의미대로 전단강도가 감소하는 현상이다.

▶ bulking

- ① 모래 속의 물이 표면장력에 의해 팽창하는 현상
- ② 입경이 커지면 → 비표면적 감소 → 표면장력 감소 → 벌킹 감소

▶ Swelling(팽윤)

- ① 점토가 물을 흡수 → 점토입자의 흡착수막이 두꺼워져 체적 증가를 일으키는 것 (점토의 흡착수막)
- ② 몬모릴로나이트가 가장 크다. (활성점토이므로)

▶ 비화작용(slaking) :

- 점착성 흙이 수중에서 고체 → 반고체 → 소성 → 액성 상태를 거치지 않고 물의 흡착과 동시에 입자간 결합력이 약해져 바로 액성상태로 되어 붕괴
- 비화작용의 발생기구

① 점착성이 있는 흙은 액성의 상태에서 함수량이 감소함에 따라 고체화

② 이 고체상태의 흙을 물속에 담그면 변화가 가역적으로 일어나서 소성을 띠거나 액상화하지 않고 물을 다시 흡착함과 동시에 입자간의 결합력은 감소하여 흡입자는 붕괴된다 → 이 현상을 slaking라한다.

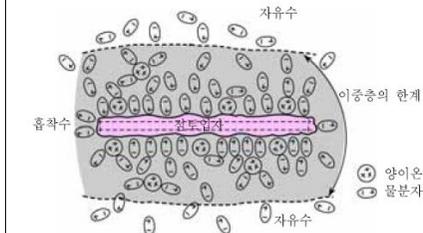
▶ 비화작용의 특성

- ① 비화작용이 생기면 전단강도가 급격히 감소한다.
- ③ Slaking test : 이암 등의 연암이 견습반복 → 세편화하는 성질 조사.

### ■ 점토의 흡착수막

▶ 정의

① 점토입자가 음전하를 띄므로 흡입자 표면에 양이온이 모이게 되고 → 평형을 이루기 위해 물을 끌어들리게 되며



이중층안에 있는 흡착수와 양이온

② 이중층 내의 흡착수와 자유수의 경계부 → 흡착수막

▶ 흡착수와 자유수

① 이중 층내의 물을 흡착수(absorbed water)라고 하며 흡착수막 외부의 물을 자유수(free water)라 하고, 흡착수는 물이라고 보다 고체에 가까운 성질을 가짐.

② 점토가 점성을 가지는 것은 이중층 내의 흡착수 때문으로 시료 건조시 110°C 이상으로 노건조 하는 이유는 → 자유수만을 제거하기 위한 것 (흡착수는 토립자의 일부로 간주한다는 의미)

③ 흡착수 중에서 강하게 흡착되면 → 고정층, 이보다 약하면 → 이온층

④ 이중층 = 고정층+이온층

## ■ Hydrometer 및 영동작용

### ▶ 침강분석

2mm 체를 통과한 시료를 증류수와 혼합해 현탁액을 만들어 베스 실린더에 넣은 다음 비중계를 띄워 흙 입자가 물 속을 침강할 때 그 속도가 지름에 따라 다르다는 사실을 이용하여 입자 지름에 대한 통과무게 백분율(%)을 구한다. → 이를 침강분석(hydrometer test)라고 하며,

### ▶ 영동작용(브라운 운동)

① 점토입자는 질량이 매우 작는데 비해 표면적이 크므로 → 침강보다는 자유로이 떠다니는 현상 → 영동작용이라고 한다. → 영동작용 중에 응집이 발생해 입자의 크기와 질량이 커져서 결국은 침강

② 액체 안에 떠서 움직이는 미소입자의 불규칙한 운동. 물체가 전체적으로는 움직이지 않는 평형상태라도 물체를 이루는 미소입자는 열운동하고 있어서 다른 미소입자와 부딪치면서 병진운동을 하기 때문에 일어나는 현상.

### ▶ Stoke의 법칙

스토크의 법칙은 침강속도는 입자의 직경의 제곱에 비례한다는 것으로 입자가 완전 구형이며 입자간이 간섭은 무시한다는 가정이 내포되어 있다. 점토입자는 스토크의 법칙에 따라 거동하지 않고 그보다 훨씬 빠른 속도로 침강하여 점토의 일부만이 법칙이 적용될 여지가 있다.

$$v = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta} d^2 \rightarrow \text{직경을 간접적으로 구하는 방법}$$

$v$  : 침강속도,  $\rho_s$  : 구의 밀도,  $\rho_w$  : 액체의 밀도,  $\eta$  : 액체의 동점성계수,

$d$  : 구의 직경

① 완전 구로 가정된 흙입자가 침강하는 속도는 스토크스 법칙으로 구한다.

② 직경 크면 → 빨리 침강, 작은 것 → 느리다.

③ 적용범위 : 0.2~0.0002mm (굵은 것은 침강시 교란방지, 작은 것은 브라운 운동방지를 위해서)

### ▶ 침강분석의 문제점

① 흙입자는 완전한 구형이 아니다.

② 흙입자의 비중이 각기 다르며

③ 많은 흙입자가 침강 중에 서로 간섭 → 실제와 차이 → 입도

곡선을 그릴 때 체분석결과가 침강분석결과와 자연스럽게 연결되지 않는 점은 이 때문

### ▶ 준설토의 침강속도

준설토의 침강속도는 스토크의 법칙으로 개략적으로 산정할 수 있지만 현장조건에서의 흙을 대상으로 컬럼테스트나 수치해석을 통해 침강속도를 계산한 후 현장에서 검증하는 것이 실용적일 것이다.

### ▶ 실제와의 차이

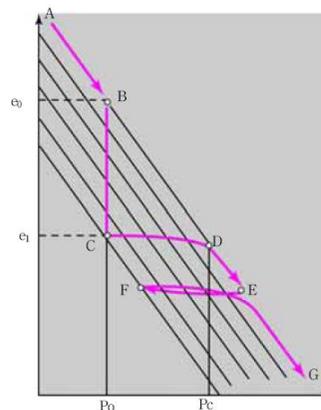
가정	실제
독립적 운동	응집(전기화학적으로)
입자의 크기 일정	서로 다름
입경은 구형	세장에 가까움

## ■ 점토의 Aging Effect(연대효과)

### ▶ 개요

① 자연점토지반은 퇴적 후 현재까지 장기간에 걸쳐 2차 압밀, 고결작용, 용탈, 건조응력 현상 등과 같은 다양한 작용을 받고 있다. → 장기간의 물리, 역학적, 화학적 작용 → 골격구조 변화 (이 현상을 연대효과라 함. → 사람이 늙는 노화현상 정도로 이해)

② 역학적 특징으로는 1축압축강도, 선행압밀하중, 파괴응력 등의 증가를 들 수 있다.



- A→B: 퇴적 및 자중압밀
- B→C: 지연압축
- C: 시료채취 및 시험
- C→D→E: 재하(loading)
- E→F: 제하(unloading)
- F→G: 재재하(reloading)

점토압축의 경시효과

퇴적 종료후 시간의 경과에 따라 Creep 또는 2차 압밀에 의해

간극비가  $e_0$  에서  $e_1$ 으로 감소 즉, 침하되는 현상으로 이를 경시효과=지연압축(delayed compression)=유사선행압밀효과=2차 압밀의 선행압밀하중 영향이라고 한다.

### ▶ 간극비와 과압밀비 변화

1) 간극비(void ratio)

시간경과로 간극비 ( $e = \frac{V_v}{V_s}$ )가 감소되고 시간이 많이 경과할수록 감소크기가 크게 됨.

2) 과압밀비(Over consolidation ratio)

① 그림에서 aged clay는 유효상재 하중보다 선행압밀하중이 크게 됨.

② 따라서,  $OCR = \frac{P_c}{P_o} > 1$ 이 된다.

### ▶ 여성토량과 공사기간

1) 여성토량

① Aged clay는 경시효과로  $OCR > 1$ 인 상태로 유효상재하중보다 선행압밀하중이 크게 됨.

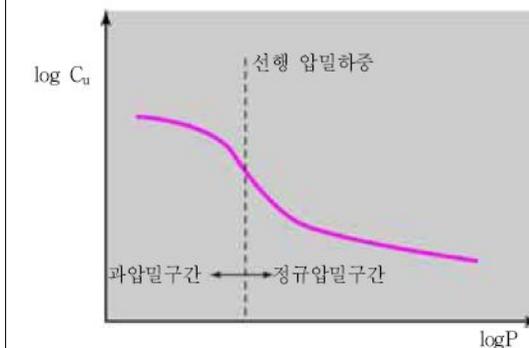
② 따라서, 정규압밀점토처럼 여성토량을 결정하면 침하가 적게 발생되어 허용잔류 침하량보다 크게될 수 있음.

③ 즉, 선행하중을 초과하는 하중을 순하중 증가로 적용해야 함.

④ Young clay는 경시영향이 없는 상태로 유효상재하중을 초과하는 하중을 여성토로 하면 됨.

2) 공사기간

① 일반적으로  $OCR > 1$ 이므로 공사기간이 단축됨.



② 그러나, Aged clay는 경시영향에 의한 것으로 압밀계수가

과압밀상태 처럼 커지지 않음.

③ 따라서, Young clay와 같이 정규압밀 상태의 압밀계수를 적용함이 타당.

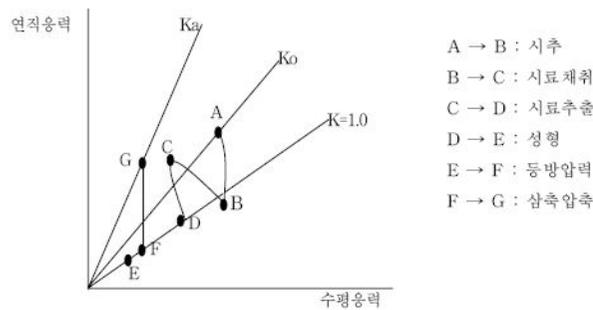
▶ 평가

- ① 경시효과는 2차압밀의 원인이며 Creep 또는 입자재배열에 기인함.
- ② 유사과압밀지반으로 평가되므로 여성토는 선행압밀하중을 감안해야 하고 침하시간 산정시는 정규상태를 적용함.

■ 시료교란의 효과 (전단, 압밀)

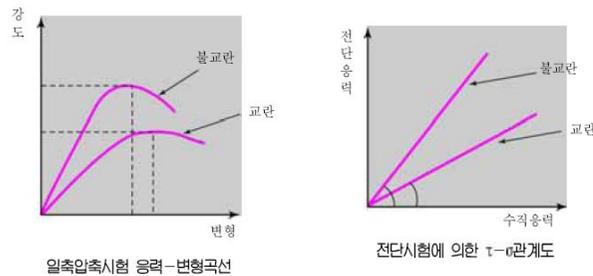
▶ 교란과 응력변화

- ① 교란(disturbance)은 원위치 지반에 비해 함수비, 간극비, 입자배열과 결합력 상실 → 역학적 성질이 변하는 현상임.
- ② 시료채취 → 시험시 응력변화

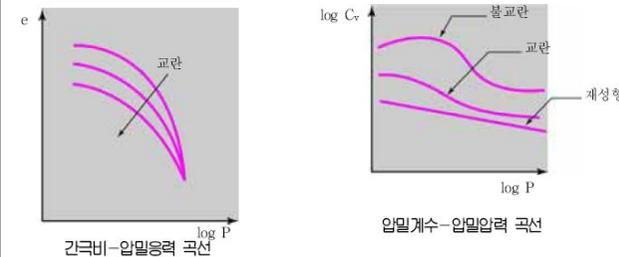


▶ 시료 교란의 영향

- 1) 전단강도 영향
- ① 압축강도저하 ② 변형률 증가 ③ 변형계수감소



2) 압밀성과 영향



① e-logP곡선

- 정규압밀구간 : 압축지수 작아짐 → 침하과소평가
- 선행압밀하중 : 적게 평가
- 과압밀구간 : 재압축지수 크게됨 → 침하과대평가

② logCv-logP 곡선

- 압밀계수 적게 평가 → 침하소요시간 오래 걸림

▶ 평가

- ① 응력해방에 따른 교란은 피할수 없으며 대책은 비등방압밀, 현장수직응력의 60% 수준 등방압밀, SHANSEP, 교란도에 의한 보정방법이 있음
- ② 시추에서 시험까지 일련의 작업과 관련된 기계적 교란은 정성스런 작업과 규정된 장비로부터 줄일 수 있음을 명심해야 하며 교란영향이 응력해방에 의한 것보다 크다고 알려져 있음
- ③ 교란영향을 최소화하기 위해 시료를 대형크기로 채취함이 요망되고 지표는 Block Sampling, 지중시추는 대구경 Sampler (직경 20~40cm)의 사용이 필요함
- ④ 국내에서도 한국건설기술연구원, 건설회사에서 여러 대구경 Sampler가 시료교란 감소에 효과적으로 확인되고 있음

■ 이암의 공학적 문제

▶ 개요

- ① 점토질 암반에서 발생하는 암사면의 불안정 문제는 → 주로 신생대의 이암 or 미고결 응회암이 절토 후 고결도가 급격감소 → 강도저하가 발생해 생기는 문제를 의미
- ② 이런 암석은 slaking 현상을 일으키며 → 이암 or 세일로 구성된 암사면은 슬레이킹으로 강도저하 일으킴 → 사면안정 저해
- ③ 현장에서 사면의 이암 등이 풍화 → 낙석 유발

▶ 강도저하 현상의 발생기구

1) Slaking 현상

- ① 건습반복 작용에 의해 세립화 하는 현상인 슬레이킹은 절토에 의한 응력해방 후 → 흡수팽창에 의한 급속한 고결도 저하 및 강도저하 유발 → 절토사면의 중요 원인으로 작용
- ② 슬레이킹 현상은 이암에서 나타나는 공통 현상 중 하나 → 신생대 미고결 퇴적암 같은 연암에서 주로 발생

2) 건습반복에 의한 강도저하

- 절토에 의해 응력이 해방되고 흡수팽창 및 절토 후의 건조수축이나 동결융해의 반복작용에 의해서 강도저하 → 풍화 진행 급속히 진행

▶ 점토질 암반의 평가

1) 객관적 판단의 근거

- ① 실제 현장상황에서 어느 그룹에 속하는지 판단하기 어려움.
- ② 객관적 판단의 근거는 slaking
- ③ 클레에 셰일은 노출 상태에서 슬레이킹이 쉽게 발생 → 강도저하 → 포화시 고풍수량을 보임.

2) Slaking 시험

- ① 건습이 반복되는 동안 암석의 변화를 관찰 → 풍화 효과를 시뮬레이션
- ② 신생대의 미고결층이나 Compaction shale에서 매우 효과적

3) Slake durability test

- 드럼 안에 물과 함께 암편을 넣어 회전시켜 암석의 급속한 풍화를 진행시켜 풍화에 대한 인내도를 측정

4) 평가

- ① Slaking의 정도는 포텐셜 증가에 따라 → 작은 조각으로 파쇄, 고풍창성 셰일 or 이암은 암편을 물에 넣은 후 → 점토성분이 완전히 풀어져 암편의 형태 사라짐.
- ② 퇴적암 지대 사면붕괴의 20% 이상이 차별풍화에 의해 발생 → 사암(고강도)과 이암 or 세일(저강도) 등이 교대로 나타날 경우 저강도 암석이 풍화가 먼저 되는 현상
- ③ Slaking 시험과 Slake durability index와의 회귀분석 → 쇄골속도 예측식 제안
- ④ 국내 포항지역은 이암지역 발달 → 설계, 시공시 정확한 암판정 및 충분한 검토 요망.

## 제 2 장 흙의 다짐

### ■ 다짐의 개요

- ▶ 다짐의 단계 : 수운팽포(수화/윤활/팽창/포화)
- ▶ 다짐공법 : 전충진(전압/충진/진동)
- ▶ 다짐시 주안점 : 고소연침더밀

고함수비점성토 8회/소성토는 slow, 입상토는 quick  
 연약점성토는 다짐<보강중요/최적함수비 ±2% 강도증진목적시 2% ↓, 투수성감소 목적시 2% ↑  
 더돋기를 침하대비/밀도는 1일 1회이상 확인

### ■ 다짐의 판정

▶ 다짐의 정의

① 지반구조물 강도증진을 위해서 인위적 압력 (by 장비) → 밀도 ↑ → 입자간 간격 ↓ → 인터로킹 양호 → 부착력 ↑ → 투수성 ↓ → 전단강도 ↑

② 수운팽포(수화→윤활→팽창→포화)의 성상변화 과정

▶ 다짐의 효과 (≒ 전투단지침)

토질이나 다짐에너지의 크기, 흙의 함수비에 따라 다르다.

- ① 흙의 단위중량 증가 ② 전단강도 증가
- ③ 투수계수 감소 ④ 지반의 지지력 증가
- ⑤ 침하량의 감소

▶ 다짐도의 판정 (≒ 변기견포도회상)

1) 건조밀도로 판정하는 방법

① 다짐도의 정의 : 실험실에서 최대건조밀도에 대한 현장에서의 건조밀도의 비로써 다짐도를 규정한다.

$$C_d = \frac{\gamma_d(\text{field})}{\gamma_{dmax}(\text{lab})} \times 100(\%)$$

- ② 노체 90% 이상, 노상 95% 이상이면 합격
  - ③ 신뢰도가 가장 높고 가장 많이 적용하는 방법으로 일반적인 사질토에 적용한다.
  - ④ 최대 치수 A, C, D다짐:19mm, B,E다짐 : 37.5mm
- 2) 포화도나 공기 공극률로 판정하는 방법
- ① 화산회질 점토, 건조밀도로 하지 못하는 곳
  - ② 포화도 기준으로 85~95%로 한다.

$$S_r = \frac{w \cdot G_s}{e}$$

③ 공기 공극률 기준으로 보통 2~10% 정도로 한다.

3) 강도로 판정하는 방법

① 다짐 후 현장에서 측정한 CBR, PBT 시험의 K값, 콘지수( $q_c$ )

가 시방서 기준 이상인지를 비교하여 기준을 충족시키면 합격

② 안정된 지반에 적용한다. 여기서 안정 지반이란 주로 사질 토나 호박돌, 암괴 등을 칭한다.

4) 상대밀도로 판정하는 방법

① 모래지반, 댐의 필터

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100$$

$$= \frac{\gamma_{dmax} \cdot \gamma_d - \gamma_{dmin}}{\gamma_d \cdot \gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}} \times 100 [\%]$$

② 비점성 사질토 지반에 적합한 방법이며 시방서 기준 이상이면 합격

5) 변형량으로 판정하는 방법

① 프루프 롤링이나 벤켈만 시험으로 평가

② 변형량이 시방서 기준이상이면 합격

③ 이 방법은 고성토구간이나 연약지반처럼 침하나 변형이 중시되는 구간에 사용하는 것이 효과적이다.

6) 다짐기종과 다짐횟수로 판정하는 방법

① 현장 다짐시험 결과에 따라 적당한 다짐기계로 규정 횟수 이상 다지면 합격

② 토질과 함수량의 변화가 없는 곳에 사용

### ■ 실내다짐과 현장다짐

▶ 실내다짐과 현장다짐의 차이 : 다방입구우대편파값비교

다짐에너지/방법/입도/측면구속/OMC/G<sub>max</sub>/건조방법/시료파쇄/값비교

▶ 현장과 실내다짐의 차이에 대한 대책

- 실내와 현장의 다짐에너지를 동일하게 한다.

- 실내 다짐E (A,B : 5.6kg-cm/cm<sup>2</sup>, C,D,E: 25.3kg-cm/cm<sup>2</sup>)

- 도로 토공(노상,노체)의 실내다짐: D,E 방법으로 실시(시방 기준) -실내 다짐과 현장다짐에너지를 근접하게 하려고,

- A,B 다짐으로 하면 함수비 차이만큼 흡수에 잉여수가 생겨 → 연약화, 다짐도 저하(일명,스펀지현상)

다짐방법	최대입자치수	다짐에너지	비 고
A	19mm	5.6kg-cm/cm <sup>2</sup>	표준다짐
B	37.5mm	5.6kg-cm/cm <sup>2</sup>	표준다짐
C	19mm	25.3kg-cm/cm <sup>2</sup>	수정다짐
D	19mm	25.3kg-cm/cm <sup>2</sup>	수정다짐
E	37.5mm	25.3kg-cm/cm <sup>2</sup>	수정다짐

▶ 리퍼빌리티 산정 : 시험입장■

시추조사/탄성파속도/암강도/풍화도/불연속상태

▶ 현장다짐의 목적 : 장두회합

장비선정/두께결정/다짐회수/다짐함수비 결정

▶ 코아재료 구비조건 : 마오소지15 (GS모두 CM이 붙는다.)

10<sup>-5</sup>, PI>15%/ GS, GC, SC, SM

▶ 필터재료 구비조건 : 마이산 모래자갈은 필터로 좋다.

10<sup>-2-3</sup>/GP, GW, SP, SW

▶ 다짐시 물관리 : 수운팽포

- OMC 이하 : 입자조밀화/단위중량증가

- OMC이상 : 입차치환/단위중량감소

▶ 유기질토 대책 : 치파구심 (치환/파일네트/구조물/심층혼합)

### ■ OMC와 ZVAC

▶ 최적함수비 : 최대건조단위중량은 바로 OMC에서 얻어진다.

▶ 영공극곡선(Zero air void curve)

- 흡 속에 공기간극이 전혀 없는 경우(즉, 포화도 100%인 경우) 건조밀도와 함수비의 관계곡선을 영공극곡선이라고 한다.

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + \frac{w \cdot G_s}{S}} = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S}}$$

- s=100%일 때 이므로, G<sub>s</sub>를 알면 w를 가정하여 구함

- 이용 : 다짐시험 확인 및 다짐관리

▶ 다짐도 : 공사의 중요도에 따라 90~95%의 다짐도가 요구

$$\text{다짐도}(\%) = \frac{\text{현장의 } \gamma_d}{\text{실험실에서의 } \gamma_{dmax}} \times 100$$

▶ 최적함수비선 : 시료 제작한 후 다짐에너지를 달리하면서 다짐시행 최대건조밀도(OMC)를 연결한 선

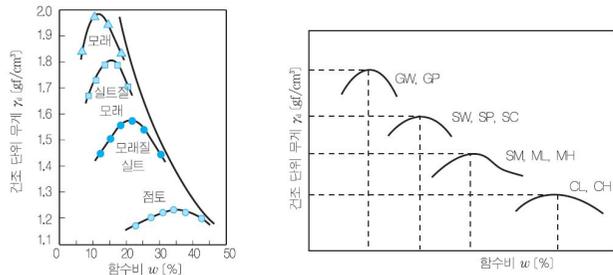
▶ 다짐 에너지 : 다짐을 하기 위해 흙에 가하는 일의 양으로, 단위 부피의 흙에 가해지는 에너지

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V}$$

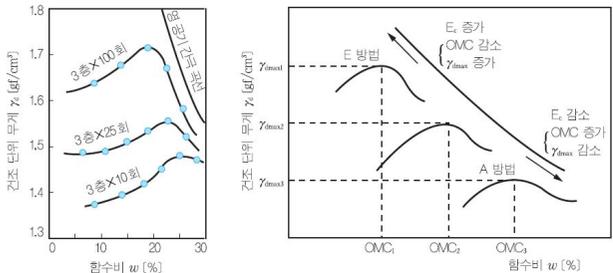
### ■ 다짐특성

▶ 다짐특성

- OMC가 작은 흙일수록  $\gamma_{dmax}$ 는 크다.
- 입자가 클수록  $\gamma_{dmax}$ 는 커지며, OMC가 작으면 곡선의 경사가 급하다.
- 입자가 작을수록  $\gamma_{dmax}$ 가 작고, OMC가 크며, 곡선은 완만하다.
- 입도분포가 좋을수록  $\gamma_{dmax}$ 가 크고, OMC가 작다.



▶ 다짐에너지와 다짐효과



- 다짐 에너지가 커지면  $\gamma_{dmax}$ 가 커지고 OMC는 작아진다.
- 같은 흙에 대해 다짐에너지를 증가시키면 다짐곡선은 영공기 간극곡선을 따라 위쪽으로 이동한다.

▶ 기타 특징

- 양입도는  $\gamma_{dmax}$ 이 크고 빈입도는 작다.
- 점성토일수록 OMC가 크고  $\gamma_{dmax}$ 은 작으며 조립토일수록  $\gamma_{dmax}$ 이 크고 OMC가 작다.
- 점성토는 다짐곡선의 모양이 완만하고 조립토는 급경사를 이룬다.
- OMC보다 약간 건조측에서 최대전단강도가 나오고, 약간 습윤측에서 최소 투수계수 K가 나온다.

### ■ Over Compaction

▶ 다짐 : 함수비 변화 없이 → 인위적으로 가압 → 간극내 air 배출 → 결합을 치밀하게 → 단위중량 up → 전단저항 up → 전단강도 up → 투수계수 감소시키는 과정

▶ 과다짐의 문제

- OMC의 습윤측(Wet Side)에서 너무 높은 에너지로 다짐 → 흙 입자가 깨져 전단파괴발생 → 흙이 분산하여 오히려 전단강도가 감소

- 너무 중량이 큰 Roller 로 다지거나

- 층당 다짐회수가 너무 많을 때 발생

- 화강풍화토에서 많이 발생.

▶ 다짐에너지와 함수비 변화에 따른 강도 변화

- 건조측 : 다짐 에너지 증가 → 강도 증가.

- 습윤측 : 강도증감 별로, 에너지크면 오히려 감소

▶ 다짐시의 함수비 유지 조건에 따라

- 동일한 다짐에너지일 때 건조측이 습윤측 보다 강도가 큼.

▶ 다짐후 포화가 되면 : 강도 차이 뚜렷하지 않다.

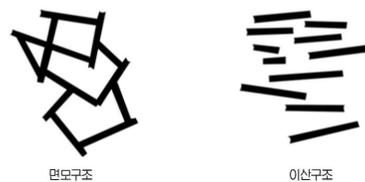
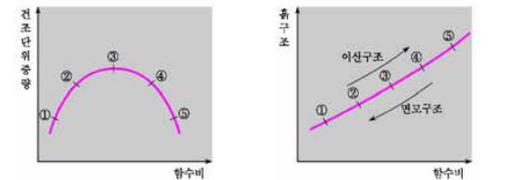
### ■ 다짐이 점성토의 구조에 미치는 영향

▶ 개요 : 함수비에 따라 점성토의 구조가 변한다.

▶ 점성토 구조영향

- 건조측은 함수비가 작아 이중층두께가 얇아 인력우세로 면모 구조가 되고

- 습윤측은 함수비가 커 이중층두께가 두꺼워 반발력이 우세하여 이산구조가 됨.



### ■ CBR

▶ 개요 : 노상토지지력비

- 흙의 전단강도를 간접적으로 측정

- 노상토의 지지력비 구함

- 도로포장 설계시 포장두께(설계CBR)

- 현장에서 기대할 수 있는 노반(노상, 보조기층, 기층)재료 강도 → (수정CBR)

▶ CBR 의 종류

- 설계CBR : 포장설계, 두께결정

- 수정CBR : 노반(노상, 보조기층, 기층) 재료의 강도 (규격)

- 현장CBR : 현장 원지반, 직접 24시간 물로포화, 여기서 설계 CBR과 수정CBR은 개념상의 구분임.

▶ CBR 시험의 개념(방법)

- 표준하중 : 직경 5cm인 강봉(Piston)을 캘리포니아 쇠석에 관입시킨다. (2.5, 5, 7.5, 10mm)

- 시험하중 : 직경 5cm인 강봉(Piston)을 캘리포니아 쇠석에 관입시킨다. (2.5, 5, 7.5, 10mm)

- 이 두 하중의 비가 CBR

$$CBR = \frac{\text{시험 하중 강도}}{\text{표준 하중 강도}} \times 100 = \frac{\text{시험 하중}}{\text{표준 하중}} \times 100 [\%]$$

- 표준하중 및 강도

관입량(mm)	표준하중강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	표준하중(kgf)
2.5	70	1370(13.4kN)
5.0	105	2030(19.9kN)

▶ CBR의 용도 및 이용목적 : 노성포

- 노상토 지지력 평가 : 전단(1, 3, 직)/PBT/SPT

- 성토재료의 규격(수정CBR) : 현장에서 기대할 수 있는 노반 재료(노상, 보조기층)의 강도결정

- 포장두께 결정(설계CBR) : ① O.J.Porter의 CBR설계곡선 ② TA 설계법 ③ AASHTO 설계법 : SN값 결정에 사용

▶ 수정CBR

- 현장에서 기대할 수 있는 노반재료의 강도

- 다짐방법 : D, E 방법

<D, E 다짐방법에 의한 수정 CBR의 적용시험>

구분	D 다짐	E다짐
재료 최대치수	19mm	37.5mm
몰드직경	15cm	15cm
다짐회수	5층, 55, 25, 10회	3층, 92, 42, 17 회

▶ 설계 CBR

- 정의 : 적정 표본크기의 시료에 대한 실내 CBR 시험결과를 이용하여 정한 포장두께 결정시 노상층의 대표 CBR치를 의미.
- 결정방법 : 일도공단법/누적법/AASHTO법
- 일본도로공단의 설계 CBR : 각 지점의 CBR중 현저히 다른 값을 제외하고

$$\text{각 지점의 평균CBR} = \frac{CBR_{\max} - CBR_{\min}}{d_2}$$

여기서  $d_2$ 는 설계 CBR 계산용 계수

- 누적빈도와 백분율에 의한 설계 CBR : ① 시험된 표본시료의 CBR을 작은값부터 큰값순으로 모두 나열 ② 각각의 시험 CBR에 대해 같거나 큰 값을 가지는 표본수와 대응 백분율을 계산 ③ 각각의 시험치(가로)와 대응 백분율(세로)에 해당하는 점을 plot 하고 이점에 적합한 곡선을 그린다. ④ 이 곡선상에서 세로축의 90%에 대응하는 가로축상의 CBR이 설계 CBR

▶ 레질리언트 계수

▶ 정의

- 포장 각층 재료들이 받는 반복적인 유효하중에 대한  $\sigma - \epsilon$  관계를 나타내는 재료의 물성치를 동탄성계수(회복탄성계수 : 레질리언트 모듈러스)라고 한다.  $M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R}$

$\sigma_d$  : 반복 축차응력,  $\epsilon_R$  : 축방향 회복변형률

- ▶ MR의 영향 요소 : 함수비/밀도/동결융해/흙종류

▶ 평판재하시험(PBT)

▶ 목적

- PBT는 지반의 지내력 및 노상, 노반의 지반반력계수, 콘크리트 포장과 같은 강성포장의 두께를 결정하기 위한 방법.

▶ PBT의 종류

- 도로 평판재하 : 노상이나 노반의 지반반력계수, 강성포장 두께 결정

- 지반의 평판재하 : ① 실무상 건축평판이라고 호칭 ② 구조물 기초의 설계에서의 지지력 계수나 극한 지지력을 구하는 방법

▶ 지지력계수(지반반력계수)

- 지지력 계수(K, coefficient of subgrade reaction)란 평판재하시험에 있어서 재하판의 침하량을  $y$ , 재하판에 가해지는

하중강도를  $P$ 라 할 때 다음과 같이 표시한다.

$$K = \frac{P}{y}$$

▶ 지반파괴유형 : 전/국/관

- ▶ 항복하중 결정법 : 여러 가지 중  $\log(s) - \log(q)$ 가 가장 많이 이용

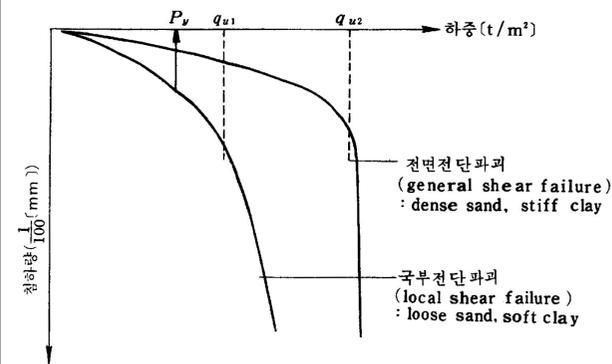
- 종류 : ①  $\log(s) - \log(q)$  ②  $s - \log(t)$

③  $\log\left(\frac{\Delta s}{\Delta \log(t)}\right) - \log(q)$  관계도

-  $q_u = \frac{1}{2}q_u$  or  $\frac{1}{3}q_u$  중 작은 값

▶ 하중침하곡선과 전단파괴의 종류

1) 하중침하곡선



2) 전단파괴의 종류

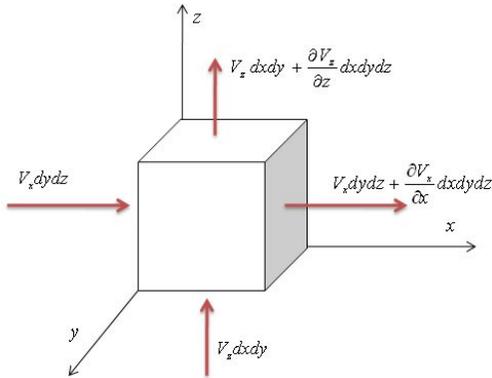
① 전면전단파괴 : 어떤 하중까지는 침하가 적으나 그 이상의 하중이 가해지면 급격하게 침하가 커진다. (stiff clay, dense sand)

② 국부전단파괴 : 초기하중부터 침하가 점진적으로 일어나다가 더욱 하중이 커지면 직선변화한다. (soft clay, loose sand)

### 제 3 장 흙의 투수 및 탬

#### ■ 투수방정식

- ▶ 기본가정 (비균등모포드) (비압축성/균질/등방성/모관수 없다 /포화조건/Darcy의 법칙이 성립)
- ▶ 공식의 유도



- z방향으로의 유입:  $V_z dx dy$
- z방향으로의 유출량:  $V_z dx dy + \frac{\partial V_z}{\partial z} dx dy dz$
- x방향으로의 유입량:  $V_x dy dz$
- x방향의 유출량:  $V_x dy dz + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx dy dz$
- 유량의 변화: 결국 2차원 평면에서 유입되는 총 유량은 x, z 방향으로 유입된 유량의 합이며 유출되는 양은 x, z 방향으로 유출된 유량의 합일 것이므로:

$$\Delta Q = \Delta Q_o - \Delta Q_s$$

$$= (V_z dx dy + \frac{\partial V_z}{\partial z} dx dy dz + V_x dy dz + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx dy dz) - (V_x dy dz + V_z dx dy)$$

$$= \frac{\partial V_z}{\partial z} dx dy dz + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx dy dz$$

$$= \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial h}{\partial x} = K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

여기서, 유량은 일정하다고 가정하므로

$$K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

만일 이 흙이 등방성이라면(=x, z 방향의 투수계수가 같다면)

$$\frac{\partial h^2}{\partial z^2} + \frac{\partial h^2}{\partial x^2} = 0 \quad (2차원 Laplace 방정식)이 유도되었다$$

#### ■ 투수계수의 측정

- ▶ 측정방법: 정변입상수입관법 (정수위/변수위/압밀/3축/수위변화/압력수주/관측정/경험식)

- ▶ 정수위 투수시험
  - 투수성이 큰 사질토에 적합한 방법
  - Darcy의 법칙 이용

$$k = \frac{qL}{hAt} \quad (cm/sec)$$

- ▶ 변수위 투수시험
  - 비교적 투수계수가 낮은 미세 모래나 실트질 흙
  - 스탠드파이프의 수위에서 미분방정식으로 기본식 유도

$$dQ = a(-dh)$$

$$dQ = KiAdt = K \frac{h}{l} Adt$$

$$a(-dh) = K \frac{h}{l} Adt \quad (좌변은 수위변화, 우변은 시간에 대한 것)$$

따라서 양변에  $\frac{1}{h}$ 를 곱해주어 우변의 h를 소거해 준다.

$$a \left( \frac{-dh}{h} \right) = k \frac{A}{l} dt \quad (좌변은 수위에 대해 우변은 시간에 대해 적분하면)$$

$$-a \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{h} dh = \frac{KA}{l} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$a \ln(h_1 - h_2) = \frac{KA}{l} (t_2 - t_1)$$

$$K = \frac{al}{At} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) = 2.303 \frac{al}{At} \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$

- ▶ 압밀시험
  - 투수계수 k가  $10^{-7}$ 에서  $10^{-8} cm/sec$  이하인 경우 변수위 투수

시험을 하려면 포화시키는 시간이 상당히 오래 소요 → 실용적이지 못함.

- 압밀시험에 의해 간접적으로 투수계수를 구한다.

$$k = C_v m_v \gamma_w (cm/sec)$$

- ▶ 주입시험
- ▶ 양수시험

$$k = \frac{2.303q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \log_{10} \frac{r_2}{r_1} (cm/sec)$$

#### ■ 성층토의 평균투수계수

- ▶ 성층토의 평균 투수계수
  - $K_h > K_v$ 가 성립한다.
  - $K_h = \frac{1}{H} (K_1 H_1 + K_2 H_2 + \dots + K_n H_n)$
  - $K_v = \frac{H}{\frac{H_1}{K_1} + \frac{H_2}{K_2} + \dots + \frac{H_n}{K_n}}$
  - $K' = \sqrt{K_h K_v}$

#### ■ 투수계수의 영향인자

- ▶ 영향인자: Taylor의 제안식
 
$$K = D_s^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (D_s = D_{10})$$
- ▶ 공극비와 투수계수:  $\gamma_w, \mu$ 는 온도에 따라 변화가 적고 모래의 C값도 변화가 적기 때문에
 
$$K_1 : K_2 = \frac{e_1^3}{1+e} C_1 : \frac{e_2^3}{1+e} C_2 = \frac{e_1^3}{1+e} : \frac{e_2^3}{1+e}$$
- ▶ sand질 흙에서는  $K_1 : K_2 = e_1^2 : e_2^2$ 이 성립한다.
- ▶ 점성계수토에서는  $K_1 : K_2 = \mu_2 : \mu_1$
- ▶ 입경과 투수계수: Hazen의 식(sandy soil)
 
$$K = 100 D_{10}^2 (cm/sec)$$
- ▶ 영향인자: 입구간점포(입경, 구조, 간극비, 점성계수, 포화도)

#### ■ 흙 속의 물의 공학적 구분

- ▶ 지하수: Darcy의 법칙 적용
- ▶ 자유수: 중력수
- ▶ 보유수: 보유수는 흙의 강도, 지지력 등에 역학적으로 영향을 주는 물로, 지하수, 자유수보다 공학적 성질이 복잡하다.

- ① 모관수 : 모세관 작용을 받아서 지하수면 위로 솟아올라 얇은 막을 형성한 물을 말한다.
- ② 흡착수 : 흡착수는 물리, 화학 작용에 의해 흙 입자 표면에 흡착되어 있는 물로, 110도 이상 가열해야 분리가 가능한 물이다.
- ③ 화학적 결합수 : 이는 고온에서 가열해도 분리가 되지 않는 물로, 공학적으로는 흙 입자와 일체로 거동하여 물의 이동이 없다고 본다.

### ■ 흙 속의 물의 흐름

#### ▶ Darcy의 법칙

- 레이놀즈수가 4 이하인 층류에 적용
- 지하수의 흐름은  $Re \approx 1$ 이므로 Darcy의 법칙이 성립
- Darcy의 실험적 연구

$$Q = KiA = KA \frac{h}{L} = Av$$

#### ▶ 접근속도와 침투속도

- A는 흙 전체의 단면표사이므로 V는 실제유속 아님
- 접근속도 또는 유출속도는 Darcy 법칙에서 유량을 구하기 위한 속도 간극포함
- 실제, 흡수에 물이 흐르는것은 간극으로 가능하므로 흙입자를 제외한 면적이 적용되므로 → 유출속도보다 침투속도가 빠르게 됨.

$$Q = V \cdot A = V_s A_v$$

$$U_s = V \cdot \frac{A}{A_v} = V \cdot \frac{AL}{A_v L} = V \cdot \frac{V}{V_v}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \text{이므로, } V_s = \frac{V}{n} \text{이 된다.}$$

### ■ 동수경사 및 한계동수경사

#### ▶ 정의 : $i = \frac{\Delta h}{l}$

#### ▶ 한계동수경사

$$i = \frac{\Delta h}{z} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w}$$

$$i_c = \frac{G-1}{1+e}$$

- 동수경사가 한계동수경사가 되면 → 유효응력 0 → 점착력 없는 흙은 전단강도를 상실한다.

### ■ quick sand/boiling/piping

#### ▶ 정의

#### ▶ 분사현상의 발생기구

- $\frac{1}{2} D^2 i \cdot \gamma_w > \frac{1}{2} D^2 \gamma_{sub}$  이면 분사 발생
- 침투력 U가 모래의 수중 단위중량 W 보다 클 때

$$- i \gamma_w > \gamma_{sub} S = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w$$

여기서 양변을 물의 단위중량으로 나누면

$$i = \frac{H_m}{D} > \frac{G_s - 1}{1 + e} \text{ (여기서 } i \text{는 동수경사)}$$

#### ▶ 파이핑의 원인(체재 및 기초지반 동일)

- 단지필수투파그시(단면부족, 지수벽, 필터, 수압파쇄, 투수층, 파쇄대 처리, 그라우팅, 시공관계(다짐불량, 투수성큰재료, 입도불량))

#### ▶ 파이핑의 안전율

$$- F_s = \frac{W}{U} = \frac{\frac{1}{2} D^2 \gamma_{sub}}{\frac{1}{2} D^2 i \gamma_w} = \frac{\gamma_{sub}}{i \gamma_w} = \frac{i_c}{i} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \frac{H_m}{D}$$

#### ▶ 파이핑의 검토 : 한수유한테크 (한계동수경사/수압파쇄/유선망/한계유속/테르자기방법/크리프비)

### ■ 댐의 안정

#### ▶ 체재의 안정성 평가 : 누누피전간 (누수량/누수위치/파이핑/간극수압/전단강도)

#### ▶ 댐의 기초처리

댐기초처리 : 암반 **CCCE단중사** (Core Trench, Curtain G, Consolidation G, 단층 파쇄대, 층상퇴적암, 양안 사면안정---투수층(누수, 양압력대책), 연약층

#### ▶ 댐파괴의 원인 : 파열제간지침 (파이핑/월류/재료/간극수압/지진/침하)

### ■ 가중 크리프비

- ▶ 정의 : 웨이트를 붙인 크리프 길이(체재와 기초 접촉면에 연한 유선의길이중 수평부분의 길이에 1/3의 계수를 곱한 것)와 댐 상하류의 수위차와의 비.

#### ▶ 크리프비의 산정식

$$- C_R = \frac{L_R}{H} = \frac{\frac{1}{3}D + 2L}{H}$$

여기서,  $C_R$ : 가중 크리프 비

H : 수위차

L : 수평 거리 (45° 이하)

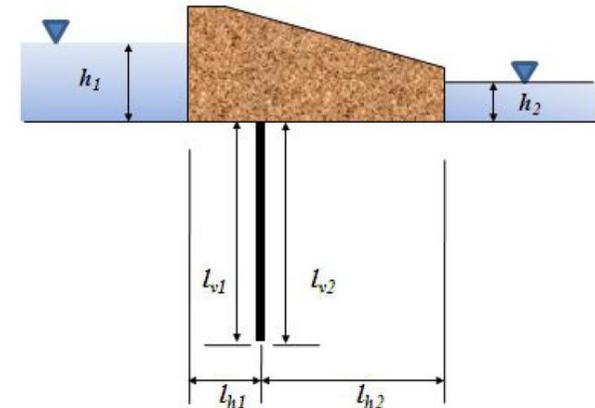
$L_R$  : Dam 단면의 가중 크리프

D : 수직거리 (45° 이상)

- 상기 식에 의해 계산된  $C_R$  이 기준보다 크면 안전하다.
- 적절한 배수 설비가 있다면  $C_R$ 은 10% 감소시킬 수 있다.

#### ▶ 가중크리프비 예제

다음과 같은 단면에서 가중크리프비를 검토하고 파이핑에 대한 안전여부를 검토하라. 댐체재는 가는 모래로 구성되었고,  $h_1 = 10m, h_2 = 2m, l_{h1} = 6m, l_{h2} = 10m, l_{v1} = l_{v2} = 8m$ 이다.



다음과 같이 계산하며 가는 모래의 경우 7.0 이상이어야 안전하다.

$$CR = \frac{l_w}{(h_1 - h_2)}$$

$$l_w = \frac{\sum l_h}{3} + \sum l_v$$

$$\therefore \sum l_h = l_{h1} + l_{h2}$$

$$\sum l_v = l_{v1} + l_{v2}$$

$h_1 = 10m, h_2 = 2m, l_{h1} = 6m, l_{h2} = 10m, l_{v1} = l_{v2} = 8m$  이므로  
 $\Sigma l_v = 8 + 8 = 16m$   
 $\Sigma l_h = 6 + 10 = 16m$   
 $\therefore l_w = \frac{16}{3} + 16 = 21.3m$   
 $\therefore CR = \frac{21.3}{10-2} = 2.7 < 7.0$  (No good)

### ■ 유선망

- ▶ 정의 : 유선과 등수두선으로 이루어진 곡선군
- ▶ 용도 : **파침관수동심** (파이핑유무, 침투유량, 간극수압, 손실수두, 등수구배, 침투력)
- ▶ 유선망의 결정 : 해석적/실험적/도식적
- ▶ 특징 : **정직유선** (망은 정사각형/등수두선과 유선의 직교/유선망의 손실수두는 같다, 정방향 유선망의 모든 유로의 유량이 같다.)
- ▶ 유선망의 작도
  - 시행착오로 등방성( $K_v = K_h$ ), 이방성 구분
  - 이방성인 경우( $K_v \neq K_h$ ) :  $K_{av} = \sqrt{K_v \cdot K_h}$
- ▶ 침투유량
  - 침투유량 :  $\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \Delta q_4 = \Delta q$
  - 한 개의 유로를 통해 흐르는 유량은 다음과 같다.

$$\Delta q = kiA = k \frac{H}{N_d}$$

- 모든 유로를 통과하는 침투수량

$$q = kH \frac{N_f}{N_d}$$

▶ 2차원 흐름의 기본원리 : **이유리**(2차원 흐름/유선망/라플라스방정식)

### ■ 흙의 동해

- ▶ 동해 : 공극수 동결 → 부피팽창(9%) → 아이스렌즈 성장 → 지표면이 부풀어 오르는 현상
- ▶ 연화현상(frost boil) : 해빙기에 융해되어 지중에 과잉수분이 존재 → 지반이 연약화 → 전단강도가 현저히 떨어지는 현상
- ▶ 동상의 조건 : 온도/토질조건/수분공급조건
- ▶ 동결심도조사 : **현일법** (현장조사/일평균기온/열전도율)
- ▶ 현장조사 : 동결심도/테스트피트

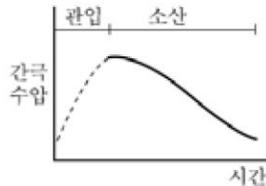
- ▶ 일평균기온 : 일평(-)→(+)로 변하는 달에서부터 시작하여 일평(-)→(+)로 변하는 달까지의 일평균 기온을 누계하여 Plot 하였을 때 (+)(-) 최대치의 절대값이 동결지수이다.
- 동결심도  $Z = C \sqrt{F}$  (cm)  
 여기서 C : 정수(3~5)  
 우리나라 평균값은 4.0  
 F : 동결지수 (°C day)
- ▶ 열전도율에 의한 방법 : 열전달이 흙과 물의 잠재열로 이루어진다고 가정하여 동결심도를 구한다.
- ▶ 동상방지공법 : **지역차단** (치환/차단/단열/약액)
- ▶ 치환공법 : 좋은 재료(0.074mm체 통과량이 10% 미만인 모래, 깬자갈, 쇄석, AASHTO 분류결과 A-2, A-3에 속하는 흙, 통일분류결과 GW, GP, GM, SW, SP)
- ▶ 차단공법
  - 지하수위를 저하시키거나 성토
  - 모관수차단하기 위해 Soli Cement나 Asphalt로 안정처리
- ▶ 단열공법 : 스티로폼, 기포콘, 석탄재, 코우크스
- ▶ 약액처리공법 : 소금, 염화칼슘 등을 섞어 화학적으로 안정처리한다.

### ■ 지반별 간극수압 소산곡선

- ▶ 간극수압 소산시험 : 소산시험은 피조콘장비로 수평방향 압밀계수를 추정하는 시험
- ▶ 시험방법 : ① 콘을 포화시킴 ② 콘을 지중에 관입하고 필요심도에서 콘을 정지함 ③ 시간에 따라 감소하는 간극수압을 측정함 ④ 압밀도를 구함

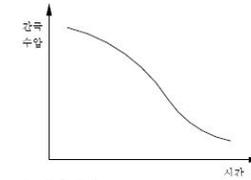
$$U = 1 - \frac{u - u_o}{u_i - u_o}$$

여기서,  $u$  : 임의시간에서의 간극수압,  $u_i$  : 초기간극수압,  $u_o$  : 정수압

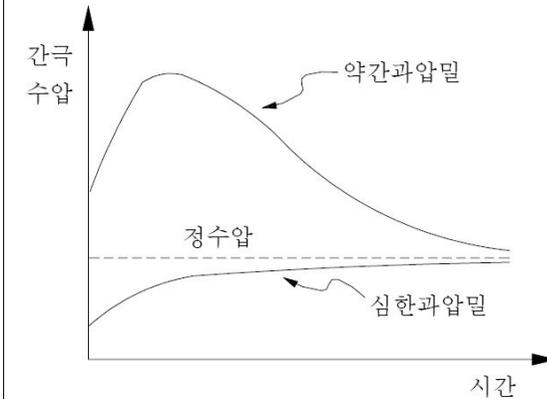


▶ 소산곡선

- 정규압밀점토 : ① 정규압밀점토는 전단시 압축성향으로 양의 간극수압 유발 ② 소산시험 시작과 함께 간극수압이 감소됨.



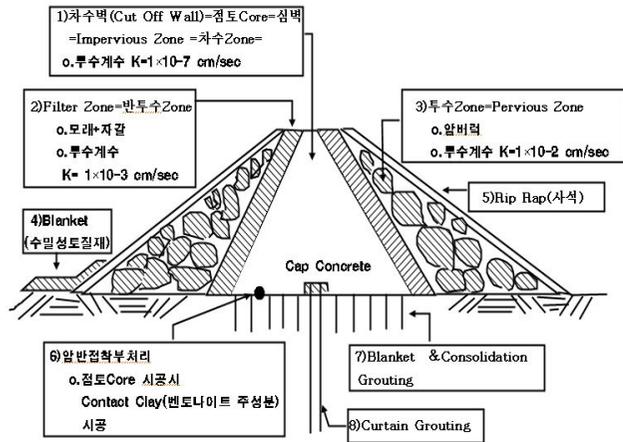
▶ 과압밀점토 : 과압밀점토는 전단시 과압밀 정도에 따라 양 또는 부의 간극수압 발생 ② 약간과압밀은 정수압보다 큰 간극수압이 발생되고 반응지연으로 다소 증가하다가 감소됨. ③ 심한 과압밀은 부의 간극수압이 발생되고 소산됨.



### ■ Rock fill dam

- ▶ 석괴댐의 정의 : 댐 본체의 안정을 유지시키기 위해서 중력 부분에 암석, 즉 돌을 쌓아 올린 댐으로 콘크리트벽 또는 점토층 등으로 차수벽을 만든다. 흙댐(earth dam)과 함께 필 타입 댐(fill type dam)이라고 총칭한다.
- ▶ 석괴댐 계측항목
  - 차수벽: 변변조(변위측정계, 변형률계, Jointmeter)
  - 댐체체: 침침토지(침하판, 침하계, 토압계, 지진계)
  - 하류부: 누수량측정계
- ▶ 석괴댐 장점 : **코침공동점수** (코아재료구득해결, 침하문제해결, 공기 및 경제성유리, 동결기 시공가능, 수압파쇄문제해결, 겸사보수용이)

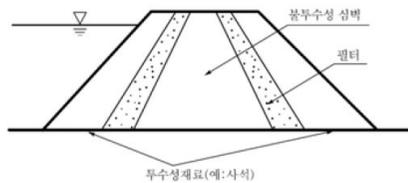
▶ Fill Dam의 기초처리



■ 댐 필터의 구비조건

▶ Filter의 정의

- 상류측 Filter : 흙 속을 통과하는 물이 굵은 입자로부터 가는 입자로 통과한다면 간극수압이 유발되므로 Filter 설치로 간극수압 발생을 막음
- 하류측 Filter : 흙 속을 통과하는 물이 가는 입자로부터 굵은 입자로 통과하면 가는 입자가 유실되므로 Filter 설치로 가는 입자층인 심벽을 보호함



▶ Filter의 적용

- 흙댐(Zone 형 Rock Fill Dam)의 심벽(점토코어:차수벽)의 양쪽
- 흙댐, 제방제체 의 하류경사면: 배수 Drain
- 옹벽의 물구멍(배수공)주위

▶ Filter의 구비조건

- 상류측 Filter의 구비조건(기능) : ① 간극이 충분히 커서

Filter로 들어온 물이 빨리 빠져나가야 한다 ② 간극수압 발생 방지(상류 수위변동시 잔류수압 방지)

- 하류측 Filter의 구비조건(기능) : 간극의 크기가 충분히 작아 인접해있는 흙의 유실방지(점토코어를 보호)

- Filter의 입도기준 (Bertram의 기준 제시=Filter의 설계)

① 간극의 크기가 충분히 작아 인접토의 유실이 방지되어야 함

$$\frac{(D_{15})_f}{(D_{85})_s} \leq 5, \quad \frac{(D_{15})_f}{(D_{15})_s} < 20, \quad \frac{(D_{30})_f}{(D_{30})_s} < 25$$

② 간극의 크기가 충분히 커서 필터로 유입된 물이 빨리 빠져야 하며 침투압이나 수압이 발생되지 않도록 투수성이 좋아야 함.

$$\frac{(D_{15})_f}{(D_{15})_s} > 4$$

o D : 가적 통과율(통과중량 백분율) 15% 대의 입경 의미

o f : Filter

o s : filter에 인접해 있는 흙

▶ 평가

- 흙의 유실이 발생되면 piping현상이 생기게 되고 수압과쇄로 체체에 치명적 일 수 있음.
- 배수성이 불량하면 수압이 상승하게 되어 전단강도의 감소를 수반함.
- 따라서, filter는 물의 원활한 배수와 유실방지의 조건이 충족되어야 함.

■ 모세관 현상

▶ 모관상승고 :  $h_c = \frac{4T \cos \theta}{d \gamma_w}$

- 자연토 :  $h_c = \frac{c}{e \cdot D_{10}}$  ( c : 입자 모양 및 상태에 관한 변수 (c=0.1~0.5))

▶ 모관 포텐셜 : 흙 속에서 모관수를 지지하는 힘

- 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하고
- 입경이 작을수록 온도가 낮을수록
- 함수비가 낮을수록 공극이 클수록
- 포텐셜이 낮아진다.
- 젖은 모래는 포화상태일 때 최대 포텐셜이 된다.

■ 베르누이 방정식

▶ 개요

① 베르누이 방정식은 유체 내 어느 한 점에서의 전수두는 압력수두+위치수두+속도수두의 합

② 연속방정식과 같이 쓰이며 에너지 보존법칙 적용

▶ 베르누이 방정식

① 베르누이의 식

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z$$

② 고속으로 물이 흐르는 경우 물의 속도는 상대적으로 매우 작으므로 속도수두의 항을 무시하면

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z \text{ 로 쓸 수 있다.}$$

③ 경사진 수로의 두 구간 A, B에 대해 생각해 보면

$$\Delta h = h_A - h_B = \left( \frac{p_A}{\gamma_w} + z_A \right) - \left( \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B \right)$$

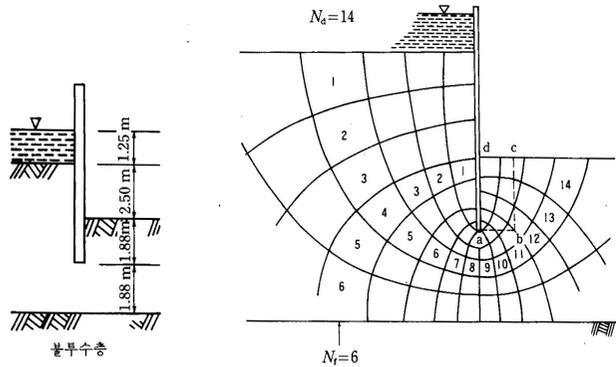
④ 동수경사  $i = \frac{\Delta h}{l}$

■ 파이핑에 대한 안전율 검토

▶ . Piping의 안전율 검토

그림과 같이 물막이 sheet pile로 유선망을 그렸다. 투수층의 투수계수 K가  $18 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 이고, 모래의 포화단위무게가  $1.86 \text{ tf/m}^2$ 일 때

- 1) 1m당 침투수량을 구하여라.
- 2) abcd의 침투력을 구하여라.
- 3) abcd의 수중무게를 구하여라.
- 4) 파이핑에 대한 안전율을 검토하라.



<풀이>

1) 침투수량

$$① K=18 \times 10^{-3} \times 3600 \text{sec} \times 24 \text{hr} = 1555.2 \text{mm/day} = 1.555 \text{m/day}$$

$$② q = KH \cdot \frac{N_f}{N_d} = 1.555 \times 3.75 \times \frac{6}{14} = 2.5 \text{m}^3/\text{day}$$

2) abcd의 seepage force

- ① 침투력은 토피부피 만큼의 물의 무게와 동수경사의 곱이다.
- ② Seepage force가 토피의 수중무게보다 커지면 파이핑이 발생한다.
- ③ a와 b에서의 침투수두를 구해서 평균수두( $H_m$ )를 구해서 동수경사를 구해야 한다. 침투력은 엄밀하게는 곡선적으로 변화하나 실용적으로는 사다리꼴로 변한다고 보아 두 점의 산술 평균값을 구한다.

$$④ a에서의 침투수두 : H_a = \frac{n_d}{N_d} \times H = \frac{5}{14} \times 3.75 = 1.339 \text{m}$$

$$⑤ b에서의 침투수두 : H_b = \frac{n_d}{N_d} H = \frac{3}{14} \times 3.75 = 0.804 \text{m}$$

$$⑥ \text{평균 침투수두} : H_m = \frac{H_a + H_b}{2} = \frac{1.339 + 0.804}{2} = 1.072 \text{m}$$

$$⑦ \text{동수경사} : i = \frac{H_m}{D} = \frac{1.072}{1.88} = 0.57$$

$$⑧ U = \frac{1}{2} D^2 i \gamma_w = \frac{1}{2} \times 1.88^2 \times 0.57 \times 1 = 1.007 \text{tf/m}$$

3) abcd의 수중무게

① 토피 abcd의 단위폭 1m당 수중무게는 체적과 수중단위중량의 곱이므로 먼저 포화단위중량을 구해야 한다.

$$② \text{수중단위중량} : \gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w = 1.86 - 1 = 0.86 \text{tf/m}^3$$

$$③ \text{토피의 수중무게} : \frac{1}{2} D^2 \gamma_{sub} = \frac{1}{2} \times 1.88^2 \times 0.86 = 1.520 \text{tf/m}$$

(단위폭당 무게이므로 단위가 tf/m가 된 것이다.)

4) 파이핑에 대한 안전율

$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{1.520}{1.007} = 1.51 \quad (\text{파이핑에 대해 안전하다})$$

### ■ 제체파괴의 원인관 대책

▶ 개요

Fill Dam과 하천제방의 제체파괴의 원인 및 대책을 Table로 도시하면 다음과 같다.

Fill Dam		
원 인	대 책	
누 누수, Piping	차 수 벽	점토Core=차수벽=심벽
		Sheet pile
		Slurry Wall
침	침윤선 저하	Filter재료구비조건
		점토재료구비조건
세	세굴	
사	사면붕괴	비 비탈면보호
다	다짐불량	
균	균열(단층과쇄대, 부등침하)	
재	재료불량	
단	제방단면부족	압 압성토
구	구멍	

하 천 제 방		
원 인	대 책	
누 누수, Piping	차 수 벽	Sheet pile
	Blanket	
	기초처리	
침	침윤선 저하 = 제방단면확대	배수우물
		배수드레인
세	세굴	
사	사면붕괴	호 호안공
다	다짐불량	
균	균열	
재	재료불량	
단	제방단면부족	압 압성토
구	구멍	제방단면확대:소단

### ■ Dam 기초의 암반처리 공법

▶ 개요

① Dam 기초 암반 처리는 Dam 축조공중 중 가장 먼저 시작되는 공중으로 대단히 중요

② 댐의 안정, 차수, 누수방지, 붕괴 방지 역할

▶ 기초 암반처리의 종류

1) Concrete 댐

① 기초암반 표면부 처리(기초 굴착면)

② Consolidation Grouting

③ Curtain Grouting

2) Fill Dam

① 기초암반 표면부 처리(기초굴착면)

② Consolidation & Blanket Grouting

③ Curtain Grouting

④ Rim(Limb) Grouting

⑤ Contact Grouting

▶ 기초처리공법의 종류별 특징

1) Curtain Grouting

암반내의 절리면을 따라 하류로 유출되는 침투수를 억제하고 침투수에 의한 양압력, 파이핑 현상으로부터 댐체의 안정성을 확보하기 위해 댐 기초부에 시행하는 그라우팅

2) Consolidation Grouting(압밀그라우팅)

기초압반의 변형성, 강도, 수밀성 등을 개량하기 위한 그라우팅

▶ 시험의 종류 : Lugeon Test 등

■ **하천기초 설계시 세굴의 영향**

▶ 개요

호안은 주로 기초의 세굴에 의해 파괴되지만, 그 외 여러 가지 원인이 있으므로 파괴원인을 정확히 파악하여 설계 시공해야 한다.

▶ 호안의 파괴원인 및 대책(유의사항)

- 1) 기초세굴에 대한 안정대책
- 2) 뒷채움 토사의 흡출에 대한안정
- 3) 배후 토압,수압에 의한 붕괴에 대한 안정
- 4) 비탈덧기 파괴(유수작용)에 대한 안정
- 5) 호안 비탈머리 부근의 세굴
- 6) 상하류 마감부 세굴에 대한 안정
- 7) 호안구조의 변화점(급격한 비탈경사)에 대한 안정 : 밑다짐공 실시

▶ 호안공의 종류

- 1) 천단보호공
- 2) 비탈머리 이음공
- 3) 비탈 덧기공(호안공)+비탈멈춤공(기초)
- 4) 밑다짐공

▶ 평가

1)호안공시공시 주의사항(시공관리 주안점)

- ① 호안공 시공후 세굴방지
- ② 다짐에 유의
- ③ Mortar 채움에 유의
- ④ 유속, 시공시기, 수심, 기상 조건 고려하여 조사, 계획, 설계, 시공 철저

2)호안 공법 선정시 고려 사항

- ① 안전성 ② 경제성 ③ 시공성 ④ 공기,공사비 ⑤ 호안의 중요성

■ **교각 주위의 세굴(SCOUR)**

▶ 정의

강이나 바다에서 흐르는 물로 기슭이나 바닥의 바위나 토사가 씻겨 패는 일을 세굴이라 한다.

▶ 세굴의 발생기구

유수의 힘이 한계소류력  $\uparrow \rightarrow$  토립자가 물 속에 말려 들어가 하류로 간다  $\rightarrow$  구조물에 접하는 토사가 세굴되어 구조물을 쓰러뜨리거나 침하

▶ 세굴의 요인

- 1) 장기적 하상변동
- 2) 하천수축에 의한 일반세굴
- 3) 국부세굴 $\rightarrow$  국부세굴에 의한 것이 가장 일반적

▶ 세굴 방지대책

- 1) 와류감소
  - ① 교각전면의 바닥판을 상류로 연장
  - ② 교각에 피어싱
- 2) 세굴의 감소
  - ① 상류에 희생말뚝 설치
  - ② 사석보호공, 돌망태 보호공, 콘크리트 블록 보호공, 토목섬유 보호공

■ **침윤선 (Seepage line)**

▶ 정의

① 댐의 침윤선이란 제체에 물이 침투하여 작용하는 한계선, 제체 유선망의 최상위선, 제체의 물이 정상 침투류의 자유수면을 나타내는 선으로 간극수압이 zero인 선이다.

② Earth dam의 건설에서 침윤선(seepage line, top flow line)의 결정이 중요하다.

③ 대기와 접하는 최상부의 유선

④ 전수두=압력수두+위치수두:손실수두

▶ 경계조건

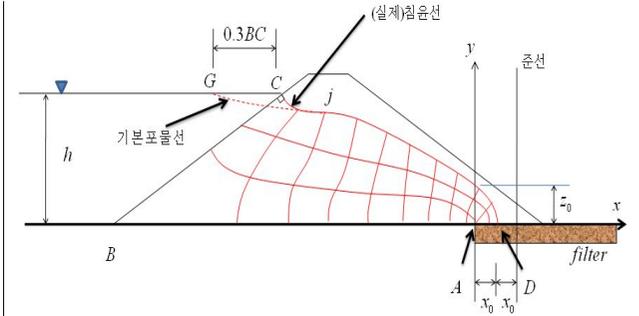
① 불투수층 경계면 AB는 최하부 유선이며, CD는 최상부 유선으로 이를 침윤선이라고 한다.

② BC위의 모든 점에서는 전수두가 h인 등수두선이다.

③ 필터가 있는 경우에는 AD 역시 전수두가 zero인 등수두선이 된다.

④ 따라서 유선은 AB, CD이며, 등수두선은 BC, AD이다.

⑤ 침윤선 CD에서는 압력수두가 0이므로 전수두=위치수두이다.



▶ 침윤선의 작도

① G점 결정 : AE의 수평거리의 30% 지점

②  $\overline{AE} = 0.3\overline{AG} \rightarrow$  점 E선정

② 준선결정 : 초점 F와 G의 수평거리를 d라 하고 FG거리  $\sqrt{h^2 + d^2}$  과 d와의 거리차를  $x_0$ 라고 한다. ( $x_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$ )

③ 기본 포물선의 작도 : F점에서 하류측에  $\frac{x_0}{2}$ 만큼 떨어진 점을  $G_0$ 라 하면 F를 초점으로 하여 기본포물선 방정식  $x = \frac{y^2 - x_0^2}{2x_0}$ 에 의해 G, M,  $G_0$ 를 통과하는 기본 포물선을 그린다.

④ 상류측 보정 : 상류측 경사면 AE는 하나의 등수두선이므로 침윤선은 이 면에 직교해야 하므로 E점에서 직각으로 유입하게 하고, 기본 포물선과 접하도록 한다.

⑤ 하류측 보정 : 기본 포물선과 하류측 경사면과의 교점을 M, 침윤선과 하류측 경사면과의 교점을 N이라 하면 N점을 통과하도록 하여 E, N을 통과하는 실제 침윤선을 얻는다.

▶ 침윤선의 작도 목적

- ① 제체 유선망을 경계조건 결정 등 유선망 작도용
- ② 제체 안정검토시 간극수압 계산
- ③ 유선망으로 제체 안정성 검토
- ④ 침투유량계산
- ⑤ 제체 부위별 간극수압계산 등
- ⑥ 댐 설계해석 자료제공

▶ 침윤선의 저하 대책 및 영향

(1) 침윤선의 저하 대책

- ① 표면차수방법
- ② 점토코아존 시공법

- ③ 하류측 연직 및 수평 필터 설치법
- ④ 릴리프웰 설치법
- (2) 침윤선의 영향 (길어지면 나타나는 현상)

- ① 지진시 액상화로 파괴 현상이 발생
- ② 체체 간극수압이 높아져서 유효응력이 감소되어 전단강도가 저하되므로 댐의 안정을 위협

### ■ 제방의 파괴 원인

#### ▶ 개요

제방은 돌과 흙으로 구성되어 있는 구조체로서, 홍수조절 및 담수 및 농업용수로 사용하기 위해서 물을 담수하고 조절하는 구조체이다. → 제방의 붕괴 원인으로서 침투수압에 의한 파괴에 의해 붕괴되는 경우와 침윤선이 제방 내에 위치하여 제방이 파괴되는 경우로 나타낸다.

#### ▶ 제방의 파괴 원인

##### 1) 제방의 단면 부족

제방의 단면이 부족하여 제방 파괴

##### 2) 기초 지반의 연약층 존재

기초 지반이 연약하여 침투수가 침입하여 기초 저면의 파괴에 의한 제방 붕괴

##### 3) 제방의 다짐 부족

제방의 다짐이 불량하여 제방 붕괴

##### 4) 차수층 미설치

기초 지반의 연약 지반을 방지하기 위하여 차수층을 설치하지 못해 제방 붕괴

##### 5) 차수 심벽 미설치

제방의 체체내에 침윤선의 침입을 방지하기 위해 차수 심벽을 설치해야 하는데, 미설치로 인해 제방 붕괴

#### ▶ 제방의 붕괴의 방지 대책

##### 1) 제방 단면의 확대

제방 단면을 확대하여 침윤선을 제방체내에 유지하여 누수를 방지 한다

##### 2) 기초 지반의 그라우팅을 실시

기초 지반을 연약지반을 단단히 하여 침투수를 방지한다

##### 3) 체체의 다짐 철거

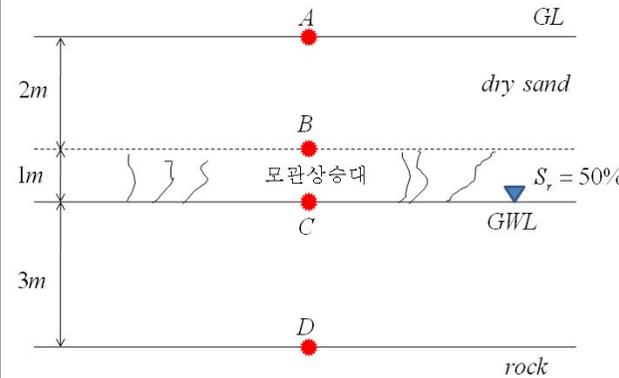
체체내의 다짐을 철거지 한다

##### 4) 차수층 설치

- 5) 차수 심벽을 설치 한다
- 6) 배수층 설치
- 7) 체체의 브래킷을 설치 한다
- 8) 동물에 의한 유실 및 구멍 뚫림을 방지
- 9) 세굴에 의한 파괴를 방지 한다.

### ■ 모세관 상승지역의 지중응력 계산문제

그림과 같은 흙입자의 비중이 2.65이고 간극비가 0.5인 조립토 층이 있다. 점 A, B, C, D에서의 전응력, 간극수압, 유효응력을 구하시오.



<풀이>

#### 1) 단위무게

$$\textcircled{1} \text{ 구간 A-B : } \gamma_{at} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2.65 \times 1}{1+0.5} = 1.77 \text{ tf/m}^2$$

(현장조건에서  $\gamma_d$  상태가 가당하기는 한가? 당연히 습윤상태에 해당하는 것이 옳지만 건조도에 가깝다고 이상화하였다.)

$$\textcircled{2} \text{ 구간 B-C : } \gamma_t = \frac{2.65 + 0.5 \times 0.5}{1+0.5} \times 1 = 1.93 \text{ tf/m}^2$$

$$\textcircled{3} \text{ 구간 C-D : } \gamma_{sat} = \frac{2.65 + 0.5}{1+0.5} \times 1 = 2.10 \text{ tf/m}^2$$

#### 2) 응력계산

##### ① 점 A에서

전응력	0
간극수압	0
유효응력	0

- 지표면이므로 오직 대기압만 작용할 뿐 아무 응력도 작용하지 않는다.

##### ② 점 B에서

- 점 B는 2가지 케이스로 구분해서 생각해야 한다.

- B의 바로 위는 문제가 없으나 B의 바로 아래는 모세관 상승 영역이므로 포화도를 고려해야 한다.

전응력	$1.77 \times 2 = 3.54 \text{ tf/m}^2$
간극수압	B 직상 : 0
	B 직하 : $-\gamma_w h S_r = -1 \times 1 \times 0.5 = -0.5 \text{ tf/m}^2$
유효응력	B 직상 : $3.54 - 0 = 3.54 \text{ tf/m}^2$
	B 직하 : $3.54 - (-0.5) = 4.04 \text{ tf/m}^2$

##### ③ 점 C에서

전응력	$1.77 \times 2 + 1.93 \times 1 = 5.47 \text{ tf/m}^2$
간극수압	0
유효응력	$5.47 - 0 = 5.47 \text{ tf/m}^2$

##### ④ 점 D에서

전응력	$5.47 + 3 \times 2.1 = 11.77 \text{ tf/m}^2$
간극수압	$1 \times 3 = 3 \text{ tf/m}^2$
유효응력	$11.77 - 3 = 8.77 \text{ tf/m}^2$

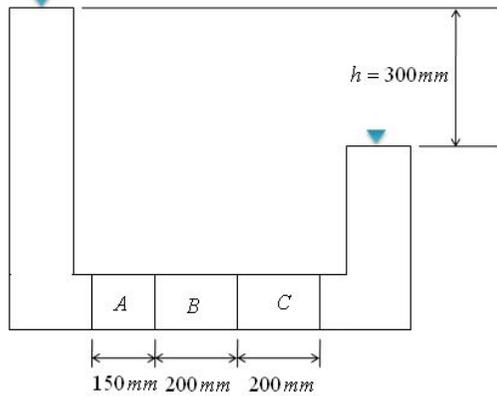
### ■ 투수계수 계산문제

그림과 같이  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 의 단면을 통해 수두차 300mm를 유지하도록 물이 공급되고 있다. 각 시료의 투수계수가 다음과 같을 때,

1) 시료의 평균투수계수를 구하여라.

2) 공급되는 물의 양( $\text{cm}^3/\text{hour}$ )을 구하여라.

시료	투수계수 $k$ ( $cm/s$ )
1	$2 \times 10^{-2}$
2	$3 \times 10^{-3}$
3	$4.3 \times 10^{-4}$



<풀이>

1) 평균투수계수

- ① 투수가 수직방향으로 일어난다. 눈으로 보이는 것이 수평방향이라고 해서 수평방향이 아니다.
- ② 흐름의 방향이 지층을 관통하면 수직방향이라고 보는 것이고, 흐름이 지층과 평행한 경우를 수평방향 투수라고 하는 것이다.
- ③ 이 문제의 경우 수두차로 인해  $A \rightarrow B \rightarrow C$ 로 흘러가므로 수직방향 투수가 일어나고 있는 것이다.
- ④

$$k_v = \frac{H}{\left(\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \dots + \frac{h_n}{k_n}\right)} = \frac{55}{\left(\frac{15}{2 \times 10^{-2}} + \frac{20}{3 \times 10^{-3}} + \frac{20}{4.3 \times 10^{-4}}\right)}$$

$$= 1.02 \times 10^{-3} cm/sec$$

(H는 수두차가 아니라 지층의 총 높이가 되므로 길이를 전부 합산해야 한다)

2) 공급되는 유량

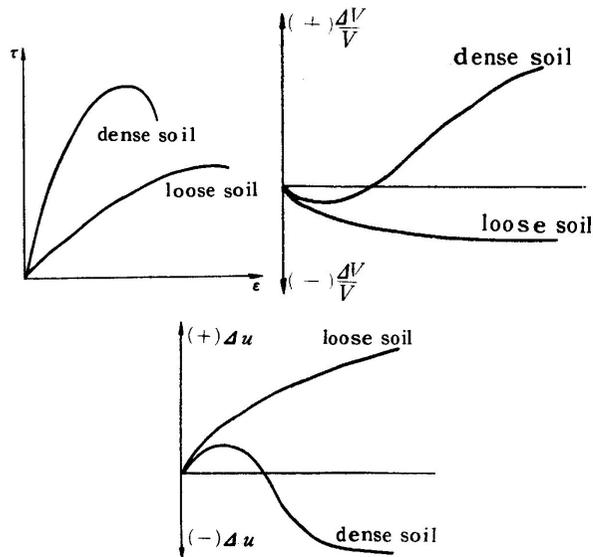
유량은 Darcy의 법칙에서 구한다.

$$q = A V t = k i A t = 1.02 \times 10^{-3} \times \frac{30}{55} \times 10 \times 10 \times 3600 = 200.3 cm^3/hour$$

## 제 4 장 흙의 전단이론

### ■ 전단의 개요

- ▶ 목적 : 강도정수를 구해 전단강도를 측정하기 위한 것 ( $C, \phi, q_u$  등)
- 전단조건(포화도, 함수비, 배수조건, 교란정도 등) 변화에 따른 강도정수의 변화 측정
- 파괴강도까지의 응력과 변형의 비교 검토
- ▶ 전단시험에서의 전단력 제어 방법
- 변형제어(strain control) : 변형속도를 일정하게 하여 전단하는 방법
- 응력제어(stress control) : 전단력을 일정 비율로 증가시켜서 전단하는 방법
- ▶ 전단시험의 종류
- 현장시험법 : **스웨덴벡장표** (베인/ 정적콘 / Penetrometer / Swedish Cone / Dutch cone / SPT)
- 실내시험법 : 직접/일축/삼축
- ▶ 배수방법별 분류 : 비비/압비/압배
- ▶ 토질별 변화(응변/체변/수압변)



### ■ 사질토와 점성토의 전단강도

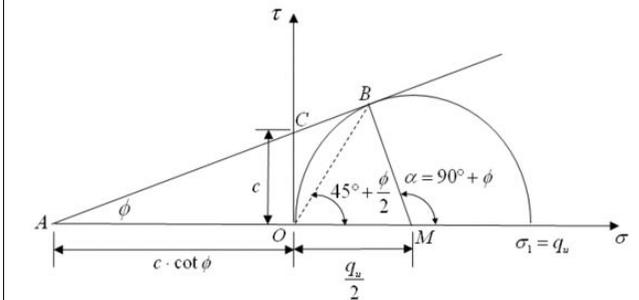
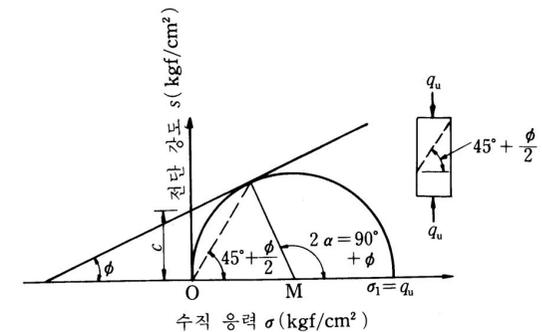
- ▶ 모래전단강도 영향인자 : **상형입크 구중**
- 상대밀도/입자형상/입도분포/입자크기/구속응력/중간주응력/물
- ▶ 강도증가율 추정방법 : **심비삼2소역**
- 심도-비배수, CU, CU, 소성지수, 액성한계
- ▶ 점토와 모래의 전단특성
- 점토 : **“수:간비관, 변:전제간”** 수직응력(간극비, 비배수강도, 간극수압계수), 변형률(전단응력, 체적변화, 간극수압)
- 모래 **“변:전제간간수”** 변형률(전단응력, 체적변화, 간극수압, 간극비, 수직응력-전단강도)
- ▶ 점토의 전단강도 영향인자 : **수입산중시속** 함수비, 압밀응력, 선행압밀하중, 중간주응력, 압밀시간, 전단속도

### ■ 직접전단시험

- ▶ 직경6cm, 높이2cm 공시체 전단 →  $C, \phi$
- ▶ 직접전단시험에서 구해지는 토질정수
- $\gamma_t = \frac{W}{V}, w_n, \gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100+w_n}, e = \frac{G_s}{\gamma_d} - 1$
- $S = \frac{w \cdot G_s}{e}, C, \phi$
- ▶ 특징
- $\tau$ 과대평가(진행성 파괴+전단면의 이물질)
- 시험 중에 함수비가 변화+ $u$  측정 곤란
- 사질토나 팽창성 점토는 dilatancy로 인해 실제보다 강도가 커지므로 보정을 해야 한다.
- 사질토는 비압밀비배수, 교란점토는 압밀배수, 불교란점토는 압밀비배수로 시험한다.
- 자연시료 채취가 어려운 경우는 흙은 OMC로 다져서 전단시험을 하기도 하지만 최악의 조건이 아니므로 삼축압축시험으로  $C, \phi$  값을 구해야 한다.
- 대형 직접전단시험기는 다져진 조립토의 시험도 가능하다.
- ▶ 단점 : **용:간주고마** 응력(불균일, 진행성파괴, Mohr 원), 간극수압측정불합, 주응력회전, 전단면고정, 파괴가 일어나기 전 응력상태 모른다

### ■ 일축압축시험

- ▶ 개요 : 점성토 지반의  $q_u$ , 예민비, 흙의 변형계수  $E_{50}$ 을 알기 위해 시험하는데 비배수 강도시험으로 본다.
- ▶ 조건 : **포균점** (포화상태, 균질, 점성토)
- ▶ 단점 : **점:비교비결파**
- 점토에서만 적용,
- 불포화 점토 및 Fissured clay에서는  $\phi=0$  조건이 되지 못함
- 교란영향으로 강도가 적게 나옴
- 비배수 조건에서만 적용
- 굳은점토에서는 취성파괴발생으로 압축강도 과소평가
- 모어원 1개 밖이라  $\phi$ 를 구하지 못함



$$q_u = 2c \tan \alpha = 2c \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

- ▶ 예민비 :  $s_t = \frac{q_u}{q_{ur}}$
- $s_t < 2$ 는 비예민성,  $s_t = 2-4$ 는 보통,  $s_t = 4-8$ 은 예민,  $s_t$ 가 8이상이면 초예민으로 분류
- 리몰딩한 시료를 함수비 변화없이 그대로 방치하면 시간 경

과와 더불어 강도가 회복되는 현상을 틱소트로피현상(thixotropy)이라고 한다.

▶  $q_u$ 와 다른 토질정수와의 상관관계

$$q_u = 2C \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \times 2C$$

$\phi=0$ 인 clay는  $q_u = 2C$

▶ 결과의 이용 : **CEN지역점**

- Consistency추정/E(변형계수)추정/N치추정/지반개량효과/에민비/점착력

### ■ 현장시험

▶ 베인시험 : 점성토지반의 비배수강도를 구하는 방법

▶ 실내시험의 문제점

- 상재하중 제거에 의한 응력이완
- 시료 채취 제작 중에 나타나는 교란
- 불완전한 배수조건

▶ 콘관입시험 : 현장에서 개략적인 자료를 얻는데 사용, 연약점토 지반에서 간단히 쓰이는 사운딩의 종류인데  $q_c$ 를 구하여 흙의 점착력을 구한다.

- 7~10m 이상인 경우 로드의 주변마찰로 인해 값이 크게 나오므로 사용하기 곤란

-  $q_c$ 에 의한 C값은 다음과 같이 구한다.

$$C = \frac{q_c}{10} = \frac{N}{16} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$N = 1.6q_c$$

### ■ 진행성 파괴

▶ 정의 : **응변전부**

진행성파괴 : 응전 응력이 불균일하게 분포, 전단저항 발휘되는 상태가 부분적으로 다르게 나타나는 현상

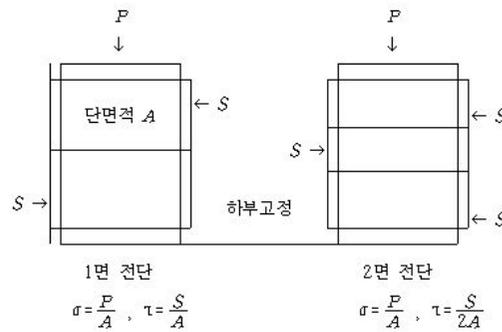
▶ 문제점

- 전단이 진행됨에 따라 시료의 단면적이 작아진다.
- $\tau = \frac{S}{A}$ 에서 단면적 A가 작아짐에 따라 전단응력  $\tau$ 가 커짐
- 기계의 마찰저항이 무시되지 않는다.
- 전단면이 한정되어 있다.

▶ 발생가능성 : **교란연결기** 과압밀 점토사면, 균열부의 응력

집중, 연약지반성토, 활동경력으로 교란된 지역, 기초 국부전단파괴

▶ 전단시험과정



- 진행성 파괴는 전단이 진행됨에 따라 활동면의 면적이 감소되면서 파괴가 연쇄적으로 일어나는 현상이다.

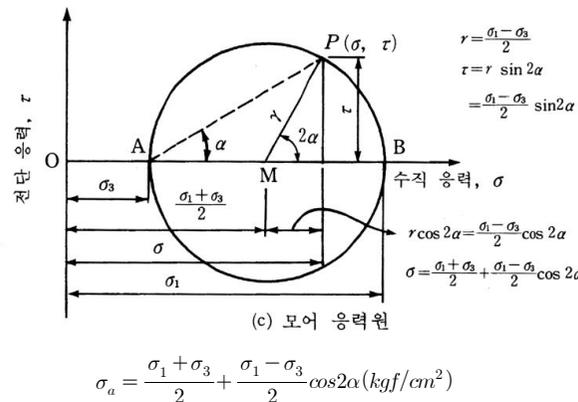
- 시험방법 : 시료를 상하로 나누어진 전단함에 넣어 가압판에 상·하압을 가하여 놓고 수평력 S에 의해 전단한다.

-  $c, \phi$ 를 구하는 방법 :  $\sigma$ 와  $\tau$ 의 관계를 plot한 직선에서 구한다.

### ■ Mohr's Circle

▶ 개요 : 전단강도를 추정하기 위해 전단시험을 통하여 시료의 강도정수인  $c, \phi$ 를 이용하여 흙의 전단강도를 나타낸다

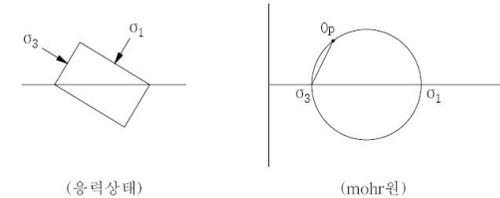
▶ 임의 점에 작용하는 응력의 관계



$$\tau_a = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

- 두 식을 이용하면 임의의 방향으로 놓인 평면 위에 작용하는 수직응력과 전단응력을 계산할 수 있는데, 모든 방향에서의 수직응력과 전단응력을 한 눈에 알 수 있도록 도식적으로 표현한 것이 모어의 씨클이라고 하는 모어의 응력원이다.

▶ 모어원의 평면기점 : 최소주응력점에서 최소주응력면과 평행한 선이 Mohr 원과 만나는 점.



▶ 평면기점의 이용

- 최대, 최소주응력으로부터 임의의 평면응력 산정
- 임의의 평면응력으로부터 최대, 최소 주응력 산정

### ■ 탄소성 모델과 소성흐름법칙

▶ 탄소성 모델의 정의

- 항복점 도달 전 재료의 응력수준 → 탄성모델고체일부의 응력상태가 항복조건 도달 후 → 소성거동으로 묘사
- 탄소성모델 적용을 위해서는 항복 시작되는 응력수준을 결정하는 파괴규준과 항복후 거동 묘사를 위한 유동법칙 필요

▶ 탄소성 모델의 적용 : 시공단계별 하중조건 고려하고 지반 거동을 정확히 해석하려면 선형, 비선형탄성 모델보다 → 탄소성 모델 사용

▶ 소성흐름법칙(plastic flow rule)

- 소성흐름에서 큰 변형 발생 → 소성흐름
- 지반해석 모델링의 기본이 되는 소성흐름법칙은 소성증분의 응력-변형 관계를 지배하는 개념
- 소성변형의 증가가 연속적으로 흐르듯 진행한다고 가정
- 탄성변형률보다 더 큰 변형 취급 → 변형률 대신 변형률증분(strain increment)를 사용

▶ 변형경화 및 변형연화

- Strain hardening : 소성변형 증가 → 응력 증가 (변형경화=소성경화=가공경화) :  $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} > 0$
- Strain softening : 소성변형 증가 → 응력 감소 (변형연화=소성연화=가공연화) :  $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} < 0$

### ■ 전단시험별 비교

#### ▶ 직접전단

- 시험 : 3개 이상 데이터로  $\tau$ 측정
- C,  $\phi$  :  $\tau, \sigma$  그래프에서
- 특징 : 모든 흙/구속크며 전단한정/ 배수조절 곤란/ 조각이 simple

#### ▶ 1축압축

- 시험 : 1축과피
- C,  $\phi$  :  $c = \frac{q_u}{2}$ ,  $\phi$ 는 못구함.
- 특징 : 자립점성토만/조작간단

#### ▶ 3축압축

- 시험 : 3개이상 데이터
- C,  $\phi$  :  $\tau, \sigma$  그래프에서
- 특징 : 모든흙/가장 이상적/조작난해

### ■ 전응력과 유효응력

▶ 전응력 :  $\sigma_z = \gamma_t \cdot z = \bar{\sigma} + u$

▶ 간극수압=중립응력= $u$

-  $S_r = 100\%$  :  $u = \gamma_w h$

-  $0 < S_r < 100\%$  :  $u = \gamma_w h S_r$

▶ 수평응력과 수직응력

- Vertical :  $\sigma_v = \gamma h$

- Horizontal :  $\sigma_h = K\sigma_v$

▶ 투수시의 유효응력

- 상향 흐름 : 흙이 받는 부분 ↓ → 수압 ↑ case → 고체로서의 성질보다 액체로서의 성질 커짐

- 유효응력=0인 case : 안정성 저하 → 분사 or 보일링 현상, 파이핑현상

- 분사현상 : loose sand나 silt에서 잘 일어난다.

### ■ Seepage force

#### ▶ 정의

- 물이 흐르면 → 추가적 힘을 가한다 →  $iz\gamma_w A$ 만큼 → 힘의 방향은? → 물의 흐름방향과 equal. → 애를 침투력이라고 함.

#### ▶ Case

- 침투 → 임의 점에서 유효응력이 ↑ ↓ → 단위체적당 침투력  $i\gamma_w$

- 상향침투시 → 유효응력이  $iz\gamma_w A$ 만큼 ↓

- 하향침투시 → 유효응력이  $iz\gamma_w A$ 만큼 ↑

#### ▶ 이용

- 수리구조물 하류측에서 발생하는 용기(히빙)에 대한 안전을 구할 때 사용.

- 침투력이 크면 수두차에 의해 boiling이 발생되어 굴착지면의 수동토압감소, 토립자 유실

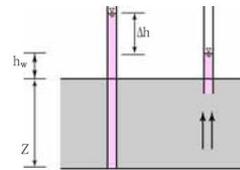
- 배면침하로 유해하므로 차수주입 등의 적절한 대책이 필요함.

▶ 침투압 : 상향의 흐름이 발생하게 되면 유효응력이 변화

$$\sigma = h_w \gamma_w + Z\gamma_{sat}$$

$$u = h_w \gamma_w + Z\gamma_w + \Delta h\gamma_w$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u = Z\gamma_{sub} - \Delta h\gamma_w$$



- 유효응력 식에서  $\Delta h\gamma_w$ 를 침투압이라 함.

▶ 침투력 : 침투압은 단면적당 작용하는 압력이며 침투력은 체적에 대한 침투힘의 크기임.

### ■ 지중응력 증가량

▶ 개요 : 하중작용 → 지반내 응력 유발 → 탄성론으로 해석 → 실제와 차이 but 계산치가 비교적 잘 맞음.

▶ 집중하중에 의한 지중응력 : Boussinesq의 이론 → 무한지표상의 집중하중의 문제 해석 (1883년, by 탄성론)

▶ Boussinesq의 이론

- A점에서의 법선응력

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{z^2} I = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{R^5}$$

- 영향계수  $I = \frac{3z^5}{2\pi R^5}$ ,  $R = \sqrt{r^2 + z^2}$

- 하중작용점 직하에서  $I = \frac{3}{2\pi} = 0.4775$

- 특징 : ① 변형계수가 무시 ② 지반을 → 균질, 등방성, 반 무한 탄성체로 가정 (자중 무시) ③  $\Delta\sigma_z$ 는 프와송비에 무관 → 측정치와 계산치가 잘 맞음.

▶ 선하중에 의한 응력증가량

-  $\Delta\sigma_z = qI_z$ ,  $I_z$ 는 영향계수

-  $I_z = \frac{1}{\pi} [\beta + \sin\beta \cos(\beta + 2\delta)]$

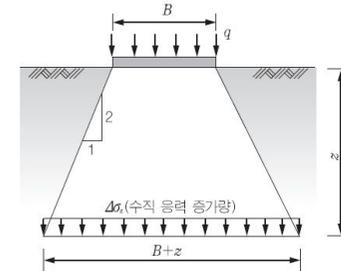
▶ 2:1 약산법 :

- 선하중 : 폭이 B이고 단위면적당 하중이 q인 때 하중이 작용하는 경우, 하중의 영향범위는 깊이가 깊어질수록 2:1로 증가한다. 깊이 z에서의 하중의 영향범위 B'는 다음과 같다.

$$B' = B + 2(0.5z) = B + z$$

수직응력의 증가량은 하중의 영향이 넓어진 폭에 비례하여 감소된다고 가정하여 다음과 같다.

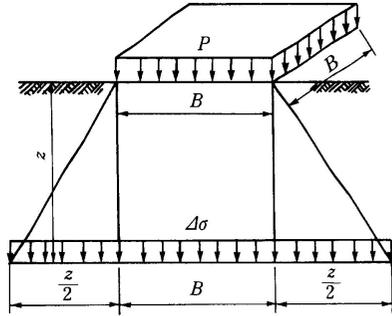
$$\Delta\sigma_z = \frac{qB}{B+z}$$



▶ 사각형 하중 : 약산법 및 Kogler 간편법

-  $P = qBL = \Delta\sigma_z (B+z) \cdot (L+z)$

-  $\Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)(L+z)} = \frac{qBL}{(B+z)(L+z)}$



## SHANSEP

### ▶ 개요

- 비배수전단강도 → 지반상 안정해석을 위한 가장 중요한 설계정수 → 베인시험, 콘관입 등의 필드테스트와 더불어 1축, 3축압축, 직접전단 이용

-  $q_u \rightarrow \frac{q_u}{2}$ 의 평균치는 전 파괴지역의 파괴면에 대한 비배수전단강도를 잘 대변 + 공학적으로 간단, 코스트 저렴 but → 시험자의 숙련도에 좌우(샘플링부터 시료처리)

- 1축시험 자체가 잔류응력으로 인한 불안정한 구속압 하에서 이루어지므로 교란에 대단히 민감 → 비배수전단강도가 과소평가되는 경향이 있으며 → 이로 인해 안전한 설계는 가능하지만 과다시공이 된다.

- 산썰(shansep)=현장압밀 조건과 같게 압밀, 현장 수직응력의 1/2~2/3정도로 등방압밀 시킨 후 시험, 교란 영향을 제거한 방법

### ▶ SHANSEP Method

- 연약점토의 안정해석 : MIT에서 개발

- Stress History And normalized Soil Engineering Properties의 약어 → 정규화된 거동을 보이는 점토에 사용하는 설계법 제공

- 실내시험보다는 원위치 조건에 더 유사한 조건을 재현할 수 있도록 하는 실내시험법에 근거

- 흙의 이전응력을 일관성있게 고려하며 → 특히 과압밀에서 효과적

- 응력경로의 사용으로 적용응력의 결과와 그 영향 설명

### ▶ 정규화된 토질 파라미터

- 전단강도 같은 토질 파라미터는 동일한 단위의 어떤 또 다른 값에 대한 비로서 표현 → 무차원화 할 수 있다 (정규화)

- -3개의 곡선은 실제로 하나의 곡선으로 나타낼 수 있는데 → 정규화

- 정규화된 파라미터 중 산만한 것도 있지만, 만약 10% 이내에 존재한다면 만족할 만함.

▶ SHANSEP의 원리와 실험방법 : Shansep의 기본적 목적은 점토의 OCR결정

- 비배수전단강도 구하는 법 : 압/직/오/수 (시료압밀/직접전단시험/OCR/Su)

## 흙의 응력-변형 관계

### ▶ 개념

- 탄성범위 내에서 응력-변형관계 규정하는 계수

- 재료역학 측면에서는 탄성계수로, 지반은 다소 비탄성이므로 변형계수로 표현됨이 타당.

- 지반은 완전탄성체가 아니므로 보통 할선 탄성계수를 적용함.



▶ 종류 : **전체구형인동**(전단/체적/구속/정/회복/동)

### ▶ 정탄성계수

- 시험방법 : **13평공표콘** (1축, 3축, PBT, 공내재하, 표준관입, 콘관입시험)

- 특징 : ① 정하중에 대한 응력-변형관계 ② 실내시험은 시료 교란으로 과소평가되기 쉬우며 가급적 현장시험의 적용이 요망됨.

### ▶ 체적탄성계수

- 시험 : 등방압축시험

- 특징 : 등방압축 상태에서 응력-변위관계로 체적변형을 타나냄

### ▶ 구속탄성계수

- 시험 : 압밀시험

- 특징 : 횡방향 구속상태 조건의 변형계수

### ▶ 동탄성계수

- 시험 : **반공크로스다운인홀** (반복삼축, 공진주시험, Down hole, Cross hole, In hole시험)

- 특징 : 동하중에 대한 응력-변형관계

### ▶ 회복탄성계수

- 시험 : 회복탄성계수시험

- 특징 : 포장의 내구성평가, 설계적용

### ▶ 전단탄성계수

- 시험 : 동탄성계수와 같음

- 특징 : 변형률에 따라 비선형(non-linear)관계를 나타내므로 변형률에 따른 시험이 요망됨

### ▶ 평가

- 변형(탄성)계수는 응력조건, 현장구속 등에 따른 시험을 적용해야 함.

- 일축시험 결과는 너무 보수적

- 최근 강조되는 내진검토의 변형률 고려한 전단탄성계수가 적용 요망.

## K<sub>f</sub>선과 모어-쿨롱의 파괴포락선

### ▶ 개요

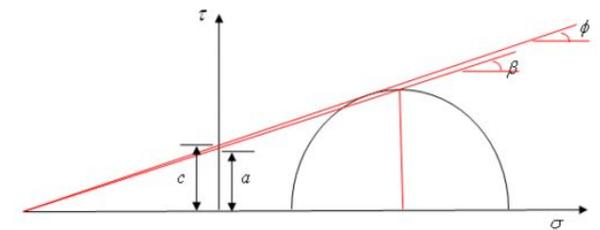
- p-q 공간의 kf선과 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 상관관계

- Mohr-Coulomb 포락선 : 여러개의 Mohr원으로부터 공통된 접선을 그은 파괴선

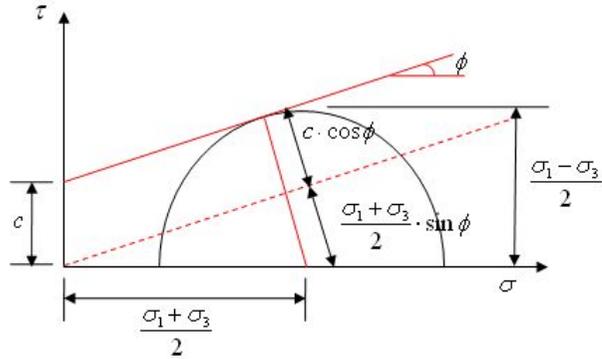
- 수정파괴 포락선(Modified Failure Envelope) : p-q응력경로의 좌표에 해당하는 점, 즉 Mohr원의 정점을 이은 파괴선

### ▶ 두 파괴 포락선의 관계

- 착안점 : Mohr원 중심에서 접선까지 거리, 정점까지의 거리가 같다.

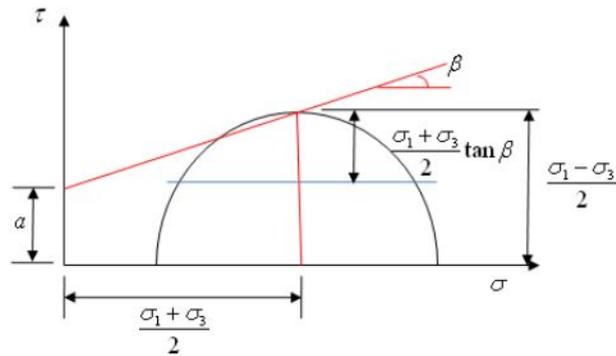


▶ 파괴포락선



$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cdot \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi$$

▶ 수정 파괴 포락선



$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = a + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tan \beta$$

착안점은 두 가지 케이스 모두 반지름이 같다는 점이므로

$$c \cdot \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi = a + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tan \beta$$

$$c \cdot \cos \phi = a \text{ 이므로}$$

$$\sin \phi = \tan \beta$$

■ 전단파괴 기준

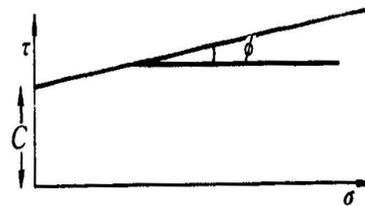
▶ Mohr-Coulomb의 파괴기준 : 흙의 응력이 파괴선 아래에 있는 경우는 파괴되지 않으나 파괴선에 닿는 순간 파괴가 되고 plastic flow가 된다.

▶ Hvorslev의 파괴기준

- 유효마찰력, 유효점착력 개념으로 이론 전개

$$\tau = C_e + \sigma \tan \phi_e$$

▶ Mohr-Coulomb의 파괴 포락선

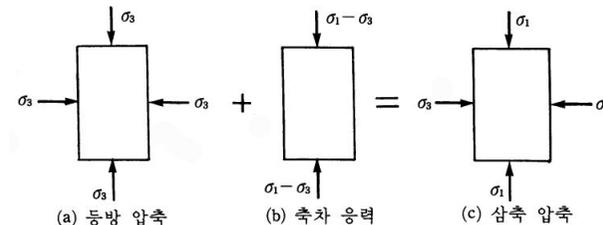


▶ Hvorslev 파괴기준평가 : 같은 함수비 조건에 대한 강도이므로 고유한 값으로 평가됨, 파괴시 유효응력과 파괴면의 간극비 또는 함수비를 알아야하므로 실용적이지 못함.

■ 삼축압축시험

▶ 개요

응력조건과 배수조건을 임의로 조절할 수 있어서 실제 현장의 응력상태나 배수상태를 재현하여 시행할 수 있다. 더 자세히 살펴 보면 삼축압축시험을 통해 지반의 구속압력을 재현하고, 주어진 구속압력하에서 수직방향의 하중을 재하하여 전단강도를 측정



▶ 비압밀비배수(UU test)

1) 조건

- ① 압밀단계 비배수(강도증가 없음), 전단단계 비배수인 조건

② 과잉간극수압이 발생

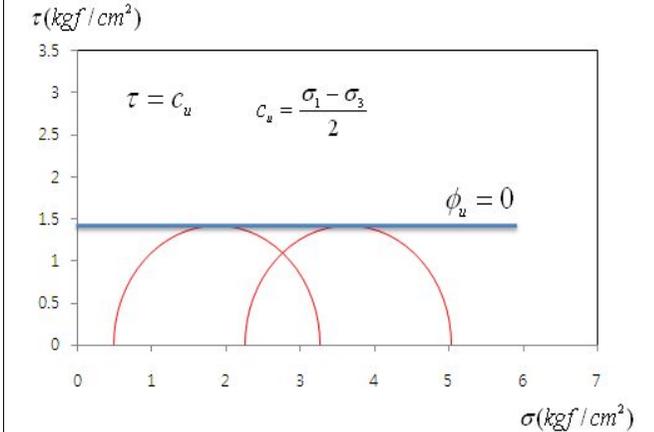
2) 시험방법

- ① 트리밍→멤브레인→액압제하→축방향 압축→구속압을 변화시켜 앞의 전 과정을 3~4회 반복

3) 모어응력원

- ① 포화점토에 대해 모어원을 그려보면 내부마찰각이 0이고 점착력만 존재하므로 전단강도=점착력인 평행한 원이 그려진다.

- ② 따라서 압밀에 의한 전단강도 증가가 무시된 케이스이다. 실제로는 압밀에 의해 전단강도 증가가 수반되므로 자연상태에서 이와 가장 유사한 상태가 단기안정점토인 것이다.



4) 적용

- ① 압밀에 의한 전단강도 증가를 무시하는 경우
- ② 제방이나 기초의 초기안정 검토
- ③ 점토의 굴착직후 안정검토
- ④ 댐시공 직후의 안정검토
- ⑤ 공학적 작용은 거의 일축압축시험과 동일하다고 보아도 무방하다. 즉, 과압밀 정도가 그다지 크지 않은 경우나 파일주변 마찰력 산정에 사용되는 부착력의 추정 등에 이용된다.

▶ 압밀비배수(CU test)

1) 조건

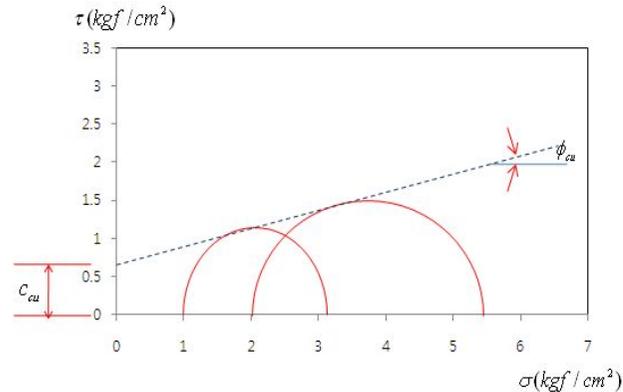
- ① 압밀단계 배수허용, 전단단계 비배수인 조건
- ② 역시 과잉간극수압이 발생하는 조건으로
- ③ 압밀단계에서 배수를 허용한다는 의미는 강도증가를 고려하겠다는 의미로 이해해야 한다.

2) 시험방법

① 트리밍→멤브레인→압력실 조립 후 간극수압계를 연결한다. (압밀단계에서 배수를 허용할 것이므로 필요한 절차이다. 단, 전단단계에서는 배수를 허용하지 않음을 착각하지 말 것)→액압의 재하→압밀과정(이 과정은 UU test에서는 존재하지 않는 과정)→축방향 압축

3) 모어응력원

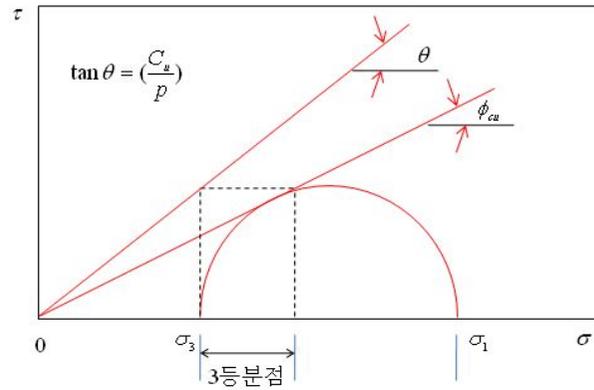
- ① 압밀단계에서만 배수를 허용하였으므로 당연히 강도증가가 일어나므로 내부마찰각이 측정된다.
- ② 이 때의 전단저항각은  $\phi_{cu}$ , 점착력은  $c_{cu}$  라고 표시한다.
- ③ 전응력 :  $\tau = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$
- ④ 유효응력 :  $\tau = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$



4) 적용

- ① 현장조건으로는 배수가 초기에 허용되거나 압밀이 어느 정도 진행된 상태에 해당한다.
- ② 단계별 성토공법에 적용
- ③ 댐의 수위 급강하시 (댐은 축조 직후에는 단기 안정해석의 경우이므로 UU시험에 의해 해석하는 것이 원칙이며, 만수위시 가장 안정하다. 만수위에서 수위가 급강하할 경우에는 이미 압밀이 진행된 경우이므로 CU시험을 이용한다).
- ④ 점토 절취사면의 장기안정 해석
- ⑤ 지반개량에 필요한 강도증가율( $\frac{c_u}{p}$ )값을 다음과 같이 구하며, CD시험의 대응으로 사용한다. (CU시험)

$$\frac{c_u}{p} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left( \frac{\sin \phi_{cu}}{1 - \sin \phi_{cu}} \right)$$



▶ CD시험

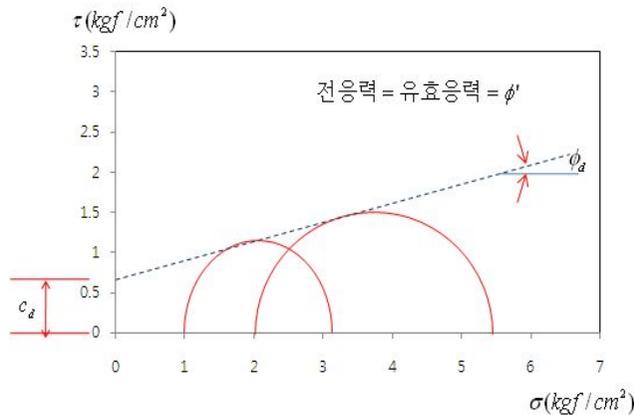
1) 조건

- ① 압밀단계에서 배수를 하므로 강도증가가 수반된다.
- ② 압밀단계 및 전단단계에서 모두 배수를 허용하는 시스템이므로 당연히 과잉간극수압은 발생하지 않는다.
- ③ 장기안정해석용

2) 시험방법

CU시험과 동일한 방법으로 실시하나 간극수압의 변화가 0이고 전단과정 중에 배수를 허용하므로 체적변화를 측정한다.

3) 모어의 응력원



① 전단시 배수를 허용하여 간극수압이 발생하지 않으므로 전

응력은 곧 유효응력과 같다.

②  $\phi_d, c_d$ 를 측정한다.

4) 적용

- ① 균열성 점토 (압밀팽창조건)
- ② 심한 과압밀점토의 장기압정 (압밀팽창)
- ③ 소요시간이 길고, 진행성 파괴가 일어나므로 CU시험으로 대체한다.
- ④ CU시험과 CD시험의 결과는 근사적으로 같다는 것이 경험적으로 입증되었다. 지반 구조물내의 간극수압을 알고 있다면 이들의 강도정수를 사용하여 토압지지력의 계산 및 안정해석을 할 수 있다.
- ⑤ 배수조건에서는 흙의 변형 속도가 공극수의 이동속도와외 관계로 정해지므로 실제 흙의 문제에서는 투수성이 큰 사질토 지반의 안정문제와
- ⑥ 성토의 완속시공 등과 같이 재하가 서서히 행해지는 경우에 이용한다.

▶ CD시험을 하지 않는 이유

- ① 점토는 투수계수가 대단히 작아서 쉽사리 과잉간극수압이 발생한다. 과잉간극수압이 발생한다는 의미는 물이 빠져 나가기 어렵다는 얘기와 동의어라고 생각하시면 된다.
- ② 장시간이 소요되어 실무적으로 큰 의미가 없으므로
- ③ 압밀비배수 시험은 어지간한 경우가 아니면 실시하지 않는 것이다.

■  $\phi = 0$  해석법

▶ 정의

포화된 점토의 UU시험에서  $\phi = 0, C_u = S_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 이다.

여기서, 비배수조건에 대한 전단강도  $S_u$ 를 비배수 전단강도 또는 비배수 강도라고 한다. 이 결과를 이용해 토질구조물의 안정을 해석하는 방법을  $\phi = 0$ 해석(Skempton)이라고 하며, 이 방법은 pore pressure가 빠져나가는 속도보다 더 빨리 시공하는 경우, 점성토 지반에 제방을 축조하거나 기초를 설치할 경우 등에 대한 안정해석에 사용된다.

▶  $\phi = 0$  해석법의 적용

- ① 비배수 강도로 안정해석

- ② 비배수 → 재하속도 > 물이 빠져나오는 속도 → 과잉간극수압 발생
  - ③ UU test의 일종
  - ④ 유효응력으로 표시한 경우 → Mohr circle이 하나
  - ⑤ 시공직후의 안정해석에 적용
  - ▶ Back Pressure(배압)
  - ① 불포화토를 원래의 포화상태로 만들기 위해 가해 주는 수압
  - ② 포화도 → 불포화도
- 보통 해석에 사용할 흙의 전단강도는 Vane 전단시험이나 1축압축 시험 등과 같은 비배수 전단시험 등에 의해서 구해진다.

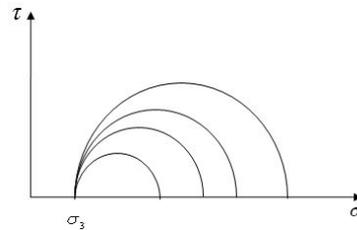
### Stress Path

- ▶ 정의
- ① 지반내 임의 한 점에 작용해 온 하중의 변화과정을 응력평면상에 도시한 것. → Mohr circle에 토립자의 요소가 받는 응력상태 표시 →  $\tau_{max}$  정점의 좌표인 (p,q)점의 궤적을 의미한다.

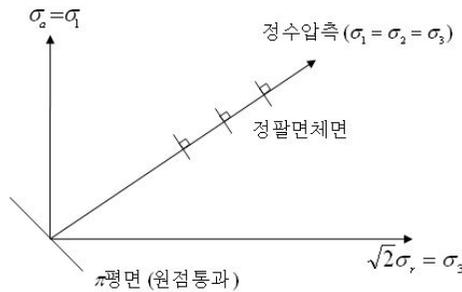
$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

- ② 공사 전, 공사 중, 공사 후의 응력상태의 변화 파악
- ③ 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)로 표시할 수 있다.
- ▶ 전단시험에 이용되는 배수조건
- (1) 재하직후
- 하중증가 → 과잉간극수압 발생
- ① 현장조건 : 압밀 부진 → 증가하중은 모두 과잉간극수압 → 전단강도 그대로 (가장 위험)
- ② 실내시험 시뮬레이션 : 압밀 × and 배수 × → UU 시험
- (2) 단계적인 재하
- 1단계 성토 → 압밀종료 → 강도 증가
- ① 현장조건 : 압밀이 어느 정도 진행
- ② 실내시험 : 압밀 후 배수를 허용하지 않는다 → CU시험
- (3) 재하 후 장시간 경과
- 압밀 진행 → 증가 하중이 유효응력으로 토립자간 전달
- ① 현장조건 : 압밀진행 및 유효응력 작용
- ② 실내시험 : CD시험
- ▶ 응력경로의 표시
- (1) Vector curve

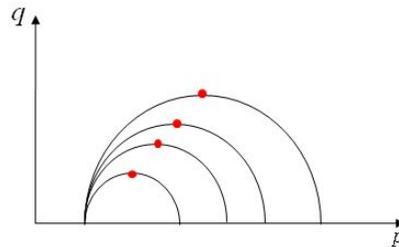
$\tau$ - $\sigma$ 평면에 응력의 경로를 표시하는 방법



(2) Rendulic 응력경로



(3) MIT 응력경로



(4) t-s 응력경로(=Cambridge 응력경로)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

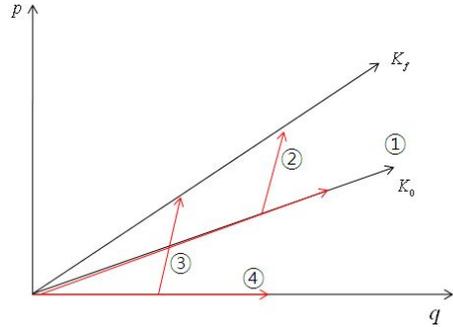
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

▶ 응력경로의 활용

- 1) 강도정수  $c, \phi$  산정
- 2) 간극수압의 크기 파악
- $TSP - ESP = u$
- 3) 전단파괴 예측 가능

▶ 시험종류별 응력경로

	isotropic compression	oedometer
basic conditions	$\sigma_1 = \sigma_3$	no horizontal movement
type of deformation	volumetric	primary volumetric but some distortion
uses	for study of purely volumetric strains	very simple approximates certain field conditions
	triaxial compression	direct shear
basic conditions	$\Delta \sigma_a$ $\sigma_c$ constant as $\Delta \sigma_a$ applied	$N$ constant as $T$ applied
type of deformation	distortion and volumetric	primary distortion but some volumetric
uses	most common test for studying stress-strain and strength properties	simple test for measuring strength



<시험방법별 응력경로>

1) Ko 압밀시험

- ① Ko 압밀시험의 응력경로는  $K_{otj}$ 를 따라 완전선형으로 응력경로가 이동한다.
- ② 이 방법은 전단파괴를 일으키는 방법이 아니므로 파괴포락선으로 응력경로가 이동하지 않는다.

2) 직접전단시험

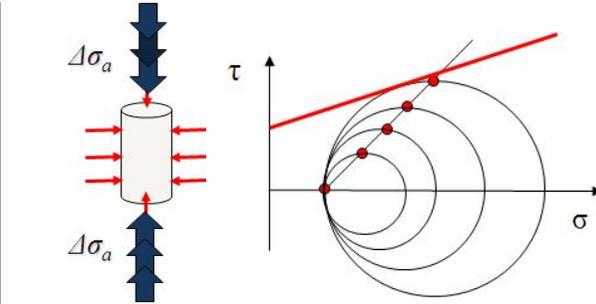
- ① 하중 재하 초기에는 전단응력이 수직응력에 비례해서 점점 커지며
- ② 더 이상 하중을 견디지 못하면 그림 ②와 같이 파괴포락선으로 경로가 이동하게 된다.

3) 삼축압축시험

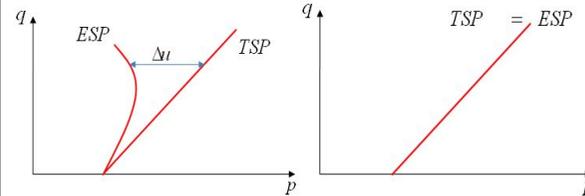
- ① 축차응력이 더 크므로 공시체의 체적변화는 팽방향으로 팽창하며 종방향으로 감소하게 된다.
- ② 액압이 작용하는 동안은 등방압축이므로  $K_1$  라인 즉,  $q$ 좌표를 따라 이동한다. 다시 말해, 모어씨클에서 최대주응력과 최소주응력의 크기가 같으므로 전단응력에 해당하는 반지름이 생기지 않는다는 의미이다. 따라서 전단응력이 전혀 발생하지 않는다.
- ③ 이 단계를 넘어 축차응력이 작용하게 되면  $K_f$  선으로 응력경로가 이동하며 공시체가 전단파괴를 일으키게 된다.

4) 등방압축

- ① 액압을 일정하게 가하면 전단응력이 발생하지 않고
- ②  $q$ 라인( $K_1$  라인) 위에 응력경로가 오버랩된다.
- ▶ 응력경로의 작성



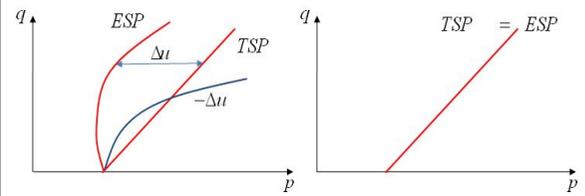
(1) NC clay



<비배수 조건>

<배수조건>

(2) OC Clay



<비배수조건>

<배수조건>

■ 한계상태 이론

▶ 개요

- ① 한계상태 이론은 압밀과 전단의 통합이론이다.
- ② 기존의 Mohr-Coulomb 파괴기준은 파괴에 관심이 있어 파괴에 이르는 동안의 변형은 고려되지 못함
- ③ 한계상태(Critical State)는 응력변화나 체적변화 없이 무한히 변형만 되는 이상적 상태로 정의됨
- ④ 한계상태 개념은 배수 또는 비배수 조건에서 전단되는 동안 응력과 비체적( $V = 1 + e$ )관계를 나타내는 것으로 전단과 압

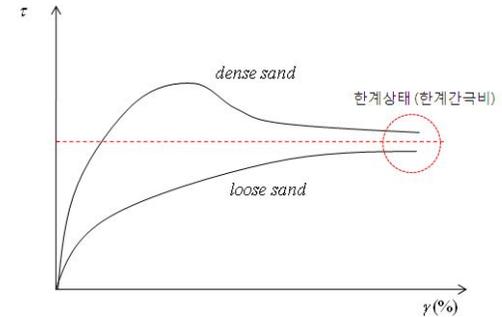
밀을 통합한 이론임

⑤ 이를 바탕으로 한 파괴기준이 Cam-clay Model이고 해당 Program은 CRISP임

▶ 한계상태

(1) 정의

전단시 응력 변화와 체적 변화 없이 무한한 변위를 수반하는 상태



(2) 특징

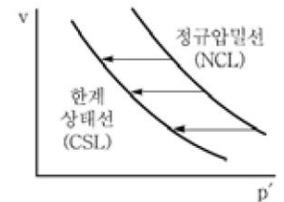
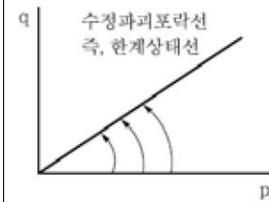
- ① 축차응력 일정상태에서 축변형률( $\epsilon_0$ )은 증가
- ②  $dV = 0$  (체적변형률 증분)
- ③ 고유값이 아니며, 응력-변형률 레벨에 따른 함수

(3) 한계상태선

- ① ( $p, q, e$ ) 응력공간에서 전단파괴시 흙의 응력상태가 최종적으로 이르는 점을 연결한 선
- ② 유효응력과 간극비의 관계가 유일한 하나의 성분

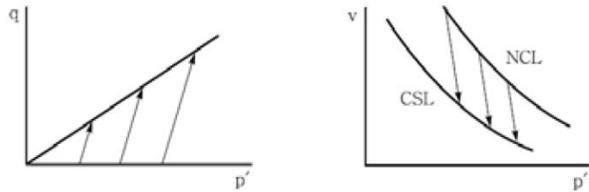
3. 정규압밀시험 응력경로

(1) 비배수시험

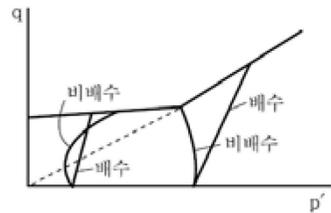


- ① 비배수삼축압축( CU시험)시 유효응력경로는 그림과 같이 전 응력에서 간극수압을 제외하면 왼쪽으로 도시됨
- ② 이는, 전단시 (+)간극수압이 발생되어  $\sigma = \sigma - u$ 가 되기 때문임
- ③ 또한, 정규압밀선에서 비배수시험이므로 체적변화가 없으므로 p - v 관계도에서 경로가 수평으로 됨

(2) 배수시험



- ① 배수 삼축압축시험 (CD시험)시 유효응력경로는 전응력경로와 같으므로 그림과 같이 표시됨
  - ② 이는 전단시 배수를 허용하므로 간극수압이 원칙적으로 발생되지 않기 때문임
  - ③ 또한, P. - v 관계도에서 압축의 체적변화(Dilatancy)가 발생되고 배수로 유효응력이 증가되므로 그림과 같이 표현됨
4. 과압밀점토 응력경로



- ① 심한 과압밀은 왼쪽, 약간 과압밀은 오른쪽에 응력경로가 도시됨
- ② 심한 과압밀의 경우 전단초기시 (+)간극수압발생, 변형 증가시 (-)간극수압발생으로 그림과 같이 나타남
- ③ 이는 Dilatancy로 전단초기시 압축, 변형증가시 팽창되기 때문임
- ④ 약간과압밀(OCR<2~2.5)은 체적압축성향으로 (+)간극수압이 발생되며 간극수압 크기는 정규압밀보다는 적음

5. 상태공간 좌표설명

(1) 상태경계면  
 흙에 허용 가능한 응력상태와 불가능한 응력상태가 구분되는 경계선과 경계면

(2) 정규압밀선(NCL : Normal Consolidation Line)  
 정규압밀 상태에 있게 되는  $P' - v$ 의 관계선으로  $P'$ 가 크면  $v$ 가 적고  $P'$ 가 적으면  $v$ 가 큼

(3) Roscoe면  
 체적항복이 일어나는 면으로 NC clay의 비배수 유효응력 경로

(4) Hvorslev면  
 파괴가 일어나는 면으로 OC clay의 파괴점들의 궤적

(5) 한계상태선(CSL : Critical State Line)  
 Roscoe 면과 Hvorslev 면의 경계선으로 정규압밀점토의 배수 및 비배수시의 파괴점 궤적

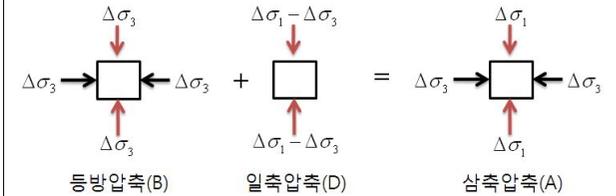
■ 간극수압계수

▶ 정의  
 점토질 지반에 압력이 작용하면 과잉간극수압이 발생한다. 간극수압계수라고 하는 것은 응력증가량에 대한 간극수압의 변화량의 비를 말한다. 수학적으로 표현하면  $\frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$ 가 되겠다. (Pore pressure parameter)

▶ 간극수압계수의 구분

- (1) A계수  
 CU test(압밀비배수) 3축 시험에서 전응력 증가량에 대한 간극수압 변화량의 비  $\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1}$
- (2) B계수  
 CU test에서 등방압축시의 구속응력 증가량에 대한 간극수압 변화량의 비로 등방압축시의 간극수압계수 or B계수라고 부른다.  $\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$ 로 표현한다.
- (3) D계수

1축압축 조건에서의 간극수압계수로  $D = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3}$ 로 표현한다.



▶ 간극수압계수의 산출

- ①  $\Delta u = B\Delta \sigma_3 + D(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) = B[\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$   
 $(A = \frac{D}{B})$
- ②  $S_r = 100\%$ 인 경우  $B = 1$ 이므로 (포화도 0%이면 B도 zero)

$$A = \frac{\Delta u - \Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3}$$

- ③ 구속압이 일정한 경우 ( $\Delta \sigma_3 = 0$ )에  $A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1}$

▶ 간극수압계수의 용도

- ① 압밀침하량 산정

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e} \log \frac{P_2}{P_1} H = \frac{C_c}{1+e} \log \frac{P_1 + \Delta u}{P_1} H$$

- ② 압밀상태 판단

■ 흙의 전단특성

▶ 개요

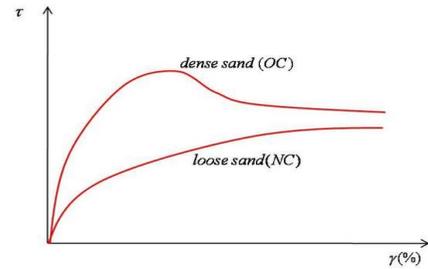
- 전단시 배수조건, 다일레이턴시에 의해서 과잉간극수압, 유효응력, 강도가 변화
- 사질토(조밀한, 느슨한), 점성토(과압밀, 정규압밀) → 조밀한 모래=OC, 느슨한 모래=NC와 매우 유사한 거동을 보이므로 다시 이 4개의 덩어리를 2개의 덩어리로 더욱 단순화 시켜 생각해 볼 수 있다.
- 조밀한 모래(OC)는 전단시 체적이 팽창하는 플러스 다일레이턴시에 해당하므로 비배수 조건에서 과잉간극수압은 (-)
- 반대로 느슨한 모래지반은 전단시 지반이 다져져서 공극이 줄어들므로 체적이 감소하는 네거티브 다일레이턴시를 일으

키프로 비배수시 과잉간극수압이 발생(바로 이것이 그 유명한 액상화=liquefaction의 발생 메커니즘)

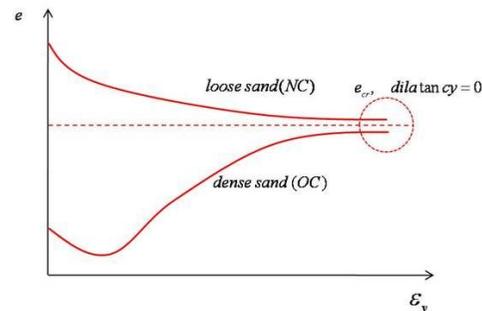
- ① OC는 (+) 다일레이턴시 → 팽창 → 비배수시 (-) U
- ② NC는 (-) 다일레이턴시 → 압축 → 비배수시 (+) U

▶ 전단특성

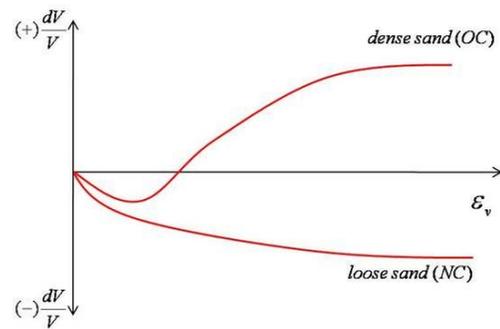
1) 전단응력-전단변형 관계



2) 간극비-변형률 관계



3) 체적변화율-변형률 관계

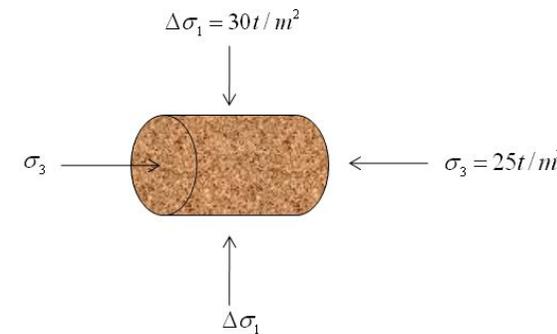


■ 전단시험별 적용 가능성

	직접전단	1축압축	3축압축
시험	가압판에 수직압력 가압 후 전단 → 3개 이상 데이터로 τ측정	실린더시료 1축 파괴	실린더시료 → 맨 브레인 → 축압을 가한 후 → 압축 파괴(3개 이상 데이터)
C, φ	τ, σ 그래프에서	C만 구해진다 → $c = \frac{q_u}{2}$	τ, σ 그래프에서
특징	- all types of soil - 구속크며 전단한정 - 배수조절 곤란 - 조작성 simple	- only 자립점성토에만 - 조작성간단	- all types of soil - 이론상 가장 좋다. - 조작성 어렵다.

■ 압밀비배수시험의 전응력해석 문제

정규압밀점토로 CU bar 시험을 실시했다. 시험결과 파괴상태가 다음 그림과 같고, 파괴시의 간극수압(u)이 5t/m<sup>2</sup>일 때 다음 물음에 답하라. 단, 전응력법으로 해석한다



- 1) 최대주응력과 최소주응력
  - 2) 주응력비(Kf)
  - 3) 수평파괴포락선에 대해 기울기(tanφ), 절편 b, 주응력비 Kf를 각각 구하시오.
  - 4) 파괴면의 각의 크기를 구하시오.
- 답>
- 1) 55t/m<sup>2</sup>, 25t/m<sup>2</sup>

- 2) Kf=0.45
- 3) ① 기울기  $\tan\phi=0.375$
- ② 절편 = 0
- ③ 주응력비 = 0.45
- 4) 파괴면의 각 56도

(1)  $\sigma_1 = \Delta\sigma_1 + \sigma_3 = 30 + 25 = 55t/m^2$   
 $\sigma_3 = 25t/m^2$

(2)  $K_f = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{25}{55} = 0.45$

(3) ① 기울기( $\tan\phi$ ) =  $\frac{\Delta q}{\Delta p} = \frac{15 - 0}{40 - 0} = 0.375$

$p = \frac{55 + 25}{2} = 40t/m^2$

$q = \frac{55 - 25}{2} = 15t/m^2$

② 절편=0 (정규압밀점토이므로)

③ 주응력비( $K_f = \frac{1 - \tan\phi}{1 + \tan\phi} = \frac{1 - 0.375}{1 + 0.375} = 0.45$ )

(4)  $\alpha = 45 + \frac{\phi'}{2} = 45 + 11 = 56^\circ$

$\phi' = \sin^{-1} \tan\phi = \sin^{-1} 0.375 = 22^\circ$

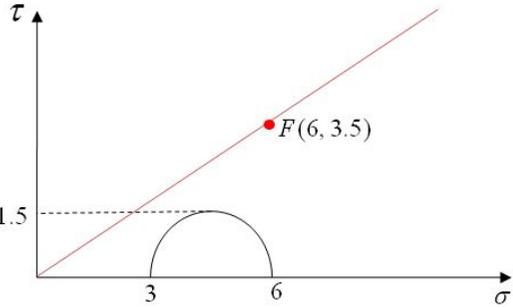
(여기서  $\phi'$  : 내부마찰각,  $\phi$  : 수평 파괴포락선의 기울기)

■ 직접전단시험 계산문제

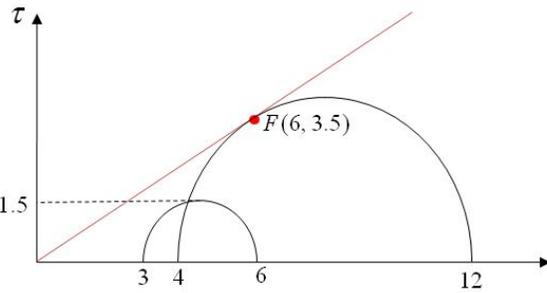
점착력이 없는 모래에 수직응력을 6.0t/m<sup>2</sup>를 주고, 이 때 주응력비 Ko=0.5인 상태로 직접전단시험을 실시했습니다. 그 결과 파괴시 전단저항응력이 3.5t/m<sup>2</sup>이다. 다음 물음에 답하시오.

- 1) 초기의 모어원과 파괴시 모어원을 그리고, 내부마찰각을 구하시오. (정수로 구하세요)
- 2) 파괴시 최대주응력 및 최소주응력을 구하시오.
- 3) 평면기점을 모어원상에 표시하시오.
- 4) 파괴시 최대 전단응력의 방향을 모어원상에 점선으로 표시하시오.

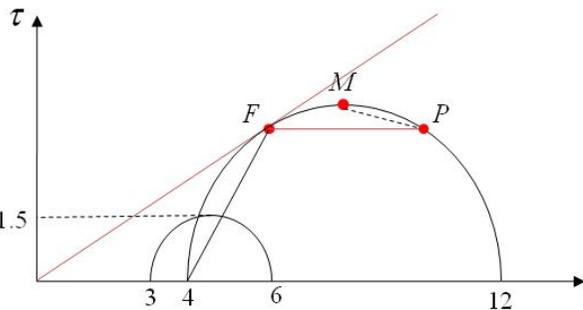
풀이)  
1)



2) 파괴시 최대주응력 및 최소주응력 각각  $12t/m^2$ ,  $4t/m^2$ 이



3) 평면기점이라고 하는 것은 다름이 아니라 모어원의 접점(파괴점)에서 수평선이 모어원과 만나는 점이 극점  
4)



### ■ 압밀의 응력경로 계산문제

▶ 문제

압밀하중이  $4t/m^2$ 에서  $8t/m^2$ 으로 증가하였다. 정지토압계수가 0.5인 경우 응력경로(TSP, ESP)를 각각 구하고 p-q, p'-q평면상에 응력경로를 플로팅하시오.

▶ 응력경로의 계산

(1) 개념

$4t/m^2$  단계에서 다음단계로 넘어간다는 의미는 과잉간극수압이 완전히 소산하였다는 의미이다. (공학적 의미와 출제자의 출제의도를 파악하는 것이 가장 중요) 따라서 압밀단계를 3개의 step으로 시뮬레이션하는 것이 가장 중요하다. 즉  $4t/m^2$  (end)  $\rightarrow 8t/m^2$  (start)  $\rightarrow 8t/m^2$  (end)의 3단계로 구성하여 다음과 같이 칸을 만든다. 그리고 이 칸을 하나씩 채워 가면 되는 것이다.

구분	$4t/m^2$ (end)	$8t/m^2$ (start)	$8t/m^2$ (end)
p			
p'			
q			

▶ Case 1 :  $4t/m^2$ (end)

- ① 먼저  $4t/m^2$ (end)에서는 과잉간극수압이 완전히 소산되었으므로 곧 전응력이 유효응력이라는 의미이다.
- ② 따라서 다음과 같은 미소응력 다이어그램을 생각해 볼 수 있다. (전응력=간극수압+유효응력)
- ③ 먼저 전응력이 곧 4(이하 단위생략)이므로 1번 요소의 수직 응력에 4라고 써준다. (수평응력은 아직 모름 : 여기서 전수직 응력에 정지토압계수를 곱하면 절대로 안된다. 간극수압이 포함된 개념이기 때문이다)
- ④ 간극수압이 완전히 소산된 상태이므로 간극수압=0이며, 동시에 물은 등방성이므로 수직응력이나 수직응력이 똑같이 작용한다. 따라서 2번 요소의 수평 수직방향 화살표 옆에 모두 0이라고 쓴다.
- ⑤ 간극수압이 0이므로 곧 전응력=유효응력이다. 그러므로  $\sigma_1 = 4$ ,  $\sigma_3 = 2$ .

$$\begin{array}{c} 4 \\ \downarrow \\ \sigma \leftarrow 2 = \begin{array}{c} 0 \\ \downarrow \\ u \leftarrow 0 \end{array} + \begin{array}{c} 4 \\ \downarrow \\ \sigma' \leftarrow 2 \end{array} \end{array}$$

$$\textcircled{6} p=p' = \frac{4+2}{2} = 3, q = \frac{4-2}{2} = 1$$

▶ Case 2 :  $8t/m^2$ (start)

$$\begin{array}{c} 4+4 \\ \downarrow \\ \sigma \leftarrow 6 = \begin{array}{c} 4 \\ \downarrow \\ u \leftarrow 4 \end{array} + \begin{array}{c} 4 \\ \downarrow \\ \sigma' \leftarrow 2 \end{array} \end{array}$$

- ① 여기서 주의할 것은 1번 요소의 수직하중에 8을 써주는 것이 아니라 기존 4에 4를 더해서 8이 되었다는 점이다. 즉 이 말의 공학적 암시는 곧 뭐냐고? 4를 더했으니 재하즉시 과잉간극수압이 4만큼 발생한다는 의미이다.
- ② 간극수압은 당연히 등방성이므로 수직, 수평 모두 4만큼의 압력이 가해질 것이며,
- ③ 8-4를 하면 유효응력의 수직성분이 4가 되며
- ④ 유효응력의 수평성분은  $K_0$ 를 곱해서 2가 된다.
- ⑤ 따라서 전응력의 수평압력은  $2+4=6 \rightarrow \sigma_1 = 8$ ,  $\sigma_3 = 6$ .

$$\textcircled{6} p = \frac{8+6}{2} = 7, p' = \frac{4+2}{2} = 3, q = \frac{8-6}{2} = 1$$

▶ Case 3 :  $8t/m^2$ (end)

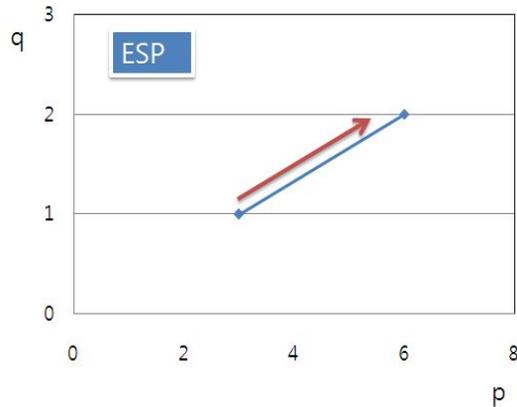
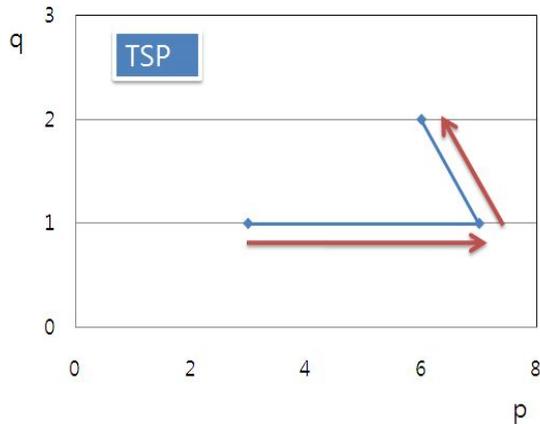
- ① 재하중의 종기에는 결국 과잉간극수압이 완전히 소산되므로 case 1과 마찬가지로 유효응력과 전응력이 같은 상태가 되어야 한다.

$$\begin{array}{c} 8 \\ \downarrow \\ \sigma \leftarrow 4 = \begin{array}{c} 0 \\ \downarrow \\ u \leftarrow 0 \end{array} + \begin{array}{c} 8 \\ \downarrow \\ \sigma' \leftarrow 4 \end{array} \end{array}$$

$$p = \frac{8+4}{2} = 6, p' = \frac{8+4}{2} = 6, q = \frac{8-4}{2} = 2$$

응력경로를 계산한 표는 다음과 같고, 플로팅한 TSP와 ESP는 각각 다음과 같다.

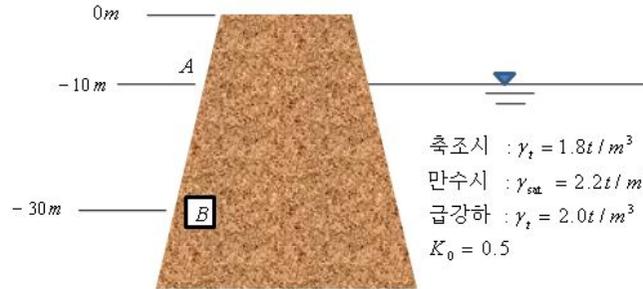
구분	$4t/m^2$ (end)	$8t/m^2$ (start)	$8t/m^2$ (end)
p	3	7	6
p'	3	3	6
q	1	1	2



■ Fill dam의 응력경로 계산문제

▶ 문제

그림과 같은 필댐을 축조하였다. 만수위시 A-line, 수위급강하시 B-line이라고 할 때 제체내 미소요소 B에 작용하는 유효응력, 전응력을 구하고 이를 토대로 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)를 구하시오.



▶ 응력경로의 계산

B점의 응력경로를 구하기 위해 댐 축조직후, 만수위시, 수위급강하시의 3가지 케이스로 구분하여 계산해야 한다.

구분	축조직후	만수위시	수위급강하시
p			
p'			
q			

▶ Case 1 : 축조직후

- ① 축조직후 미소요소 B에 작용하는 수직응력은  $1.8 \times 30 = 54t/m^2$
- ② 축조직후에는 물이 채워지지 않아서 간극수압이 존재하지 않으므로 전응력은 곧 유효응력이다. 따라서 수평방향응력은  $54 \times 0.5 = 27$ 이 된다.

③  $p = p' = \frac{54 + 27}{2} = 40.5$

④  $q = \frac{54 - 27}{2} = 13.5$

$$\begin{matrix} 54 \\ \downarrow \\ \sigma \end{matrix} \leftarrow 27 = \begin{matrix} 0 \\ \downarrow \\ u \end{matrix} \leftarrow 0 + \begin{matrix} 54 \\ \downarrow \\ \sigma' \end{matrix} \leftarrow 27$$

▶ Case 2 : 만수위시

- ① 만수조건에서 B점의 연직응력은  $1.8 \times 10 + 2.2 \times 20 = 62$
- ② 이 상황은 간극수압이 발생하는 상황이므로 간극수압을 고려해야 하며 간극수압은  $20t/m^2$ 이며 등방으로 작용한다.
- ③ 그러므로 연직유효응력 =  $62 - 20 = 42$ , 수평유효응력 =  $42 \times 0.5 = 21$

이 되며

④ 수평유효응력을 간극수압과 더한 것이 수평응력이 된다.  $21 + 20 = 41$

⑤  $p = \frac{62 + 41}{2} = 51.5$ ,  $p' = \frac{42 + 21}{2} = 31.5$ ,  $q = \frac{42 - 21}{2} = 10.5$

$$\begin{matrix} 62 \\ \downarrow \\ \sigma \end{matrix} \leftarrow 41 = \begin{matrix} 20 \\ \downarrow \\ u \end{matrix} \leftarrow 20 + \begin{matrix} 42 \\ \downarrow \\ \sigma' \end{matrix} \leftarrow 21$$

▶ Case 3 : 수위급강하시

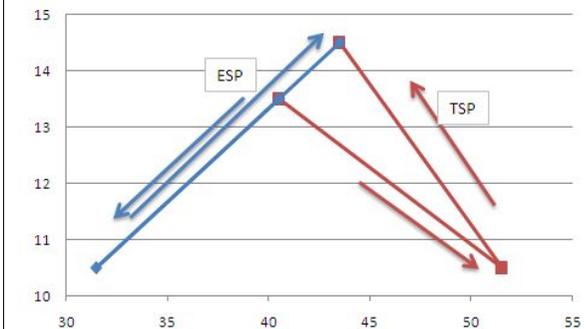
- ① 이 경우도 case1과 마찬가지로 간극수압이 발생하지 않으므로 전응력은 곧 유효응력이 된다.
- ② 이를 그림으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{matrix} 58 \\ \downarrow \\ \sigma \end{matrix} \leftarrow 29 = \begin{matrix} 0 \\ \downarrow \\ u \end{matrix} \leftarrow 0 + \begin{matrix} 58 \\ \downarrow \\ \sigma' \end{matrix} \leftarrow 29$$

③  $p = p' = \frac{58 + 29}{2} = 43.5$ ,  $q = \frac{58 - 29}{2} = 14.5$

응력경로를 계산한 표는 다음과 같고, 플로팅한 TSP와 ESP는 각각 다음과 같다.

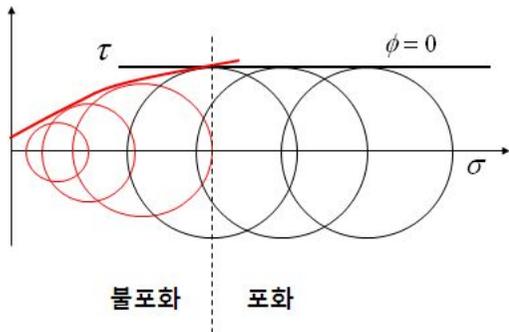
구분	축조직후	만수위시	수위급강하시
p	40.5	51.5	43.5
p'	40.5	31.5	43.5
q	13.5	10.5	14.5



### ■ 불포화토의 응력거동

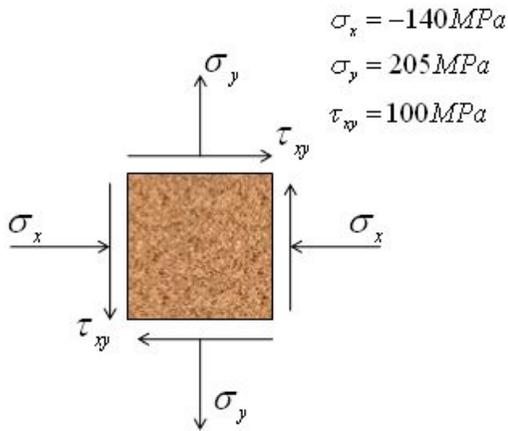
▶ 개요

불포화상태에서는 축응력의 증가로 체적변화가 발생하지요. 즉 유효응력이 증가한다는 것입니다. 그런데 계속적인 공극감소는 결국 포화상태에 도달한다는 것을 의미하는 것이며, 그 이후의 거동은 포화토와 같습니다. 따라서 다음과 같은 그래프를 그릴 수 있는 것입니다.



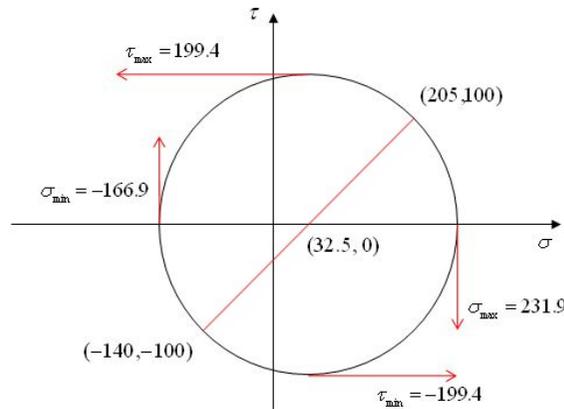
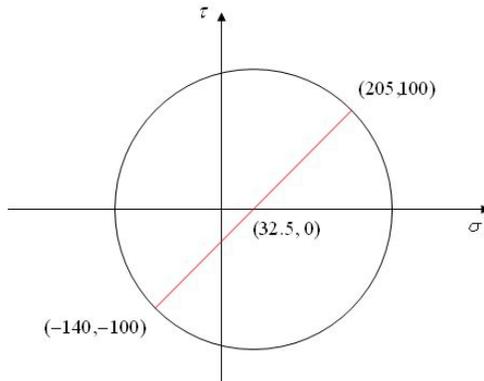
### ■ 모어원의 이해

다음 주어진 조건과 같은 미소평면에 작용하는 최대 주응력과 최대 전단응력을 구하시오. 단, 공식에 의하지 말고 반드시 모어원을 직접 작도하여 해를 구하시오



▶ 풀이

- step 1 :  $\sigma - \tau$  축을 잡는다.
- step 2 : 씨클의 센터를 구한다 씨클의 센터는 -140과 205의 절반이므로 32.5MPa이 되는군요.
- step 3 : 두 점의 좌표를 찍는다. (-140, -100) (205, 100)
- step 4 : 씨클의 다이아미터를 그려 줍니다...
- step 5 : step 3의 좌표를 공통으로 통과하는 원을 그린다.
- step 6 : 모어원의 반지름을 구한다.
- step 7 : 최대전단응력은 반지름이므로 199.4MPa, 최대주응력은 32.5MPa+199.4=231.9MPa이 된다.



### ■ 3축시험결과로 강도정수를 구하는 과정

▶ 문제

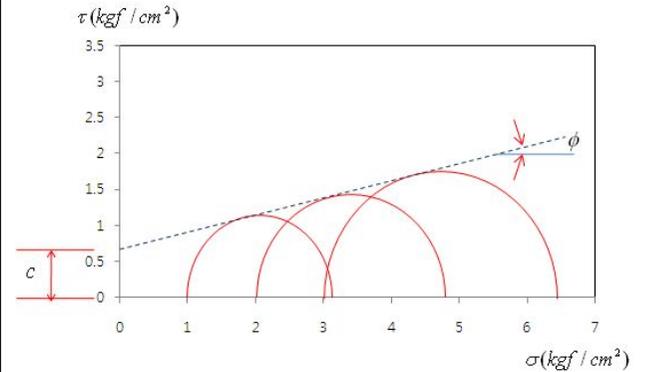
3축압축 시험을 하는데 축압을 변화시켜 가며 공시체 파괴시 최대 주응력을 구한 결과가 다음과 같다. 이 결과로부터 모어원을 그려 점착력 c와 전단저항각 φ를 구하여라.

축압 $\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.0	2.0	3.0
축차응력 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.20	2.8	3.4

▶ 풀이

- 측정결과 파괴시 주응력  $\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3$ 으로 구한다. 따라서 위 시험결과표를 가지고 축압과 최대주응력간의 표를 만든다.

축압	1.0	2.0	3.0
최대주응력	2.2+1.0=3.2	2.0+2.8=4.8	3.0+3.4=6.4



- 첫 번째 씨클의 pq 좌표

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{3.2 + 1.0}{2} = 2.1, \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{3.2 - 1.0}{2} = 1.1$$

- 세 번째 씨클의 pq 좌표

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{6.4 + 3.0}{2} = 4.7, \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{6.4 - 3.0}{2} = 1.7$$

$$- \tan \phi = \frac{\Delta q}{\Delta p} = \frac{1.7 - 1.1}{4.7 - 2.1} = \frac{0.6}{2.6}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{0.6}{2.6} = 13^\circ$$

$$- \tan \phi = \frac{1.1 - c}{2.1}, \quad 1.1 - c = 2.1 \tan 13^\circ$$

$$c = 1.1 - 2.1 \tan 13^\circ = 0.62 \text{ kgf/cm}^2$$

## 제 5 장 토압론 및 토류공

### ■ 토압의 종류

▶ 정지토압 ( $P_0$ ) : 변위가 없을 때의 토압(지하 구조물, 교대 구조물)에 작용하는 토압은 정지토압으로 본다.

- 정지토압계수 ( $K_0$ )

$$K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\sigma_x}{\gamma_t Z}, \therefore \sigma_x = K_0 \sigma_z = K_0 \gamma_t Z$$

- Jackey의 실험식에서는  $K_0 = 1 - \sin \phi$ 로 보고 삼축압축시험에서  $K_0 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ 으로 본다.

▶ 주동토압 ( $P_A$ ) : 벽체가 밖으로 변위가 생길 때의 토압, 이때는 면을 따라 흙이 가라앉고 경사가 급한 활동면을 이룬다.

▶ 수동토압 ( $P_p$ ) : 벽체 안쪽으로 변위가 생길 때의 토압, 이때는 면을 따라 흙이 부풀어 오르고 활동면의 경사는 완만하다.

### ■ 토압이론 및 적용대상

▶ 토압이론

- Coulomb (1773년) : 흙체기론으로 벽마찰각 고려

- Rankine (1856년) : 소성론에 의한 토압산출 (벽마찰각 무시)

- Bousinesq : 지반을 탄성체로 보고 토압을 산출

▶ 적용대상

- 옹벽 : 설계용으로는 주동토압을 취하지만 활동에 대한 안전 검토는 수동토압으로 한다.

- 지하벽 구조물, 교대 구조물 : 여기에 작용하는 토압은 정지토압으로 생각한다.

- 흙막이공, 널말뚝공 : 여기에 작용하는 토압은 토질조건에 따라서 제형분포나 삼각분포가 된다.

▶ 옹벽에 있어서 토압공식의 적용

- 중력식 및 반중력식 옹벽 : 저판의 후부에 돌출부가 없거나 작은 경우, 배면토는 소성 평형시에 벽면을 따라 슬라이딩하므로 벽마찰각을 고려한 쿨롱의 토압으로 생각한다.

- 역T형, 부벽식 옹벽 : 옹벽저판의 길이가 긴 경우, 소성평형 상태에서의 슬라이딩은 벽배면에 계속하여 생기지 않고 저판

위의 흙을 벽체의 일부로 보아 Rankine 토압을 적용한다.

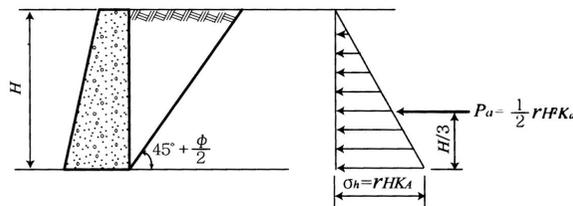
▶ Rankine과 Coulomb토압비교 : **이벽도적평** (이론근거, 벽마찰, 토압작용방향, 적용, 평가)

### ■ Rankine의 토압이론

▶ 기본가정 (**무균마비등평**)

- 흙은 비압축성이고 균질의 입자이다.
- 흙입자는 입자간 마찰력에 의해서만 평형유지
- 지표면은 무한히 넓게 존재한다.
- 지표에 하중이 있으면 등분포 하중이다.
- 토압은 지표면에 평행하게 작용한다.

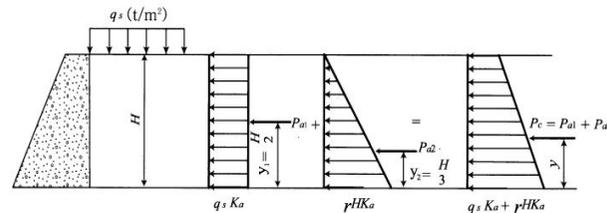
▶ 지표면이 수평이고  $C=0$ 인 경우



- 주동토압 :  $P_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_a$

- 수동토압 :  $P_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_p$

▶ 등분포 재하이고  $C=0, i=0$ 인 경우



- 주동토압 :  $P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a + q_s K_a H$

- 수동토압 :  $P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p + q_s K_p H$

- 주동토압이 작용하는 작용점 위치(y)

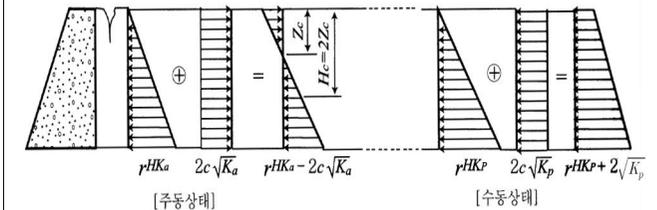
$$P_{a1} \cdot \frac{H}{2} + P_{a2} \cdot \frac{H}{3} = P_a \cdot y$$

$$y = \frac{P_{a1} \cdot \frac{H}{2} + P_{a2} \cdot \frac{H}{3}}{P_a}$$

▶ 점성토의 토압 ( $C \neq 0, i=0$ )

- 주동토압 :  $P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2CH \sqrt{K_a}$

- 수동토압 :  $P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p + 2CH \sqrt{K_p}$



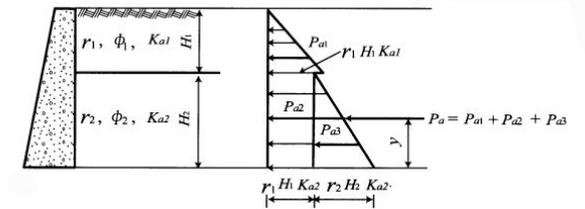
▶ 인장균열 (tension crack)의 깊이

$$\tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \gamma_t Z_c - 2C \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2}) = 0$$

$$Z_c = \frac{2C}{\gamma_t \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})} = \frac{2C}{\gamma_t} \sqrt{K_p} = \frac{2C}{\gamma_t} \times \frac{1}{\sqrt{K_a}}$$

▶ 한계고 (critical height) :  $H_c = 2Z_c$

▶ 뒤틀림재가 이질토층인 경우 ( $C=0, i=0$ )



- 주동토압 :

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_1 H_1^2 K_{a1} + \gamma_1 H_1 H_2 K_{a2} + \frac{1}{2} \gamma_2 H_2^2 K_{a2}$$

$$- \text{수동토압} : P_p = \frac{1}{2} \gamma_1 H_1^2 K_{p1} + \gamma_1 H_1 H_2 K_{p2} + \frac{1}{2} \gamma_2 H_2^2 K_{p2}$$

- 주동토압의 작용점 위치 (y)

$$P_{a1} \left( \frac{H_1}{3} + H_2 \right) + P_{a2} \cdot \frac{H_2}{2} + P_{a3} \cdot \frac{H_2}{3} = P_a \cdot y$$

$$y = \frac{P_{a1} \left( \frac{H_1}{3} + H_2 \right) + P_{a2} \cdot \frac{H_2}{2} + P_{a3} \cdot \frac{H_2}{3}}{P_a}$$

▶ 지하수위가 있는 경우

- 주동토압

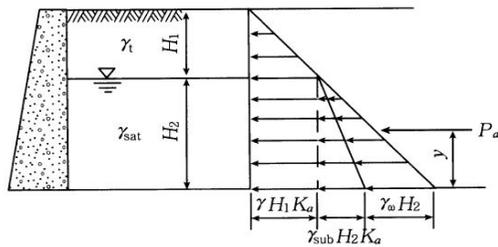
$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_t H_1^2 K_a + \gamma_t H_1 H_2 K_a + \frac{1}{2} \gamma_{sub} H_2^2 K_a + \frac{1}{2} \gamma_w H_2^2$$

- 수동토압

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_t H_1^2 K_p + \gamma_t H_1 H_2 K_p + \frac{1}{2} \gamma_{sub} H_2^2 K_p + \frac{1}{2} \gamma_w H_2^2$$

- 주동토압의 작용점 위치

$$y = \frac{P_{a1} \left( \frac{H_1}{3} + H_2 \right) + P_{a2} \cdot \frac{H_2}{2} + P_{a3} \cdot \frac{H_2}{3} + P_{a4} \cdot \frac{H_2}{3}}{P_a}$$



### ■ 흙막이 구조물의 탄소성 해석

▶ 탄성 : 가장 간단한 수치해석모델로 응력-변형관계를 직선화 함. but 지반문제는 변형이 크고 비선형 응력-변형형태이므로 별로 사용되지 않음.

▶ 소성

- 탄성과 소성을 변형에 따라 고려하는 해석모델로 지반해석문제에 많이 사용되고 있음.

- 탄성변형과 소성변형의 경계가 되는 항복점으로 정의되는 파괴기준과 소성변형증분을 계산할 수 있는 소성흐름법칙 필요.

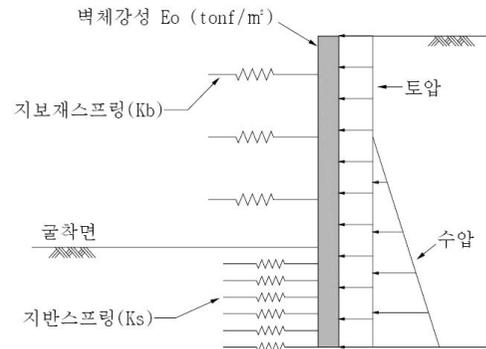
▶ 탄성법과 탄소성법 비교

- 응력과 변위관계 : 탄성과 탄소성으로 취급

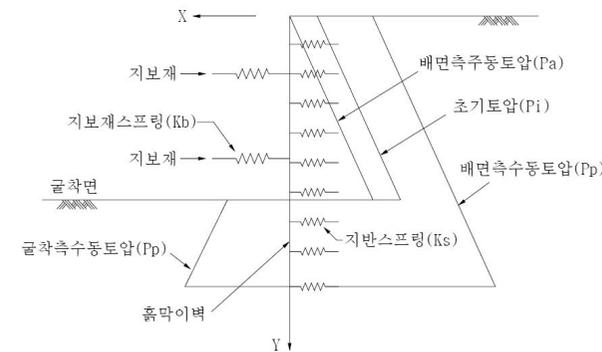
- 토압적용 : 탄성은 일회적으로 탄소성은 반복계산으로 구함.

- 소성고려 : 탄성은 소성 미고려로 토압초과 및 큰 변위의 고려가 곤란하고 탄소성은 가능.

▶ 탄성법에 의한 해석



▶ 소성법에 의한 해석



▶ 소성변위 고려하여 토압적용

### ■ 옹벽의 안정

▶ 내적인 안정조건

- 지반의 안정 : 세굴, 파이프로부터 안정할 것 → 압성토 공법 등

- 구조재료의 안정 : 균열, 철근부식, 성능저하 인자 → 피복 확보

▶ 외적인 안정조건

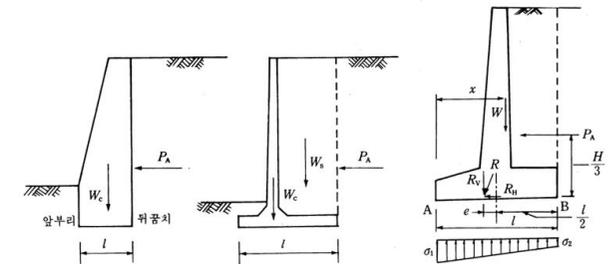
- Overturn(전도) : 안전율 2.0 이상 → 압성토로 수동토압 증가

- Sliding(활동) : 안전율 1.5 이상 → 전단보강key 설치

- Bearing(지지력) :  $q_{max} > q_a$  → 기초지반 보강

▶ 옹벽 구조물의 안정을 저해하는 인자

- 설계과정 : 기초지반 처리 불량, 옹벽의 안정해석상의 오류
- 재료상의 문제 : 옹벽구조물 자체의 콘크리트 재료 부실, 배면토사의 경량화 처리 미흡
- 시공상의 문제 : 배수시설 불량 시공, 필터의 클로킹 현상 → 간극수압 상승 → 토압 증가 → 옹벽의 부실화
- ▶ 외적안전검토



▶ 전도에 대한 안정

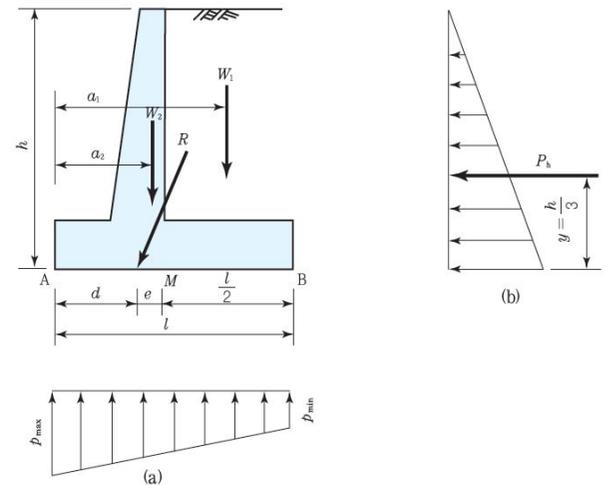
$$M_r \geq 2.0M_d, \quad W \cdot x \geq 2.0 \times P_A \times \frac{H}{3}$$

$$e = \frac{l}{2} - x, \quad e \text{는 } \frac{l}{6} \text{보다 작아야 한다.}$$

▶ 활동에 대한 안정

$$R_V \tan \delta \geq 1.5R_H$$

여기서,  $\delta$ 는 옹벽 저면과 흙과의 마찰력을 의미한다.



▶ 기초 지반의 지지력에 대한 안정

$$\sigma_1 = \frac{R_V}{l} \left(1 + \frac{6e}{l}\right) \quad (\sigma_1 = \sigma_{\max})$$

$$\sigma_2 = \frac{R_V}{l} \left(1 - \frac{6e}{l}\right) \quad (\sigma_2 = \sigma_{\min})$$

$$\text{안전율 } F_s = \frac{\sigma_a}{\sigma_{\max}} \geq 1$$

▶ 원호활동에 대한 안정 : 검토한 3가지 조건의 안정이 확인 되어도 옹벽이 연약지반상에 있거나 경사지에 있을 경우에는 옹벽 및 기초지반 전체를 포함하는 활동파괴에 대한 안정성을 검토하여야 한다.

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} \geq 1.5$$

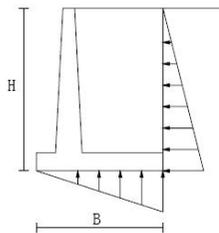
### ■ 옹벽 배수공의 중요성

▶ 배수원활한 경우 : 전체토압  $P_a = \frac{1}{2} \gamma_t K_a H^2$

▶ 비배수 경우

- 전체수평력 :  $P_a = \frac{1}{2} \gamma_{sub} K_a H^2 + \frac{1}{2} \gamma_w H^2$

- 저면상향력 :  $U = \frac{1}{2} \gamma_w HB$



- 비배수 형태가 되면 수평력이 크게 커질수 있음. 이는 토압 계수는 유효응력에 적용되며 물은 등방체이기 때문임.

- 또한, 상향력이 작용되어 전도, 활동 안전율이 크게 감소되어 불안정해지게 될수 있음.

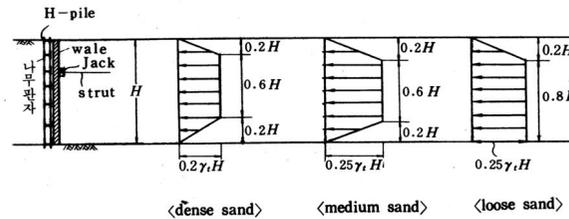
▶ 대책

- 설계기준과 같이(직경 65mm이상 배수공을 4.5m 간격이하로 설치. 단, 부벽식은 최소 부벽사이에 1개이상 설치) 배수공을 설치토록 함.

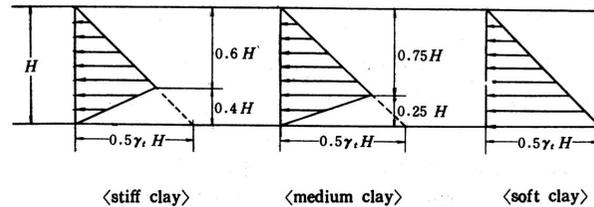
- 최근 지역적 집중호우에 의해 배수가 원활치 못한 경우 수압을 고려하는 방안이 적극적인 검토가 필요함.

### ■ 옹벽이공에 작용하는 토압분포

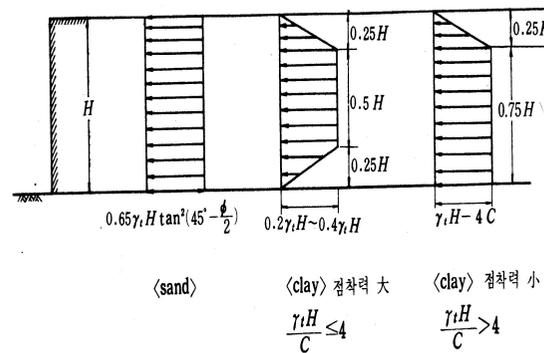
▶ Terzaghi-Peck의 토압분포



▶ Tschebotarioff의 토압분포



▶ Peck, R.B, Hanson의 토압분포



### ■ 지하연속벽 공법

▶ 지하연속벽, 지중연속벽, 슬러리월(slurry wall)=diaphragm wall, 주열식 벽체, 연속벽체, dam 차수벽, 침출수 차단벽

▶ 개요

- 지중연속벽은 벽체 구조에 따라 주열식 흙막이벽과 지하연속벽으로 구분된다.

- 주열식 → 원형의 현타파일을 연결하는 방법

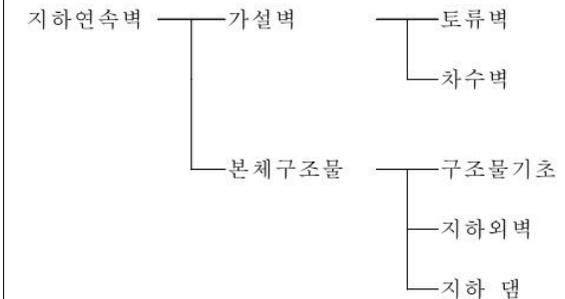
- 지하연속벽은 안정액으로 굴착면 붕괴를 막아서 → RC벽체를 설치하는 방법(담 기초, 내진벽, 진동차단벽으로서의 탁월한 효과)

- 슬러리월은 안정액을 이용 → 벽면의 붕괴 방지 → 트렌치 굴착 → 철근망 삽입 → 콘크리트 타설하여 철근콘크리트 벽 만들고 → 이 벽을 연결하여 지하벽을 축조하는 공법

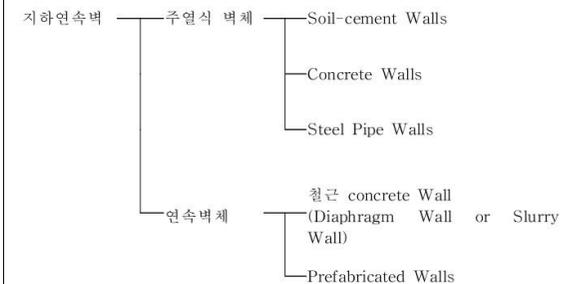
- H파일 or 시트파일 타설 → 건설공해(소음, 진동)

▶ 지하연속벽의 분류

- 용도에 의해



- 구조형식에 의해



▶ 주열식 벽체

- 철근, 철골 보강된 → 콘크리트 파일 월이 대부분

- CIP, PIP, MIP으로 구분

▶ 연속벽체 : 두께는 60cm, 80cm, 100cm이 일반적으로 시공.

▶ 지하연속벽 공법의 특징 : 다목적: 토류벽, 차수벽, 지하구조벽, 방호벽, 기초, 진동차단벽

- 적용 가능 구조물 : 건축구조의 지하실, 공동구, shield의 입갱, 지하주차장 및 지하상가, 지하탱크, 지하철, 지하도, dam 차수벽, 쓰레기 매립장 침출수 차단벽

▶ 슬러리월 공법의 특징

- 장점 : **저강사영도모** ① 저진동, 저소음 ② 벽체 강성 크며 ③ 차수효과 우수 ④ 공사중 주변 지반이나 구조물에 영향 없고 ⑤ top down 시공 등 도심지 고층건물 공사에 적극 이용 ⑥ 바레트기초 등과 같은 강체기초로 이용 ⑦ 어떠한 종류의 지질 지반에도 적용

- 단점 : **비계구멍오염** ① 지질별 시공법이 다양 ② 굴착공 붕괴로 시공속도를 늦게 하며 ③ 공사비가 높아서 선택에 주저 ④ 설계상 계산방법도 표준화된 것이 없고 ⑤ 오염된 안정액의 처리 문제

▶ 슬러리월의 시공 **가이드인설관** : ① 가이드월 설치 ② 트랜치 설치 : 가이드월 안에 벤토나이트 용액을 주입하면서 설치 ③ desanding ④ end pipe 설치 ⑤ 철근망 조립 및 근입 ⑥ 콘크리트 타설

■ **도심지 대심도 흙막이 공사**

▶ 개요 : 지반거동+구조물피해

▶ 공법 선정시 고려사항 (지지근주환시)

- 지층조건: 점사구분/침하예측

- 지하수위 : GWL 높으면 문제/차수지수고려

- 근입부 안정 : 가장 큰 위험/점토지반의 heaving, 모래지반의 boiling 검토/주동과 수동토압에 의한 토압균형 근입안정이 중요함

- 주변 구조물, 지하 매설물 : 침하, 변위가 최소로 또는 허용 한도 이하/신설구조물, 지반, 기존구조물의 상호작용을 고려

- 환경피해 : 민원방지/계측관리

- 시공 가능성 : ① 굴착깊이가 깊어지면 CIP, Sheet pile은 연결부에서 접합에 문제가 발생되므로 주의해야하고 ② H-pile + 토류관, SCW, 지중연속벽은 비교적 깊은 심도 적용이 가능함.(30-40m) ③ 암층인 경우 SCW, Sheet pile은 불가하고 CIP, Slurry wall 은 특수장비 또는 공사기간이 길어짐.

▶ 인접지반 침하원인 및 대책

- 진동 : 토류벽 시공시 진동으로 사질토 침하, 점성토의 전단

강도 감소

- 과도한 굴착 : 한쪽에 대해 크게하면 편토압 발생과 토류벽에 큰 휨모멘트가 생겨 변형

- 배면공극과 이음부 : 배면공극, Sheet Pile의 이음불량, C.I.P, S.C.W 의 차수 및 겹침부 불량 등에 의한 배면이동과 지하수와 함께 토사유출이 생기므로 배면은 공극이 없도록 뒷채움하고 연결부와 차수공은 정밀시공함.

- Heaving, Boiling발생 : 근입깊이를 적게하는 경우 점성토는 Heaving, 사질토는 Boiling이 생기고 이 경우는 흙막이의 전체적인 파괴로 발전

- 배수 : 배면측의 지하수가 굴착지면 또는 흙막이 벽을 통해 누수되는 경우 배면지반의 유효응력이 커져 침하가 발생되게 되며 사질토 보다는 점성토 지반이 침하량이 큼에 유의해야 함.

- 토류벽 인발 : 인발시 처리불량에 의해 변형이 생기므로 모래나 물탈 채움으로 공극이 없게.

- 기타 : 주위 매설물의 뒷채움 불량으로 굴착시 지반이완, 상수도관, 하수관 등의 누수가능.

▶ 인접구조물 사전안정성 파악 고려사항

- 토류공법 : 벽체나 지지구조의 강성이 클수록 수평변위가 적게되므로 강성이 큰 형식을 선정함. → H-pile, Sheet Pile, SCW 보다는 CIP, 지중연속벽을 고려함

- 지반상태 : 사질토보다 점성토가 지반 변위량이 크게 됨. and 사질토는 배수등으로 침하량이 작더라도 비교적 짧은 시간에 변위되므로 구조물에 영향이 클 수 있음.

- 지하수 : 수위 저하로 하층의 증가효과가 있게 되므로 수위 저하조건, 차수벽 근입깊이, 하부지반상태를 고려함.

- 인접구조물 : 인접구조물의 노후상태, 침하, 부등침하, 구조물 기초형식등을 고려함.

## 제 6 장 사면안정론

### ■ 사면 종류

▶ 사면의 구분

- 자연사면, 인공사면
- 절토사면, 성토사면

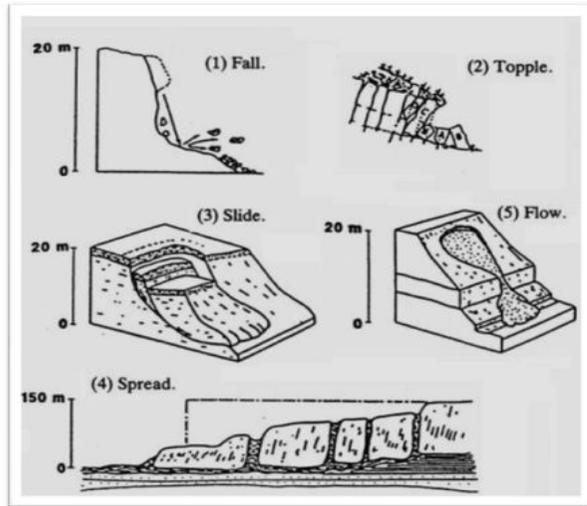
▶ 성토사면

- 도로, 댐, 매립
- 재료의 공학적성질, 흙의 입도분포, 시공방법, 다짐도

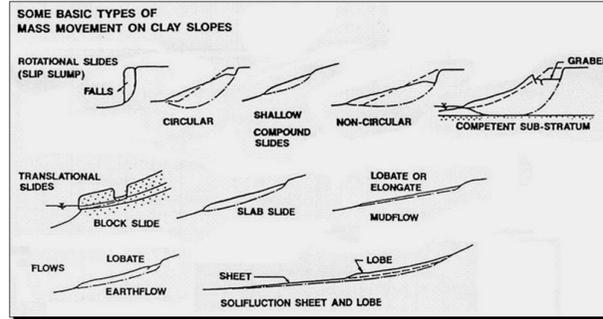
▶ 절토사면

- 도로, 택지개발
- 설계 : 절토의 목적, 지질조건, 토질특성, 시공방법, 기상조건, 무한사면, 유한사면

▶ 사면활동의 종류



▶ 점토사면 활동의 종류



▶ 사면의 안전율

사면의 안전율은 불확실성의 정도를 나타내는 것으로, 해석 시에 고려되는 각종 인자들의 신뢰성을 높여주기 위해 강도정수, 공극수압, 지층의 구성, 기존의 경험에 많은 영향을 받는다. 또한 흙, 재료의 종류와 기능에 따라서 차이가 있다.

① Limit equilibrium

$$F_s = \frac{Su}{\tau} \text{ (total stress)}$$

$$F_s = \frac{c' + \sigma' \tan \phi}{\tau} \text{ (effective stress)}$$

② Forces

$$F_s = \frac{\sum \text{resisting force}}{\sum \text{Mobilized force}}$$

③ Moments

$$F_s = \frac{\text{resisting moment}}{\text{overturning moment}}$$

▶ The required shear strength

① 전응력 개념 :  $\tau_{req} = \frac{Su}{F_s}$

② 유효응력 개념 :  $\tau_{req} = \frac{c'}{F_c} + \frac{\sigma' \tan \phi}{F_\phi}$

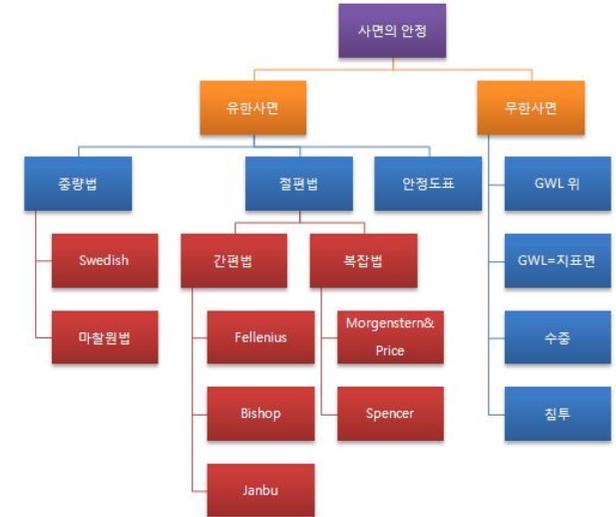
$F_c$  &  $F_\phi$ 를 구별하여 적용하면 파괴면을 따라서 발휘되는 강도정수, the cohesive( $c'$ ) & frictional( $\phi'$ ) 성분은 대해서 다른 비율의 적용이 가능하다. 그러나 대부분의 한계 평형개념의 해석법들에서는, 즉  $F_c = F_\phi$ 라고 놓고 문제를 해석하고 있다.

▶ 사면활동 형태에 의한 분류

① 유한사면 : 활동면의 깊이가 사면 높이에 비해서 비교적 큰 것.

② 무한사면 : 활동면의 깊이가 사면의 높이에 비해서 작은 것

### ■ 사면의 안정해석법



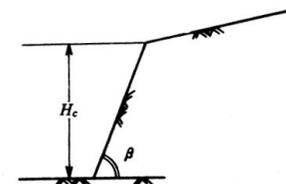
### ■ 직립사면과 단순사면의 안정

▶ 직립사면의 안정

(1) C와  $\phi$ 가 존재하는 일반적인 흙

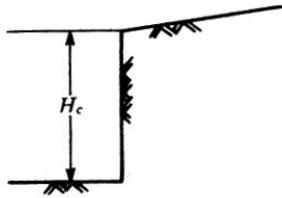
1) 일반적인 경우

$$H_c = \frac{2C}{\gamma_c} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{\sin^2(\beta - \phi)} = \frac{4C}{\gamma_c} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)}$$



<일반적인 경우의 직립 사면>

2) 사면이 직각인 경우



<직립사면이고  $\beta = 0$ 일 때>

① 평면활동일 때

$$H_c = 2Z_c = \frac{4C}{\gamma_t} \cdot \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = \frac{4C}{\gamma_t} \cdot \frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi} = \frac{2q_u}{\gamma_t}$$

② 원형활동일 때

$$H_c = \frac{1.93q_u}{\gamma_t} \quad (\text{Fellenius})$$

③ 인장균열을 고려할 때

$$H_c' = \frac{2}{3} H_c \quad (\text{Terzaghi})$$

④ 안전율

$$F = \frac{H_c}{H}$$

여기서,  $H_c$ 는 한계고,  $H$ 는 사면의 높이

(2)  $\phi = 0$ 인 점성토

① 일반적인 경우

$$H_c = \frac{2C}{\gamma_t} \cdot \frac{\sin\beta \cdot \cos\phi}{\sin^2(\beta - \phi)} = \frac{4C}{\gamma_t} \cdot \frac{\sin\beta \cdot \cos\phi}{1 - \cos(\beta - \phi)}$$

에서  $\phi = 0$ 이면

$$H_c = \frac{4C}{\gamma_t} \cdot \cot \frac{\beta}{2}$$

② 사면이 직각인 경우

위 식에서  $\beta = 0$ 이면  $H_c = \frac{4C}{\gamma_t}$

▶ 단순사면의 안정

(1)  $\phi = 0$ 인 점성토의 경우

전응력법( $\phi = 0$  해석법)인 비배수시험(일축압축시험이나 베인

테스트)에 의해서 흙의 강도를 결정하면  $C = \frac{q_u}{2}$ 이다.

$$H_c = N_s \cdot \frac{C}{\gamma_t}$$

$$N_s = \frac{H_c \cdot \gamma_t}{C} = 4 \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})$$

$$N_d = \frac{H_1}{H}$$

$$F = \frac{H_c}{H} = \frac{C \cdot N_s}{H \cdot \gamma_t}$$

$N_d$  : 심도계수

$N_s$  : 안정계수

여기서,

$H$  : 사면의 높이

$H_1$  : 사면의 어깨에서 지반까지의 깊이

토질시험에 의해  $C$ ,  $\gamma_t$ 를 결정하면  $H_c$ 가 구해진다.

사면의 경사각  $\beta > 53^\circ$ 이면  $N_d$ 와 무관하고 사면선단파괴가 발생한다.

$\beta < 53^\circ$ 이면  $N_d$ 에 따라 파괴형식이 달라진다.

$N_d \geq 4$ 이면  $\beta$ 에 무관하고 저부파괴가 된다.

(2) 점착력과 내부마찰력을 가지는 일반적인 흙의 경우

① 안정수 도표를 이용한다.

②  $\phi$ 값을 변화시켜 여기에 대응하는  $C_d$ 를 구하는 것을 반복

하여 Fellenius의 안전율  $F_s$ 를 구한다.

$$F_s = \frac{C}{C_d} = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_d}$$

### ■ 무한사면의 안정해석

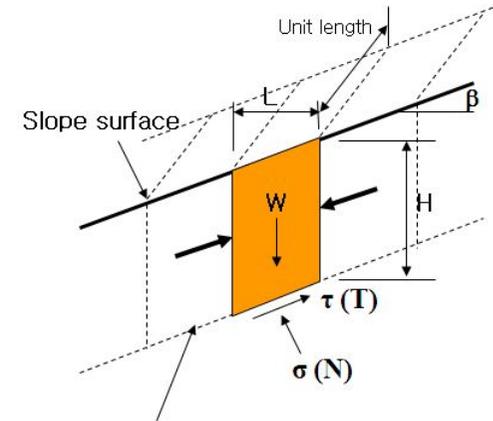
▶ 지하수위가 고려되지 않은 무한사면의 안정해석

(1) 현장조건

① 사면의 길이가 사면의 높이보다 훨씬 큰 경우

② 사면이 모든 방향에서 무한히 펼쳐져 있고 활동은 지표면과 평행하게 발생한다고 가정.

③ 파괴면의 아래에 지하수위가 존재하는 경우



Failure surface

(2) 해석에 필요한 Parameters 및 안전율의 개념

① 토괴의 무게 :  $W = \gamma L H \times (1)$

② 수직응력 :  $\sigma = \frac{P}{A} = \frac{W \cos\beta}{L} = \frac{\gamma H L \cos\beta \cos\beta}{L} = \gamma \cdot H \cdot \cos^2\beta$  : W

의  $\cos$  성분을 경사바닥면의 단면적으로 나눈 값이다.

$$A = \frac{L}{\cos\beta} (1)$$

③ 전단응력 :  $\frac{W \sin\beta}{L} = \gamma \cdot H \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta$  : 전단력(토괴중량의

$\sin$ 성분)을 바닥 단면적으로 나눈 값)

④ 전단강도 :  $s = c + \sigma \tan\phi$

⑤ 안전율의 기본식  $F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + (\sigma - u) \tan\phi}{\tau}$  (전단강도가 전단응력보다 몇 배나 더 큰가의 개념임)

(3) dry sand 케이스에서의 안전율

①  $c = 0$ 인 케이스 (dry sand라는 의미)

$$② F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + (\sigma - u) \tan\phi}{\tau} =$$

$$\frac{\sigma \tan\phi}{\tau} = \frac{\gamma H \cos^2\beta \cdot \tan\phi}{\gamma H \cos\beta \cdot \sin\beta} = \frac{\cos\beta \tan\phi}{\sin\beta}$$



### ■ 침투수압이 있는 무한사면의 안정해석

▶ 침투수압이 사면에 평행하게 작용하는 경우

(1) 무한사면 안정해석의 개요

무한사면의 안정은 모두 4가지 케이스로 구분된다.

- ① 지하수위가 활동면 아래에 존재하는 경우
  - ② 지하수위=지표면인 경우
  - ③ 수중인 경우
  - ④ 침투수압이 있는 경우(활동면 내에 GWL이 존재하는 경우)
- 어느 경우이나 기본식에서부터 공식이 유도되어 간다.

(2) 침투수압이 있는 경우의 안정해석 조건

- ① 수직응력 (기본식에서  $\gamma$ 만 변화한다.)

$$\sigma = \gamma H \cos^2 i \rightarrow \sigma = [(1-m)\gamma_t + m\gamma_{sat}] H \cos^2 i$$

(공학적 의미는 무엇인가? 전체 높이 1에서 포화부분 비율과 불포화부분(1-m)의 비율을 따로 따로 고려해 준 것에 불과하다.)

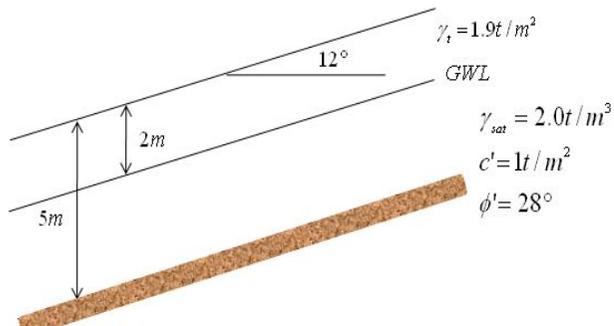
- ② 전단응력 (위와 마찬가지로 개념)

$$\tau = \gamma H \cos i \cdot \sin i \rightarrow \tau = [(1-m)\gamma_t + m\gamma_{sat}] H \cos i \cdot \sin i$$

- ③ 간극수압 :  $u = m H \gamma_w \cdot \cos^2 i$

④ 안전율 :  $F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + (\sigma - u) \tan \phi}{\tau}$

▶ 실전문제



그림과 같은 경사  $i = 12^\circ$  인 과압밀점토의 무한사면이 있다. 활동파괴면은 지표하 5m에서 지표와 평행하다고 가정한다. 이 사면의 활동파괴에 대한 안전율을 구하시오. (단, 지하수위는 지표하 2m인 점에 있으며, 점토의 습윤 및 포화상태의 단위중량은 각각 1.9 및  $2.0t/m^3$  이고, 흙의 유효점착력 및 유효내부

마찰각은 각각  $c' = 1t/m^2$ ,  $\phi' = 28^\circ$  라고 한다.)

① 이 경우 역시 기본식에서 벗어나는 것이 하나도 없으며 단위 중량계산에서 곱해지는 계수 m은 전체 활동고에 대한 지하수면까지의 높이 비이므로  $\frac{3}{5}$  이된다.

②  $\sigma = [(1-m)\gamma_t + m\gamma_{sat}] H \cos^2 i = [0.4 \times 1.9 + 0.6 \times 2.0] \times 5 \times \cos^2 12 = 9.38t/m^2$

③  $\tau = [(1-m)\gamma_t + m\gamma_{sat}] H \cos i \cdot \sin i = [0.4 \times 1.9 + 0.6 \times 2] \times 5 \times \cos 12 \times \sin 12 = 1.99t/m^2$

④  $u = \gamma_w m H \cos^2 i = 1 \times 0.6 \times 5 \times \cos^2 12 = 2.87t/m^2$

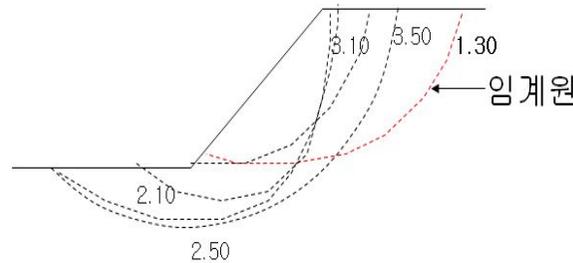
⑤  $F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi}{\tau} = \frac{1 + (9.38 - 2.87) \tan 28}{1.99} = 2.24$

### ■ 안정도표에 의한 사면의 해석

▶ Critical Circle (임계원)

임계원이란 가상활동면을 임의로 선정하여 구하는 원으로

- ① 가상활동면 임의로 선정
- ②  $c_d$ 에 대한  $c_u$ 의 비율이 최소인 면의 하나
- ③ 활동파괴에 대한 임계면을 찾기 위해서는 여러 다른 원호파괴면에 대한 시행착오를 거쳐야 한다.
- ④ 이렇게 구한 안전율 중 최소값이 사면활동에 대한 안전율이 되며, 이 원을 임계원이라 한다.



▶ 안정도표에 의한 사면의 해석

(1) 개설

안정도표는 단순사면에 대한 안정해석의 결과를 도표화한 것으로 테일러가 발표한 이후 Janbu, Bishop-Morgenstern 등의 안정도표가 발표되었다. Taylor의 안정도표는 간극수압이 없는 단순사면에 대해  $N_s$ 와  $\beta$ 와의 관계를 차트화한 것이다.

1) 한계고 및 안정계수

① 임계원에서 발생하는 점착저항력은 다음과 같다.

$$c_d = \gamma \cdot H \cdot m \text{ or } m = \frac{c_d}{\gamma H}$$

여기서, m : 안정수로 무차원이다.

② 사면의 한계높이( $H_{cr}$ )

$$H_{cr} = \frac{c_d}{\gamma_t \cdot m} = \frac{N_s \cdot c_d}{\gamma_t}$$

③ 안정계수(stability factor); Terzaghi & Peck(1967)

$$N_s = \frac{1}{m} = \frac{\gamma_t \cdot H}{c_d}$$

2) 안전율 :  $F_s = \frac{H_{cr}}{H}$

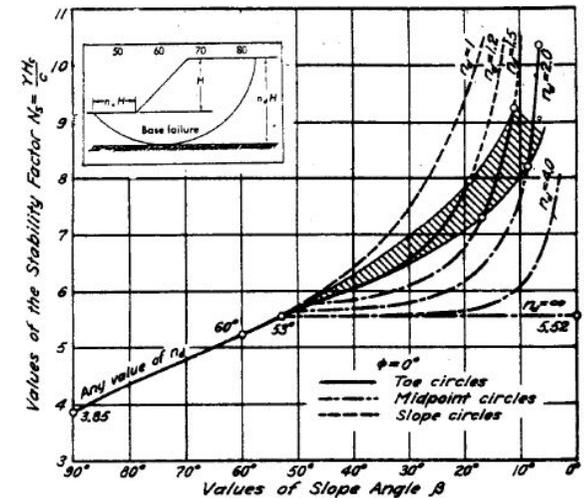
3) 심도계수( $N_d$ ) : ①  $N_d = \frac{H'}{H}$

여기서, H : 사면고, H' : 사면어깨에서 지반까지의 깊이

②  $\beta < 53^\circ$ 인 경우에는  $N_d$ 에 따라 3가지 패턴의 파괴

가.  $N_d \leq 1$  : 언제나 사면내 파괴만 발생

나.  $1 \leq N_d \leq 4$  : 차트에서 판단해야 한다.



4) 단순사면의 파괴형태

- ① 사면의 경사각  $\beta \geq 53^\circ$ 이면  $N_d$ 와 무관하고 항상 사면전단 파괴가 발생한다.
- ②  $\beta < 53^\circ$ 이면  $N_d$ 에 따라 파괴형식이 달라진다. ( $N_d$ 가 클수록 사면내 파괴에서 사면전단 파괴, 저부파괴로 간다.)
- ③  $N_d \geq 4$ 이면  $\beta$ 에 무관하고 항상 저부파괴가 된다.

▶ 예제 1

1) 문제

지표에서 6m 지점에 굳은 지층이 있고, 그 흙을 경사 40도로 깊이 4m까지 굴착하려 한다. 흙의 전단저항각  $\phi = 0^\circ$ , 점착력  $c = 1.5t/m^2$ , 단위무게  $\gamma = 1.7t/m^3$ 이었다. 이 사면이 파괴가 일어난다고 가정하면 어느 형태의 파괴가 일어날 것으로 추정되는가? 또한 사면의 안전율은 얼마인가? 단, 이 현장 조건에서의 안정계수( $N_s$ )는 5.8이라고 한다.

2) 풀이

① 굴착에 대한 안전율을 묻는 것으로 심도계수를 이용해서 풀이해야 한다.

$$② N_d = \frac{H'}{H} = \frac{6}{4} = 1.5$$

③ 단순사면의 파괴형태를 추정해 보면 심도계수가 1~4사이에 존재하고  $\beta < 53^\circ$  인 경우이므로 계산에 의해서 알 수는 없고 차트에서 확인해 보면 저부파괴에 해당함을 확인할 수 있다.

④ 안전율을 구하기 위해서는  $H_{cr}$ 을 먼저 구해야 하므로

$$H_{cr} = N_s \frac{c}{\gamma_t} = 5.8 \times \frac{1.5}{1.7} = 5.12m$$

⑤ 4m 굴착을 하는 경우의 안전율

$$F_s = \frac{H_{cr}}{H} = \frac{5.12}{4} = 1.28$$

▶ 예제 2

1) 문제

제방고가 10m이고 제방 하면 10m인 곳에 굳은 지반이 있다. 이 제방의 경사각을  $20^\circ$  로 시공하려 한다면 안전율은 얼마인가? 단,  $\gamma = 1.7t/m^3$ ,  $c = 6.0t/m^2$ 이고, 전단저항각  $\phi = 0^\circ$  이다.

2) 풀이

① 깊이계수 :  $N_d = \frac{H'}{H} = \frac{20}{10} = 2.0$

②  $\beta = 20^\circ$  이므로 안정계수 차트를 찾아 보면 심도계수 2.0인 경우 안정계수가 6.3정도에 해당한다.

③ 따라서, 이 굴착사면이 붕괴가 된다면 저부파괴가 일어날 가능성이 대단히 높으며

④ 한계고 :  $H_{cr} = N_s \frac{c}{\gamma_t} = 6.3 \times \frac{6.0}{1.7} = 22.2m$

⑤ 안전율 :  $F_s = \frac{H_c}{H} = \frac{22.2}{10} = 2.2$

### ■ Land Slide & Land Creep

▶ 산사태의 정의

산사태의 발생원인은 크게 두 가지 요인에 의해서 발생된다. 전단강도 감소요인과 전단응력증대 요인에 의해서 산사태가 발생되지만 산사태의 종류에 따라 Land Slide 와 Land Creep이 발생된다. Land Slide의 경우 함수변화에 따른 원인이 크며 지층구성 상태에 따라 지하수 분포상태 및 침투수 발생으로 붕괴되는 예가 많이 발생한다.

Land Creep은 지형적인 여건이나 지질적인 조건에 의해서 감지할 수 없을 정도의 하향이동을 말하며 산사태 인접지역 등은 상시적으로 동태관찰을 통하여 Creep 변형을 관찰하여야 한다. Land Slide와 Land Creep 을 비교하여 설명하면 다음과 같다.

▶ Land Slide와 Land Creep의 비교

(1) Land slide (산붕괴, 산사태)

- ① 원인 : 호우, 융설, 지진
- ② 시기 : 호우중, 호우직후, 지진시
- ③ 지질 : 표층의 풍화, 약화가 현저한 투수성이 좋은 사질토, 풍화암.
- ④ 지형 : 경사 30o 이상의 급경사면
- ⑤ 토질 : 불연속층
- ⑥ 발생상태 :
  - Sliding속도 대단히 빠르고 순간적이다
  - 활동도파가 현저하게 교란된다.
  - 강우강도에 의한 영향이 크다.

- 돌발형이다.
- 발생규모가 작다.
- Sliding면의 구배는 급경사이다.
- ⑦ 대책공법 : 법면보호/토류벽 설치/옹벽시공/ 배수시설 시공 산복사방
- (2) Land creep
  - ① 원인 : 강우, 융설에 의한 지하수위 상승
  - ② 발생시기 : 강우후 어느 정도 시간경과 후
  - ③ 지질 : 제3기층 변성암 지대. 파쇄대
  - ④ 지형 : 5~20° 완경사면, 면적1,000~1,000,000m2, 깊이3~30m
  - ⑤ 토질 : 점성토, 연결암을 Sliding면으로 한다
  - ⑥ 발생상태
    - Sliding 속도 완만하고 연속적이다
    - 활동도파는 원형에 가깝다
    - 지하수에 의한 영향이 크다
    - 계속형이다
    - 발생규모가 대단히 넓고 깊다
    - Sliding면의 구배는 완경사이다
  - ⑦ 대책공법
    - 배수-표면배수(포장, 때붙임, 돌붙임)/지하배수시설(암거, 집수정, 수평 Boring, 배수터널공법)
    - 지하수 차단 방법 (지중 차수벽 설치)
    - 압성토 공법
    - 옹벽, 말뚝(목향, 콘'c향, 강관향) 향타
- ▶ 흙의 종류에 따른 Land slide 구분
  - 1) 느슨한 모래의 사면 붕괴
 

포화시 사면 부근에서 폭파나 말뚝의 향타에 의한 충격 혹은 지하수위의 급격한 변화에 의해 발생되며 액상으로 진화되므로 환경사로 될 때까지 정지하지 않는다.
  - 2) 암설의 붕괴
 

배수가 불량하고 포화될 때 암설의 중량이 증가하고 강도가 감소되어 점성류와 같이 유동한다. 층상의 정암이나 편암에 부분적으로 풍화된 곳에 많이 발생하고 눈이 녹을 때 많이 발생된다.
  - 3) 연약한 균질의 점토사면의 붕괴
 

사면의 경사가 느리고 점토가 연결이면 큰 반구상의 저부 붕괴를 일으키며 사면 또는 사면전 부근의 굴착에 의해 유발된다.

- 4) 경 점토사면의 붕괴  
자연사면의 사면선이 침식되거나 인위적으로 흙을 팔 때 노출된 사면의 정도가 분해하는 것 등에 의해 발생
- 5) 모래층이 중간에 끼어 있는 점토사면의 붕괴  
모래층 속의 공극수압이 크게되면 전단저항력이 감소되어 발생된다.

### ■ $\phi = 0$ 해석법에 의한 사면의 안정해석

▶ 개요

유한사면	$\phi = 0$ 해석법	① clay에 유효하며 평면, 원호 활동 해석 ② 포화점토의 비배수상태(급속재하)시의 시공직후 안정해석법 ③ 전응력 해석법
	$\phi > 0$ 해석법	① $c, \phi \rightarrow$ 마찰원법(테일러가 발전)
안정해석	Fellenius	간편법
	Bishop	
	Janbu	
	Morgenster & Price	Computer
	Spencer	
도표	$N_s$	
	$N_d$	

$\phi = 0$  해석법은 증량법의 일종으로 점토질 사면의 해석에 유용하며 평면 및 원호활동 해석에 적용한다.  $\phi = 0$ 라는 의미는 내부마찰각이 0라는 의미로 점성토 지반에 적용한다는 의미이며  $\phi \neq 0$  해석법은 점착력과 내부마찰각이 존재하는 지반이므로 이를 마찰원법이라고 한다.

▶ 적용

- ① 점토질 사면의 안정해석
- ② 포화점토의 비배수상태(급속재하)시의 시공직후 안정해석
- ③ 전응력 해석법

▶ 안전율

- ① 활동을 일으키려는 모멘트는 토피의 중량과 편심거리의 곱이다. 그러므로

$$M_d = W a$$

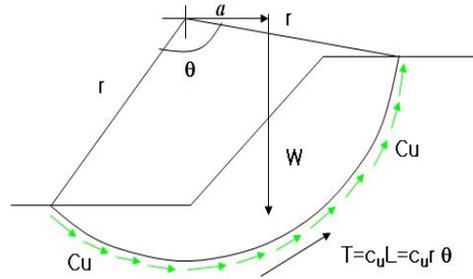
- ② 활동에 저항하는 모멘트는 전단응력과 아크 길이와 반경의 곱이다.

$$M_r = \tau \cdot r \cdot L_{arc} \quad (\tau = c + \sigma \tan \phi \text{에서 } \phi = 0 \text{이면 } \tau = c)$$

- ③ 만일 문제에서 아크의 길이를 주지 않았을 경우

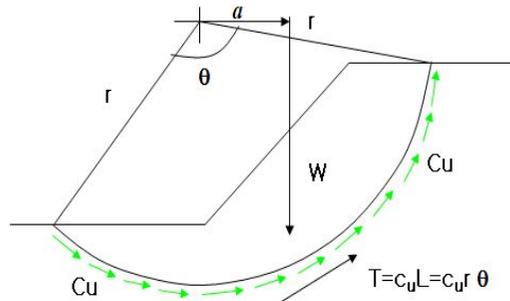
$$L_{arc} = r \theta \quad (\theta = \text{각도} \times \frac{\pi}{180^\circ})$$

- ④ 안전율  $F_s = \frac{M_r}{M_d}$



▶ 예제

다음과 같은 점토질 사면의 원호활동에 대한 비배수조건인 안전율을 구하시오.



$r = 9m$   
 $x = 4.15m$   
 $\phi = 0^\circ$   
 $c = 5.0t/m^2$   
 $\gamma = 2.00t/m^3$   
 $L_{arc} = 12.8m$   
 $W = 39.4t$

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{\tau r \cdot L}{W a} = \frac{5 \times 12.8 \times 9.0}{39.4 \times 4.15} = 3.52$$

### ■ $\phi > 0$ 해석법에 의한 사면의 안정해석

▶ 개요

$\phi \neq 0$  해석법이라고도 하며 내부마찰각이 zero가 아니라는 의미는 점착력과 마찰각이 모두 존재하는 경우이므로 이를 마찰원법이라고 한다. Taylor가 발전시킨 전응력 해석법이다.

▶ 안정해석 순서

토층이 균일한 경우에 적용하는 방법으로 임의로 가정한 원호 활동면의 반력의 작용선은 마찰원이라 불리는 한 원에 접한다는 원리이다.

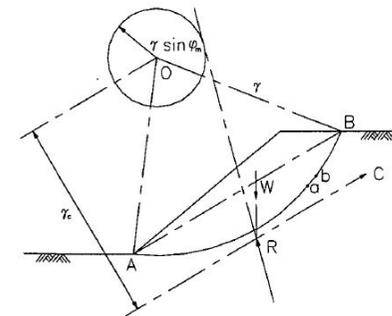
- ① 임의의 파괴면(중심 O, 반경 r인 원호)에 대해서, 강도정수가  $C_u, \phi_u$ 이면 평형상태에서 동원되어야 할 전단강도( $\tau_m$ )는

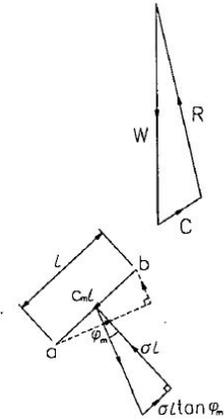
$$\tau_m = \frac{\tau_f}{F} = \frac{1}{F} (C_u + \sigma \tan \phi_u) = C_m + \sigma \tan \phi_m$$

여기서 F는 전단강도에 대한 안전율로 다음과 같이 정의된다.

$$C_m = \frac{C_u}{F_c}$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \phi_u}{F_\phi}$$





- ① 법선방향 합력 :  $\sigma l$
- ② 전단저항력의 점착성분 :  $C_m l$
- ③ 전단저항력의 마찰성분 :  $\sigma l \tan \phi_m$

파괴면의 방향을 따라서 임의 길이마다 작용하는 힘  $C_m l$ 을 현 AB에 평행한 성분과 연직방향 성분의 합은 zero이며, 현 AB에 평행한 성분의 합은 다음과 같다.

$$C = c_m L_c$$

여기서,  $L_c$ 는 현 AB의 길이

C는 현 AB에 평행한 방향으로 작용하는 점착저항력의 합력이고, 합력 C의 작용선은 중심 0에 모멘트를 취해서 구한다. 합력 C가 점 0에서  $r_c$ 만큼 떨어져 있으면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$C_{r_c} = r \Sigma c_m l \text{ 혹은 } C_m L_c r_c = r c_m L_a$$

여기서  $L_a$  : 호의 길이,  $L_c$ : 현의 길이

$$\text{그러므로 } r_c = \frac{L_a}{L_c} r$$

이 때, <그림 1>과 같이 전단파괴면의 한 요소에 작용하는 법선방향의 힘과 파괴면의 내부마찰력의 합을 구하면

$$N = \sigma(l \times 1) = \sigma l$$

$$N \phi_m = N \tan \phi_m = \sigma l \tan \phi_m$$

$$R = \sqrt{(\sigma l)^2 + (\sigma l \tan \phi_m)^2}$$

이 힘들은 중심이 0이고 반경이  $r \sin \phi_m$ 인 원에 접하며, 이 원은 전단파괴면의 내부마찰 성분에서 의해서 생긴 것이므로 마찰원( $\phi$ -circle) 혹은  $\phi$ -원이라고 한다.

임의의 파괴면 위에 있는 호의 중량(W)은 C 및 R과 평형을 이룬다. 힘 W의 크기와 방향을 알고 있으며, 점착성분의 합력 C와 R은 방향만 알고 있다. 처음에는  $F_\phi$ 의 값을 임의로 하여  $\phi_m$ 만을 계산하고 <그림 1>과 같이 힘의 다각형을 작도하여 힘 C의 크기를 구한다. → 점착력에 대한 안전율은 다음과 같이 구한다.

$$c_m = \frac{C}{L_c}, F_c = \frac{c_u}{c_m}$$

이것은 일반적으로  $F_\phi$ 와 불일치하므로 새로운  $F_\phi$ 를 가정하여 최소 3회 이상 반복한다. 이렇게 구하여 얻은  $F_c$ 와  $F_\phi$ 와의 관계 그래프( $F_c - F_\phi$  그래프)를 그려  $F = F_c = F_\phi$ 인 상태의 안전율을 구하면 그것이 주어진 파괴면의 안전율이다.

이러한 방법으로 파괴면을 여러 번 가정하여 안전율 최소인 파괴면을 구한다. 유효응력으로 해석하는 경우에는 파괴면에 작용하는 간극수압을 고려하고, 강도정수는  $c', \phi'$ 를 사용한다.

▶ 예제

다음은 마찰원 방법으로 사면의 안정해석을 하기 위해 내부마찰각에 대한 안전율  $F_\phi$ 를 가정하여 점착력에 대한 안전율  $F_c$ 를 결정한 것이다. 이 사면의 안전율은?

$F_\phi$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$F_c$	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0

$F_\phi$ 와  $F_c$ 로 안전율을 연결한 후  $F_\phi = F_c = F_s$  값을 구한다.

$$F_\phi = F_c = F_s = 1.5$$

## Soil Nailing

▶ 개요

NATM과 유사한 지반보강공법으로, 사면보강 및 굴착면에 대한 유연한 지보등의 목적으로 유럽 및 미국지역에서 널리 활용되고 있다. Nailed-soil 토류벽체의 주된 구조적 요소는 원지반(In-situ ground), 저항력을 발휘하는 네일 및 전면판(Shotcrete facing, concrete 또는 steel panel) 등이다.

▶ 공법의 특징

- ① 원지반 자체를 벽체로 이용하기 때문에 안정성이 높은 옹벽을 구축할 수 있다.
- ② 소형기계로도 시공이 가능하기 때문에 좁은 장소나 경사가 급한 지형에도 적용성이 우수하다.
- ③ 지반조건이 변하더라도 시공패턴을 변경하여 현장조건에 쉽게 대응할 수 있다.
- ④ 시공 방법이 간편하고 작업시 소음, 진동이 적어 도심의 근접시공에 적용성이 높다.
- ⑤ 지진 등 주변 지반의 움직임에 대한 저항력이 크다.
- ⑥ Soil nailing 공법은 신속성, 단순성, 경제성, 경장비의 사용으로 경쟁력이 높다.
- ⑦ 상기의 여러 요건에 의해 타공법에 비해 경제적이다.

▶ 보강토 공법과의 비교

유사점	차이점	
	Soil Nailing 공법	보강토 공법
Pre-stress를 가하지 않고, 토사와 보강재 사이의 상대 변위에 의해 인장(보강)력 발생	Top-Down 방식이기 때문에 시공시 보강재에 발생하는 응력 분포에 차이가 발생	Down-Top 방식
장력은 토사와 보강재 사이의 마찰력에 의해서 유지	토사를 선택하거나 제어하지 못한다. 따라서 최대인장력( $r_{max}$ )의 발생지점을 알기 어렵다.	보강옹벽에서는 마찰이 흙과 보강재 사이에서 직접적으로 발생
보강지역은 비보강지역을 종렬식 옹벽과 같은 거동을 하게 하여 안정적으로 지지	Grouting의해 주위 흙과 강재를 서로 부착시키고, 작용하중은 Grouting과 흙과의 접촉면을 통해서 전달된다.	
전면판(Facing)은 보강옹벽의 경우 공장에서 제작된 조립식 벽체를 사용하고 Soil Nailing에서는 주로 현장 경유를 이용(벽체 전체의 안정에 큰 영향을 미치지 않음)	벽체의 변위가 굴착이 진행됨에 따라 점진적으로 발생된다. 대체로 벽체의 최상부에서 변위가 가장 크다. 영구용 벽일 경우의 전면판은 슛크리트 타설 후 조립판넬을 이용해 마감한다.	성토하중으로 인해 벽체의 최하부에서 가장 큰 변위가 발생한다.

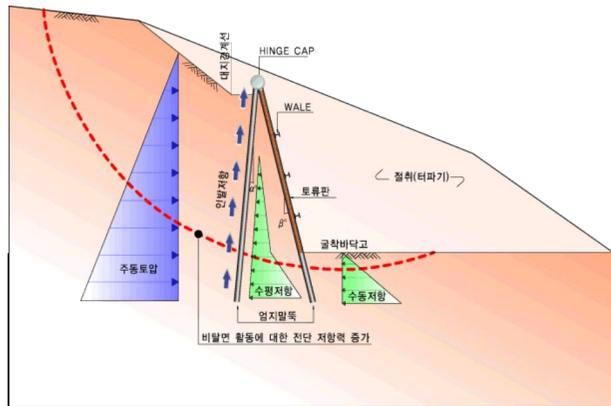
원지반 보강토 공법에 있어 보강재를 지반 내에 삽입하며 굴착면을 강화하여 굴착면의 안정화를 꾀하는 기본적인 개념은 성토에 의한 보강공법과 같다고 할 수 있다.

## ■ 역지말뚝

### ▶ 개요

① 역지말뚝형 흙막이 옹벽 공법은 부지사용에 대한 제한을 받는 구간에 수직 또는 소정의 각도로 근입되는 2개의 역지말뚝이 두부 또는 띠장에서 서로 마찰이 없는 hinge로 연결되는 구조이다.

② 이때 배면측 말뚝은 hinge로 전달되는 축력에 대하여 인발저항과 수평토압에 대한 수평저항 거동을 하게 되며, 전면측 말뚝은 축력과 수평토압에 대해 저항함과 동시에토류벽체의 구성을 가지고 일반 토류벽체의 역할도 겸할 수 있다.



### ▶ 역지말뚝의 특징

① 이 공법은 또한 비탈면 활동에 대한 보강공법과 가설 또는 영구 흙막이나 옹벽 대용공법으로 활용할 수 있다.

② 비탈면 활동 보강 구조체로서 적용할때는 기존의 역지말뚝 공법보다 안정하고 효율적이며, 흙막이 공법으로 적용 할 때는 앵커나 버팀부재를 생략 할 수 있는 장점이 있다.

③ 특히 흙막이로 사용 할 때는 지지 구조를 생략하여 부지나 토공 작업을 효율화 할 수 있어 경제성 시공성 면에서 모두 장점이 있다.

### ▶ 역지말뚝형 흙막이 옹벽 공법 적용성

- ① 영구 및 가설옹벽
- ② 흙막이 공법

## ■ 사면 절토부 시공관리

### ▶ 개요

① 절토공은 도로, 터널, 토취장 등에서 설계서에 명시된 대로 땅을 파는 작업

② 절토공사시에는 배수, 사면안정등에 유의 하여시공.

### ▶ 절토공(법) 선정시 고려사항

- ① 환경 공해문제 : 진동,소음,대기,수질 오염,동식물상 등
- ② 미관고려 : 환경친화적 시공: 녹생토등
- ③ 발생토의 성토 유용성 조사
- ④ 대절토구간인 경우 가급적 친환경적으로 환경훼손방지 공법 채택 : 터널+교량

### ▶ 절토부 조사와 시험

#### (1) 조사의 목적

- ① 절토공사의 계획, 설계, 시공법검토(시공성 검토)
- ② 절토사면의 안정성검토(사면안정 검토)
- ③ 사면안정공법 선정 자료
- ④ 성토재료로서 유용 가능성에 대한 시험(성토유용 판단)

#### (2) 조사 항목

##### 1) 예비조사

자료, 지형, 지질, 기존공사, 지하수, 인구, 지하매설물

##### 2) 현장답사

지표수, 지하수, 인근 현장, 지형, 지질, 인원, 장비, 자재, 토취장, 사토장, 압식 분포

##### 3) 개략조사

Sounding, Boring, Sampling(사,보,샘)

##### 4) 현장원위치

##### ① PBT, 지지력계수 K값

##### ② Sounding

- 동적관입: SPT, DCPT (모래질)
- 정적관입: PCPT (연약점토),
- Dutch Cone(일반흙), Swedish Sounding(점토)

##### ③ 인발 : Isky Meter (연약지반)

##### ④ 회전 : Vane Shear Test (연약점토)

##### ⑤ Sampling(샘) : 시료 채취, 흙분류 시험

##### 5) 실내시험

- ① 흙분류 : 입도시험(Cu, Cc(Cg)), Atterberg 한계(PI, PL, SL, LL)

##### ② 토성시험 : w, Gs, $r_d$ , $r_{dmax}$

##### ③ 강도시험 : 1축압축, 3축압축, 직접전단

##### 6) 암조사

① 암분류 : RQD, RMR, Ripperbility, 풍화도, 균열계수, 절리 간격, Muller, Q-System

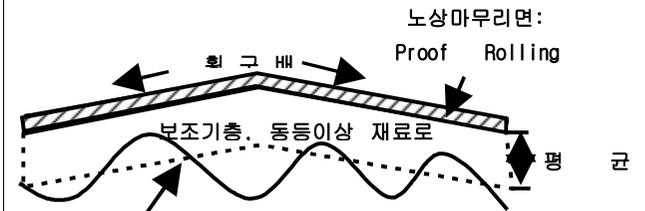
② 원위치시험 : 강도, 투수시험, 변형시험, 지압측정, 탄성과 탐사

### ▶ 절토 공사시 유의사항=대절토 사면의 붕괴원인 및 대책

- 1) 절토부 노상 지반 처리
- 2) 절토부 지하수(용수), 배수 처리
- 3) 노상다짐관리
- 4) 굴착토사용처리
- 5) 사면안정처리 : 풍화, 사질토, 절리 등에 유의
- 6) 구배와 소단 처리

### ▶ 절토부 노상 시공대책

- (1) 원지반이 암인 노상의 시공대책



### 암석절취면의 요

(2) 절토면 토질이 서로 다른 경우 : 암과 토사의 경계면 [토사원지반 처리]

- 1) 원지반이 노상재료로 적합한 경우 : 15cm 정도 굵고(발갈이) 다짐
- 2) 원지반이 노상재료로 부적합한 경우 : 치환후 다짐
- (3) 절토부 노상 다짐관리(다짐도 측정)

$$1) RC = \frac{\sum d_{(field)}}{\sum d_{(max)}} \times 100\% = 95\% \text{ 이상}$$

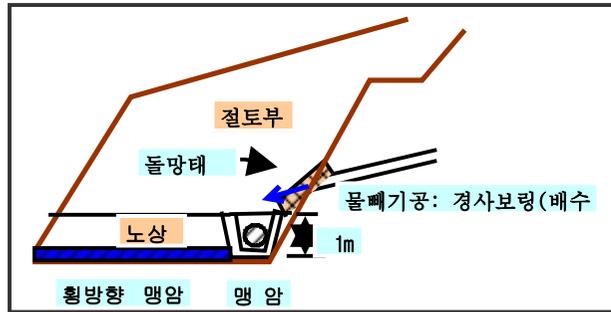
2) PBT(K30) : K=15~20

3) Proof Rolling : 3~5mm 이내

<보조기층=3mm, 노상=5mm>

4) 수정CBR >10

(4) 절토부 배수처리

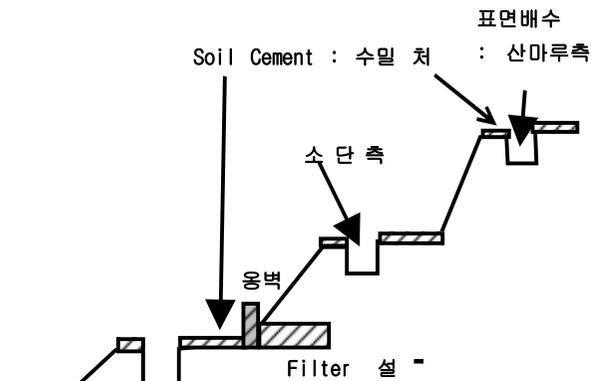


(5) 절토부 토사 처리

- 1) 흙의 입도, 토성시험
  - 2) 성토재료로 유용여부 판단
- ▶ 절토사면 대책(종합 사면 안정)

1. 법면보호공실시 : Shotcrete, 녹생토, 코어벡
2. 구배와 소단 : 소단은 법면 점검시설, 유지보수용작업대:

- 1) 풍화심한 붕괴토 사면 안정 대책 : 옹벽 설치
- 2) 사질토, 침식하기 쉬운 토질의 사면



▶ 평가

- 1) 절토사면 붕괴방지
  - 구배, 소단설계 및 사면 안정 해석이 중요함
- 2) 절토사면 구배소단 설계 선정시 고려사항

① 암반의 파괴형태 고려

- 원형파괴, 평면파괴, 썩기파괴, 전도파괴

- ② 사면안정해석 방법 : 한계 평형이론으로 주로 해석  
가. 선형법: Fellenius 절편법, 무한사면 해석법 등  
나. 비선형(원호)법: 한계평형이론, Bishop 간편법 등

■ 불포화토 사면의 안정

▶ 개요

- ① 일반적으로 지반은 포화토 또는 건조토로 구분하여 취급하였으나 강우시 사면안정과 같이 불포화토(unsaturated soil)가 많이 존재함
- ② 부분적 포화상태는 물과 공기의 영향으로 역학적 성질이 다르게 됨
- ③ 포화토는 간극수압이 0 이상의 값을 가지므로 유효응력에 불리한 영향을 미침
- ④ 불포화토는 간극수압이 음으로 작용하여 유효응력 증가, 즉 전단강도의 증가를 유발하게 됨
- ⑤ 부간극수압은 모관흡수력(Capillary Suction)에 의해 발생

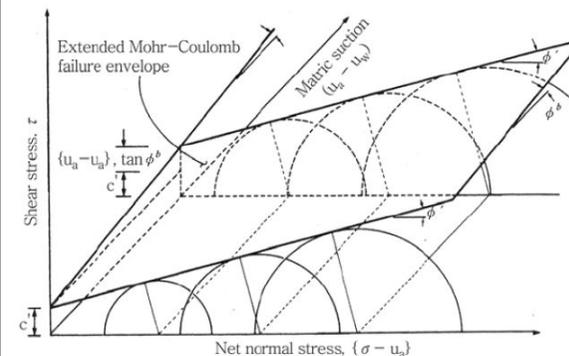
▶ 전단강도

- ① 불포화토의 전단강도는 유효점착력  $c'$ , 순수직응력  $(\sigma - u_a)$ , 모관흡수력  $(u_a - u_w)$ 의 3가지 항의 상태로 표현됨

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

( $\phi^b$  : 모관흡수력에 따라 증가하는 겉보기 점착각)

- ③ 불포화토지반의 파괴포락선



▶ 사면안정

- ① 불포화토는 (-)간극수압의 작용과 모관흡수력으로 지표면이라 하더라도 전단강도가 포화토의 경우보다 크게 됨
- ② 또한, 불포화토는 포화토보다 특수성이 적어 사면으로의 침투를 적게 허용함
- ③ 강우에 의한 침투나 습윤대의 발달은 수위변화를 유발하며 파괴가능성을 향상시킴
- ④ 따라서, 불포화토의 사면안정 검토를 위해서는 불포화토의 전단강도, 함수특성곡선, 특수계수와 관련된 지반정수가 필요
- ⑤ 강우와 관련된 강우강도, 지속시간이 필요하고 지반에 대한 침투해석, 간극수압분포도부터 불포화토의 사면안정검토가 실시됨

■ 사면 붕괴의 원인, 형태, 분류

▶ 사면 붕괴의 외적 원인

(흙 속에 발생하는 전단응력을 증가시키는 원인)

- ① 자연적 침식에 의한 사면 형상의 변화(지표 경사각의 증대)
- ② 함수량의 증가에 의한 흙의 단위중량 증가
- ③ 지진, 발파, 기타 진동에 의한 충격
- ④ 강우, 폭설, 침수 등에 의한 간극수압의 상승, 자중의 증가, 강도의 저하
- ⑤ 인위적 굴착 혹은 성토
- ⑥ 인공 또는 자연력에 의한 지하 공동의 형성
- ⑦ 인장 응력에 의한 균열의 발생
- ⑧ 균열중의 수압

▶ 내적 요인 (흙 자체의 전단강도를 감소시키는 원인)

- ① 급한 사면 경사
- ② 간극 수압의 작용(지하수가 침투하기 쉬운 지반 or 지형, 지하수가 풍부한 지층)
- ③ 낮은 강도 or 풍화하기 쉬운 토질, 암질, 약층 또는 불연속면
- ④ 흡수에 의한 점토 성분의 부피 증가
- ⑤ 흙의 다짐이 충분하지 못한 경우
- ⑥ 수축, 팽창 또는 인장으로 발생하는 미세한 균열
- ⑦ 불안정한 흙 속에 발생하는 변형과 국부적인 완만한 붕괴
- ⑧ 흙의 동결 용해
- ⑨ 결합재 성질의 퇴화

⑩ 지진, 발파, 진동에 의한 전단응력의 감소

▶ 사면 파괴의 형태(형상)

(1) 붕락(falls), 활동(slides), 유동(flows)으로 분류=> Skempton & Hutchinson

(2) 일반적 분류

① 무한사면 활동(평면 활동) : 완만한 사면에 이동이 서서히 일어나는 현상

▶ 유한사면 활동 : 비교적 급경사에서 급격히 변형하여 붕괴가 발생

① 원호활동

- 사면선단파괴(toe failure) : 경사가 급하고 비점착성 토질에서

- 저부파괴(base failure) : 경사가 완만하고 점착성인 경우

- 사면 내 파괴(slope failure) : 견고층이 얇게 있는 경우

② 대수나선활동 : 토층, 토성이 불균일할 때

③ 복합곡선활동 : 토층, 토성이 불균일할 때 특히 연약한 얇은 토층이 비교적 얇은 곳에 존재하면 저항이 적은 부분에 넓은 활동면 형성

▶ 사면붕괴의 종류

(1) 인공사면=절토사면+성토사면

1) 절토사면

① 얇은 표층 붕괴(침식, 세굴 포함) : 사질토, 표층풍화암

② 깊은 절토 붕괴 : 점성토, 붕적층, 파쇄대를 포함한 암

③ 깊고 광범위하게 Land Slide적 붕괴 : 절리 발달한 암

2) 성토사면

④ 얇은 표층 붕괴(침식, 세굴 포함) : 사질토, 화강토

⑤ 깊은 절토 붕괴 : 점성토, 지하수위가 높은 사질토

⑥ 기초지반을 포함한 붕괴 : 연약지반, 경사진 불안정한 지반

(2) 자연사면

⑦ 붕괴(slope failure) : 급경사에서 돌발적으로 발생, 이동 속도 및 규모가 작은 편(원호활동), 풍화된 사면 붕괴, 낙석

⑧ 지반활동(Land Slide) : 침투수가 집중되는 연약점토와 같은 특수한 지질구조를 갖는 환경사에서 서서히 발생, 소도가 매우 느리고 그 규모가 크다(무한사면)

⑨ 토석류(土石流, 산사태) : 붕괴에 비해 流下거리가 극히 길고(100 ~1000 m) 암을 포함한 토사가 물과 일체가 되어 급속히 流下

■ 사면안정공법

방식	내 용	공 법 명	세 부 공 법	
사 면 붕 괴 억 제 ~ 사면 보호 ~	배 수	배수공	표면배수(수로공, 침수방지공) 지하배수(얇은 층 : 암거, 깊은 층 : 집수정, 배수터널)	
		식 생	식생공	종자뿌리기, 잔디입히기, 평떼, 줄떼, 식수공
	표 면 보 호 ~ 인 공 재 료		피복공	네트공, 매트공, 플라스틱 소일시멘트공
		뽀기공	몰탈 뽀기, 콘크리트 뽀기	
		붙임공	돌 붙임, 콘크리트 블록 붙임	
		격자틀공	콘크리트 격자틀 (기성, 현타)	
사 면 붕 괴 억 지 ~ 사면 보 강 ~	힘의 균형	누름성토공	누름성토공법	
		옹벽	부축구조 옹벽	돌쌓기 옹벽공, 블록 쌓기 옹벽공
			틀짜기구조 옹벽	#차형 조립공
	옹벽	중력식 옹벽	중력식 콘크리트 옹벽공	
		흙의 보강	보강토 공법	성토보강공, 보강토 옹벽공
			사면 다짐, 여음	미끄럼 방지 말뚝공
사면 다짐, 여음	앵커 공법	Earth Anchor, Rock Bolt		
	지 반 강 화 ~ 지반 개 량 ~	주입, 침투 에 의한 개 량	주입공법	이중관식 주입, 복합 주입
이온 교환 공법			이온교환공	
전기화학적 공법			전기침투공, 전기화학적 고결	
침가, 혼합 에 의한 개 량		시멘트 안정처리 공법	표층안정처리, 심층안정처리	
	석회 안정처리 공법	생석회 말뚝공		
열적 개량	소결 공법	강제통풍식, 자연통풍식		

## 제 7 장 내진설계

### ■ 지진의 종류

▶ 지진의 종류 : 인공+자연

- 인공지진 : 지중 화약/핵실험 등, 유발지진(induced earthquakes)이 있는데 이는 인공지진은 아니지만 인간의 행위가 원인이 되는 지진으로서,

③ 깊은 우물에 대량의 물을 주입하거나 높은 댐을 만들어 저수하면 그 부분에 지진이 일어나는 경우를 일컫는다.

- 자연지진 : 사람의 행위가 원인이 되지 않는 지진

▶ 자연지진의 종류 (구화합)

- 구조지진 : 대부분의 지진(힘의 원동력인 구조력(tectonic force)에 의하여 축적된 탄성에너지가 일시에 방출되는 현상에 기인)

- 화산지진 : 화산지역에서 화산폭발이 원인

- 함몰지진 : 지각 내부 어디에서 연약한 지반이나 공동이 내려앉으면서 발생

▶ 기타 구분에 의한 분류

- 진앙거리 : 진앙거리 600km를 기준으로 그보다 가까운 것은 근거리 지진으로, 먼 것은 원거리 지진으로 구분한다.

- 진원의 깊이 :

① 천발지진 : 진원의 깊이가 70km미만은 얕은지진 (shallow earthquake)

② 중발지진 : 70km~300km사이는 중간지진(intermediate earthquake)

③ 심발지진 : 300km이상은 깊은지진(deep earthquake)

- 시간과 규모 : ① 제한된 공간과 시간 내에서 상대적으로 규모가 가장 큰 지진을 본진이라 하고 그 앞에 나타난 지진은 전진, 그 뒤에 발생한 지진은 여진이라 한다. ② 본진이라 할 만한 지진이 없을 경우에는 이들을 통틀어 무리지진(군발지진, swarm) 혹은 지진군이라 한다. 또한 사람의 몸으로 느낄 수 없고 지진계에만 기록되는 지진을 무감지진, 사람이 느꼈으면 유감지진

### ■ 면진/제진/내진구조물

▶ 내진구조물 : 구조물 내에 보조적 부재(내진벽 등)를 설치

하여 지진에 견디게 만든 구조

▶ 제진구조물 : 구조물 자체에서 구조물의 진동과 반대되는 방향으로 인위적 힘을 가해 진동을 제어하는 설비를 갖춘 구조물

▶ 면진구조물

- 지반과 구조물 사이에 고무 등과 같은 절연체를 설치해서 지반의 진동에너지가 구조물에 크게 전파되지 않도록 구조물의 고유주기를 길게하거나

- 지진에 의해 발생된 진동이 구조물에 전달되지 않도록 한 구조물 (ex. 자기부상열차가 진동이 없는 이유)

### ■ 지반의 동적해석 모형

▶ 정의 : 동적하중에 대한 지반의 응답을 해석적으로 구하기 위한 모형.

▶ 종류 (반/질/중/유)

▶ 반무한 탄성체 모형

- 반무한 탄성체인 지반 내로 진동이 전달되는 파동효과 도입

- 비선형성 도입 등을 간편하게 하려고 질점계 모형으로 이행시키기도 함.

▶ 질점계 모형

- 층구조를 스프링과 대시포트로 접속한 질량으로 치환

- 모든 흙의 해석모형으로 쉽게 적용

▶ 중복반사모형

S파의 중복반사 이론을 적용시키기 위한 모형

- 등가선형모형을 사용하는 경우가 많음.

▶ 유한요소모형

- 연속체를 많은 요소로 분할하여 요소별 질량을 종합하고 대시포트와 스프링으로 접속되는 질점계 모형의 확장모형

- 3차원적 변화를 도입하는데 가장 적합

- 단점 : 해석시간이 길어진다.

### ■ 지진파

▶ 정의 : 암석의 파괴가 일어난 진원역으로부터 탄성체인 지구의 내부 또는 표면을 따라 전파되는 탄성파(elastic wave)를 지진파라 한다. 지진계에 기록되는 파형은 지진파가 통과하면서 일으키는 매질의 변형에 의한 것이다.

▶ 지진파의 분류 : 실체파(P/S파)와 표면파(LQ/LL파)로 대별

▶ P파 : 종파(longitudinal wave)

- 밀도의 소·밀에 의한 지각 변화파

- 음파와 같은 소밀파로서 모든 매질에서 전파됨

▶ S파 : 횡파(transverse wave)

- 밀도의 변화는 없이 지각의 변형만 있음.

- 진행방향에 수직인 횡운동에 의하여 액체내부(지구의 외핵과 내핵)는 통과할 수 없음.

▶ LQ파 (Love wave)

- 하층은 파동이 없고 윗부분만 파가 전달되며 밀도의 변화는 일어나지 않음

- Love파는 S파의 수평운동 성분인 SH파로서 수직운동 성분 지진계에는 거의 기록되지 않음.

▶ LR파 (Rayleigh wave)

- 밀도의 변화가 심하며 파동형식의 S파, P파의 복합적 성질을 보임

- P파와 S파의 수직운동 SV파가 조합된 성질을 가지며 수평운동 성분 지진계에는 거의 기록되지 않음

▶ 자유진동 : 큰 규모의 지진이 발생한 이후, 종이 울리고 난 것처럼 수일~수주간에 걸쳐 나타나는 지구 전체의 진동 → 체적변화를 수반하는 구상진동(spheroidal vibration)과 체적의 변화가 없는 뒤틀림진동(torsional vibration)으로 구분됨.

### ■ 터널의 지진대책

▶ 터널 지진대책 :

갱구부는 매시브한 구조

물보다 연성으로 변위에 적응성이 좋도록 함/편도압이 생기는 곳은 피하고 철근보강 측벽의R/B보강실시/사면붕괴는 교통에 큰 지장을 주므로 사면구배를 지진시에 대해 완만하게 또는 소일네일링과 같은 지진대응성이 큰보강재 사용/중양부는 취약구간에 대해 상대변위가 적고 지반과 일체거동이 되도록 R/B,R/A,그라우팅을 다소 과하게하여 피해경감하고 인성이 큰 섬유보강콘크리트 사용함이 요망됨

### ■ 응답변위법

응답변위법 : 해석방법-지진시 발생하는 변위를 고려하여 내진 검토하는 방법

순서 : 수지지상(수치해석하여 하중-변위파악, 지반반력계

수산정, 지진하중과 상시하중에 대한 단면결정)

### ■ 지반의 동적특성

#### ▶ 진동과 동하중

##### (1) 진동

절점이나 물체가 외력을 받아 평형위치에서 반복운동을 하는 현상을 진동이라고 한다.

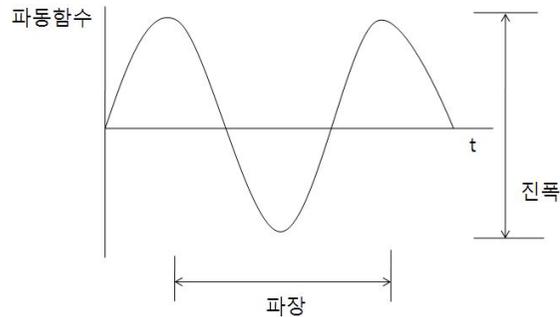
##### (2) 동하중

$P(t)$  = 하중(P)의 시간함수로 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d(P_t)}{dt} \neq 0$$

##### (3) 구분

- 1) 인위적 : ① 기계진동 ② 건설진동 ③ 발파
- 2) 자연적 : ① 지진 ② 바람 ③ 파랑
- (4) 진동의 공학적 성질



- ① 주기(T) : 주기운동을 하는데 걸리는 시간
- ② cycle : 한 주기동안 완료되는 운동
- ③ 주파수 : 단위시간 내에 일어나는 운동의 수

#### ▶ 지반내 파의 전파

##### (1) 개요

동하중이 지반에 전파되면

- ① 일부는 소모력으로 손실되며
- ② 잔여 에너지는 파동에너지 형태로 전파된다.

##### (2) 파동

- 1) 체적파(body wave) ① P파 ② S파
- 2) 표면파(surface wave) ① R파 ② L파
- (3) 파동에너지

##### 1) 진동에너지의 전파

진동에너지 → P파 > S파 > R파 형태로 전파 (속도 순)

##### 2) 에너지 부담률(진동부담율)

- ① P파 : 7%
- ② S파 : 26%
- ③ R파 : 67% (진동에 대단히 큰 영향을 미친다)

##### (4) 진동방지 대책(=방진대책)

##### 1) 개요

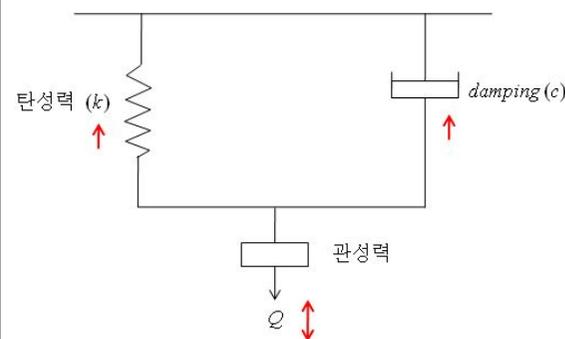
진동원-지반, 지반-수진구조물의 임피던스 특성 개선

##### 2) 방진대책

- ① 진동원 : 최종적으로 전달되는 동적하중의 강도를 낮추고 동시에 주파수 특성을 개선
- ② 수진구조물 : 기초 및 지하벽체 등과 상부구조의 접속부에 면진시스템
- ③ 지중전파 경로 : 진동원과 수진구조물 사이에 전파 자체를 억제하거나 차단하는 방법으로 방진구, 방진벽, 방진블록 등이 여기에 해당한다.

#### ▶ 지반의 동적해석

##### (1) 운동의 기본 방정식



$$Q = Mx'' + cx' + kx \text{ (가속도항+속도항+변위항)}$$

##### (2) 관성력

동적문제를 정적문제로 변환하기 위해 절점에 작용시켜 고려하는 힘.

##### (3) 공진

##### 1) 정의

구조물계 진동수와 외부하중에 의한 진동수가 같을 때 응답량이 급격히 증가하는 현상

##### 2) 특징

- ① 공진진동수 : 공진곡선의 최대치를 보이는 진동수
- ②  $h=0$ 일 때  $w/w_0=1$ 로 무한대 ( $w$  : 동적하중주기,  $w_0$  : 고유주기)

③ 감쇠정수  $h$ 가 커지면 공진진동수 감소

##### (4) 감쇠(damping)

- ① 기초지반에 지반계 운동(동적 거동) 작용시 에너지가 손실되는 현상으로 damping이라고 한다.
- ② 내부(재료) 감쇠 : 지반자체 내에서 에너지를 흡수하는 현상으로 마찰이나 점성에 기인한다.
- ③ 지하학적 감쇠 : 에너지가 확산거리에 따라 소산

##### (5) 이력곡선

동적하중 작용시  $\tau-\gamma$ 곡선을 형성(loop)하는데 이를 이력곡선이라고 하며 곡선을 이용하여

- ① 감쇠정수( $h$ )를 산정하고
- ② 전단탄성계수 기울기  $G$ 를 이용하여 지진응답해석을 한다.

##### (6) 내진설계

##### 1) 정의

지진력에 대해 안전하게 구조물을 설계하는 것

##### 2) 기본개념

- ① 지진의 강도와 발생빈도는 반비례
- ② 설계지진 : 최적화 설계

##### 3) 내진설계의 절차

- ① 지진위험도 설정 : 자료 및 관측데이터 분석
- ② 지진하중 산정

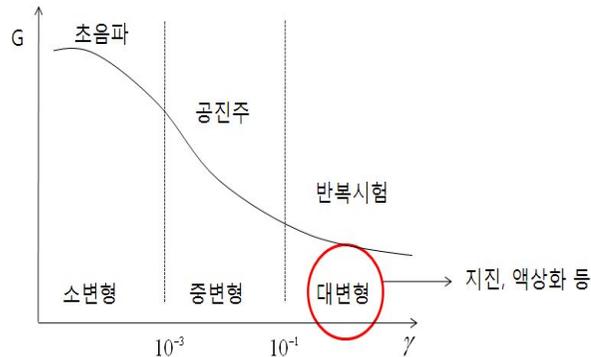
### ■ 지반의 동적 물성시험

#### ▶ 개요

① 동적물성치를 얻기 위한 시험 →  $E_d, G, \nu, D$  (이지누드 : 동

탄성계수, 전단탄성계수, 포아송비, 댐핑)

- ② 현장에서 대변형률을 얻기 어려우므로 → lab test를 실시하여 → 최대한 현장조건을 시뮬레이션하려는 것.
- ③ 특히 공진주 비틀전단시험은 0.0005%~0.5%의 전단변형률 범위에서 지반의 동적변형특성을 규명하기 위해 사용된다.
- ▶ 전단변형률에 의한 시험의 적용 범위
- ① 소변형률 측정 : 초음파  $\gamma < 10^{-3}$  (선형거동)
- ② 중변형률 측정 : 공진주  $10^{-3} \sim 10^{-1}$  (비선형거동)
- ③ 대변형률 측정 : 반복시험  $10^{-1}$  이하
- ▶ 동적물성을 얻기 위한 실내시험 (초공반-3단비)
- (1) 초음파시험



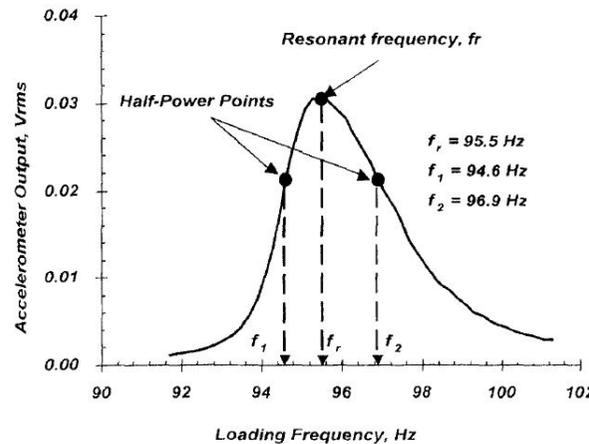
- 1) 개요
- ① 시료→가진→수진→  $V_p, V_s$  측정
- ② 미소변형(압만 등) → 동적물성
- ③ 결정적으로 damping 계산을 할 수 없으므로 → 타시험과 병행
- ④ 댐핑계산을 할 수 없다 → 문제점 → 타 시험과 병행해야 한다.

2) 동포아송비

- ① 구조물의 내진설계에 반드시 필요한 동포아송비를 구한다.
- ② 동포아송비  $\nu = \frac{1 - 2(\frac{V_s}{V_p})^2}{2 - 2(\frac{V_s}{V_p})^2}$  (p파의 속도가 s파보다 빠르다)

3) 전단탄성계수 및 동탄성계수

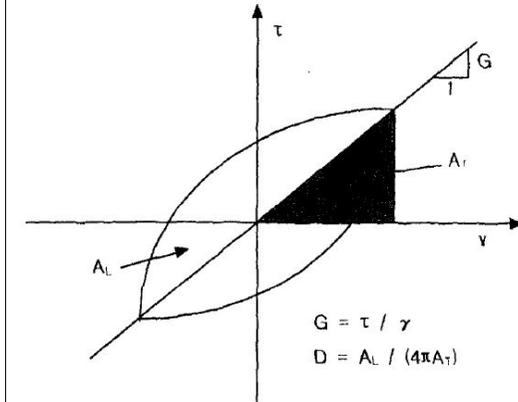
- ①  $G = \rho V_s^2 = \rho(fL)^2$
- ②  $E_d = 2G(1 + \nu)$
- (2) 공진주시험 (중진동, 비틀진동)
- 1) 중진동
- ① 중방향으로만 진동을 준다.
- ② 이 결과를 토대로 L(과장)과 주파수(f)의 관계를 이용하여 파의 속도를 구할 수 있다.  $V_s = f \cdot L \rightarrow$  이걸 알면  $G = \rho V_s^2 = \rho(fL)^2$ 으로 전단탄성계수를 구할 수 있다.



- ③  $\nu, G, E_d$ 를 결정된 후 댐핑을 구한다.
- ④  $D = \frac{f_1 - f_2}{2f_r}$  (여기서,  $f_1, f_2$ 는 각각 최대과장의 70%를 연결한 선이 주파수 곡선과 만남 점이고  $f_r$ 는 최대과장일 때의 주파수값)
- ⑤ 댐핑을 구하는 방법은 두 가지가 있는데 하나는 오실로스코프를 이용하는 자유진동감쇠법과 half-power bandwidth법 두 가지가 있다.
- Half-power bandwidth법에 의한 경우 감쇠비가 작고 A를 0.707max로 하여 간단히 표현하는 방법이다.

2) 비틀진동

- ①  $\tau - \gamma$  관계그래프(전단응력과 전단변형률)에 골격곡선과 이력곡선을 그린 후  $A_T, A_L$ 을 그린다.
- ② 골격곡선의 기울기는 G이다. → E를 구한다.
- ③  $E = 2G(1 + \nu)$
- ④ 댐핑 :  $D = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_T}$



- ⑤ 비틀전단시험에서는 hysteretic 감쇠비를 측정한다.
- 3) 반복시험 (3단비) : 모두 궁극적으로 GDE를 구한다.
- ① 반복3축압축시험
- ② 반복단순전단시험
- ③ 반복비틀전단시험
- 반복시험에서는 공통적으로 hysteretic damping이 얻어지므로 궁극적으로 비틀전단과 같은 식으로 감쇠비를 얻을 수 있다.
- ▶ 현장시험
- (1) 개요
- 가진(소스 : 폭약 or 총포, 해머 등) → 수진하여 P,S파를 분석
- (2) 방법별 특징
- 1) UP-hole
- ① 흙의 공내에 가진장치 부착, 지표에 수진장치 부착
- ② P파와 S파의 속도를 이용하여 동포아송비를 구하고
- ③ 포아송비를 이용하여 전단탄성계수를 구한다.

- ④  $E_d$ 를 구한다.
- ⑤ 지층에서 발파 등을 하는 것이 도심지 측정에 적합(지표보다 상대적으로 진동이 덜 발생)
- 2) down-hole
- ① 업홀과 반대로 부작
- ② 나머지 과정은 동일하다.
- 3) cross-hole
- ① 천공을 두 개하여 공과 공사이를 관통하는 파를 측정
- ② 지층 구성부 파악이 가장 용이 but 가장 고가

※ 공식 암기

$$\textcircled{1} \text{ 포아송비 } \nu = \frac{1 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}$$

③  $G = \rho V_s^2 = \rho(fL)^2$  (G는 로( $\rho$ )붓스파블) 속도는=주파수×거리

④  $E_d = 2G(1 + \nu)$  (E=이지완플루)

$$D = \frac{f_1 - f_2}{2f_r} \text{ (조음파는 어차피 댐핑계산이 안되므로 공진주시협 중 중진동에만 해당)}$$

$$D = \frac{1}{4r} \frac{A_L}{A_T} \text{ (최소한 비틀거나 반복해야 이력곡선이 나오므로 조음파와 중진동만 제외하고 나머지는 이 식을 사용)}$$

## ■ Liquefaction

▶ 개요

- ① Loose and saturated soil → earthquake와 같은 순간적 진동 → 비배수조건인 과잉간극수압이 발생하는 현상(전단강도 상실)
- ② 지반구조물의 침하 및 측방파괴 등의 피해 수반
- ③ Alaska 지진(진도 8.6) 이후 액상화 연구 가속화

✓ 액상화의 조건 : 느포점입

- ① 느슨 ② 포화 ③ 점성소실 ④ 입도불량지반

▶ 액상화의 특징

- ① 실트, 점토에서는 발생하지 않고 포화된 사질토 지반에서

발생

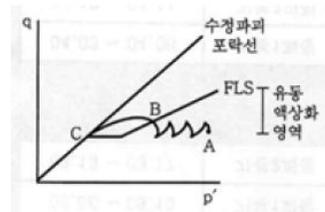
- ② 1차적으로 지진영향을 받는 매개체로서의 지반특성상 → 광범위하게 발생
- ③ 고배대지진에서 사질토로 매립한 연안지역 피해 막심
- ④ 국내의 경우 화강풍화토 지반이 많지만 → 연안개발로 이에 대비
- ⑤ 지하수위가 높을수록 발생확률이 높다.
- ⑥ 진도 5이상의 지진시
- ⑦ 과거 액상화 이력이 있는 지역

▶ 액상화의 발생 메커니즘

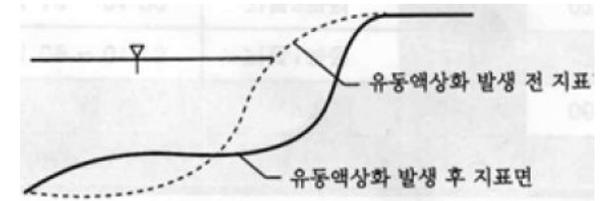
- ① 지진하중 → 순간적으로 배수가 허용되지 않아서 → 과잉간극수압으로 → 지반의 전단저항 저하 or 상실
- ② <그림>에서 자유배수가 허용된 상태에서 진동하중을 주면 점 A가 B로 이동(간극수가 배수되어서) → but 비배수상태로 간주시 → 부피감소가 없으므로 응력상태는 점 C로 이동
- ③ 급속재하를 받아 발생하게 되는 과잉간극수압( $\Delta u$ )이 초기 응력과 같아짐에 따라 흙의 유효응력이 0이 된 상태에서 발생한다.

▶ 흐름액상화와 반복유동

- (1) 흐름액상화(flow liquefaction)=유동액상화=전반파괴
- ① 흐름 액상화는, 액상화와 관련된 피해 중 가장 극적인 피해인 흐름 파괴(flow failure)를 유발한다.
- ② 지반내 정적전단응력 > 액상화 상태의 전단강도인 경우 → 발생
- ③ 일단 흐름 액상화가 진행되면 큰 변형이 발생하고 상당히 빨리 이동하며 먼 거리까지 이동한다.
- ④ 대규모 변형 → damage 규모가 큼.
- ⑤ 지진이 계속되는 동안 or 종료 후 발생 → loose sand
- ⑥ 주로 경사지에서 발생



- A: 초기상태 응력점  
B: 유동액상화 시작점  
C: 정상상태점

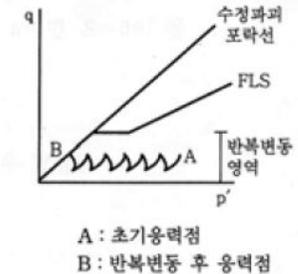


(2) 반복 유동(cyclic mobility)=진행성 연화

✓ 반복유동

일정함수비에서 반복작용

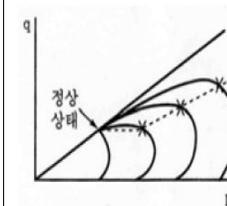
- 정적전단응력 < 전단강도 인데도 파괴가 일어난다.
- 파이프라인같은 선상구조물 피해가 크다.



- ① 정적전단응력이 액상화 상태의 전단강도보다 적은 상태에서 발생하는 진행성 연화현상
- ② 급작스럽게 진행되는 흐름 액상화와는 달리 반복 유동은 차츰 차츰 발달하여 → 측방확산(lateral spreading)이라고 불린다. → 물에 인접한 평지나 완경사 지반에서 발생
- ③ 변형은 지진 계속되는 동안 점차적으로 증가
- ④ loose sand, dense sand에서 모두 발생 가능

★ 유동액상화면

유동액상화면 (FLS)



- 유효응력경로가 원두점 x점에서 유동액상화가 시작됨
- x점에서 정상상태로 급히 변형됨
- 유동액상화의 시작점을 연결하면 직선이 됨

▶ 액상화의 예측방법

- 1) 과거의 경험
- 2) 항타후 간극수압과 가속도를 측정하여 액상화 저항을 판정
- 3) 모형시험
- 4) 지반내 전단응력과 흙의 액상화 저항을 비교

▶ 액상화에 대한 대책

- 1) 구조물 축조시 위험지역을 회피
- 2) 대책공법을 적용
  - ① 파일이나 앵커
  - ② 배관의 연성이음
  - ③ 낙교방지 등
- 3) 밀도증대 도모
  - ① 동다짐 ② 바이브로 플로테이션
- 4) 지하수위의 지하로 유효응력 증가
- 5) 입도개량 또는 약액 주입
- 6) 쇄석 트레인으로 간극수압 소산
- 7) 전단변형의 억제를 도모
  - ① 시트 파일 ② 슬러리 월 ③ 샌드층을 고립

▶ 평가

- 1) 액상화 발생가능 지반
- 1) 입도분포 나쁜 사질토
- 2) 지하수위가 지표면에서 2~3m 이내
- 3) 충적지나 매립지
- 4) 발생부위 : 지표면하 15~20m
- 5) 통일분류법 : SP, SP-SM, SP-SC (주로 불량입도의 모래지반)

■ 액상화 평가가 생략될 수 있는 지반

- (1) 액상화의 예측 및 판정은 붕괴방지 수준에서 행한다.
- (2) 설계지진 규모는 지진구역 I, II 모두에 대하여 리히터 규모 6.5를 적용한다.
- (3) 내진II등급의 시설물에 대해서는 Seed와 Idriss(1971)의 간편법에 근거한 액상화 간편법을 적용하여 예측·판정할수 있다. 단, 내진II등급의 간편법에 의한 판정결과 안전율이 1.5 미만이든가 내진 I 등급 시설물은 액상화의 상세 예측법을 적용하여 판정하여야 하며, 이 경우 허용안전율은 1.0을 기준한다.
- (4) 다음의 경우에는 액상화 평가를 생략할 수 있다.

다음의 경우에는 액상화 평가를 생략할 수 있다.

- ① 지진구역 II에서의 내진II등급 항만구조물
- ② 지하수위 위의 지반
- ③ 주상도상의 표준관입저항치(N)가 20 이상인 지반
- ④ 대상지반심도가 20m 이하인 지반  
(단, 20m 이상인 지반이라도 액상화가 발생하는 경우에 구조물에 중대한 손상이 생긴다고 판단되거나, 분명히 상부 20m 토층과 연관이 있는 층이라고 판단되는 경우는 액상화 예측·판정을 시행한다.)
- ⑤ 소성지수(PI)가 10 이상이고 점토성분이 20% 이상인 지반
- ⑥ 세립토 함유량이 35% 이상인 경우
- ⑦ 상대밀도가 80% 이상인 지반
- ⑧ 지층분류가 SA~SD인 지반

## 제 8 장 압밀론

### ■ 압밀의 개요

#### ▶ 침하

- 즉시침하 (탄성침하)
- 압밀침하 (장기침하)
- 소성침하

#### ▶ Terzaghi의 1차원 압밀가정 : 일12비균포간다

- ① 투수계수와 흙의 성질 일정
- ② 1축 방향으로 배수되며 흙도 압축
- ③ 2축 방향은 배수 및 압축이 성립하지 않는다.
- ④ 흙은 비압축성이다.
- ⑤ homogeneous
- ⑥ 간극은 완전포화상태
- ⑦ Darcy의 법칙이 성립

▶ 압밀방정식 : 점토층의 미소 직육면체에 대해 고려하면 단위시간에 미소 직육면체로부터 유출되는 유출물은 간극의 감소율과 동일하므로 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}$$

$$C_v = \frac{K}{m_v \gamma_w} = \frac{K(1+e)}{a_v \gamma_w}$$

### ■ 압밀시험의 종류 및 방법

#### ▶ 목적 (압축특성/투수성/1차압밀비)

- 흙의 압축특성 산정 :

- ①  $C_c$  ( $e-\log P$  곡선에서)
- ② 침하속도 :  $C_v$  ( $t-d$  곡선에서)
- ③ 흙의 이력상태 파악 :  $P_c$  ( $e-\log P$  곡선에서)

- 흙의 투수성 파악

$K = C_v m_v \gamma_w$  에서  $K$ 를 구한다.

- 1차 압밀비 계산

#### ▶ 압밀시험의 종류

- ① 표준 압밀시험 : Terzaghi의 이론에 의한 방법으로 KS F 2316에 규정된 방법이다, 최소 7일의 시간의 소요되나 가장 일반적으로 사용된다.

② 급속 압밀시험 : 단 하루만에 종료할 수도 있으나 흙에 따른 적용성이 문제가 되어 별로 사용되지 않는다.

#### ③ Rowe Cell 압밀시험

##### ▶ 압밀시험 방법

① 연약지반의 boring hole에서 채취한 자연상태의 불교란 시료를 조심스레 sampling하여 운반한 후 트리밍을 한다. N값이 너무 크거나 sand, gravel이 있는 경우는 sampling이 어렵고 너무 작아도 문제가 있다.

② 불교란 시료를 직경 6cm, 높이 2cm의 공시체를 만들어 압밀링에 넣은 후 압밀상자에 세팅한다.

③ 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8(kgf/cm<sup>2</sup>)의 단계마다 24시간 압밀하여 다이얼계이기로 15", 30", 1', 1.5', 2', 2.5', 4', 9', 16', 25', 36', 49', .....1440'으로 리딩한다.

④ 최종 단계의 압밀이 끝나면 거꾸로 재하를 풀어 리바운드 커브를 그린다.

⑤ 시험 전에 함수비를 측정하고 토성시험도 한다.

⑥ 침하 읽음값으로  $e-\log P$  곡선과  $t-d$  곡선을 그려 압밀시험에서 토질정수  $a_v, m_v, C_v, K, P_c$  등을 구한다.

### ■ 압밀시험의 결과정리

#### ▶ 압밀시험의 결과정리

-  $e-\log P$  곡선에서  $C_c, P_c, OCR$  등을 구한다.

$$e = \frac{H-H_s}{H_s} - \frac{R}{H_s}$$

- 각 단계별로 시간-침하곡선( $t-d$  곡선)을  $\sqrt{t}$  법이나  $\log t$  법으로 그려서  $C_v$ 를 구한다.

- 압밀비 및 투수계수  $K$ 를 구한다.

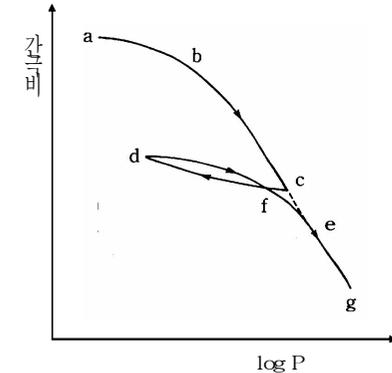
#### ▶ $e-\log P$ 곡선

- 선행 압밀하중 : 시료가 과거에 받은 최대 유효 상재하중

- 과압밀비 :  $OCR = \frac{P_c}{P_o}$

- 정규압밀 점토 : OCR이 1이다.

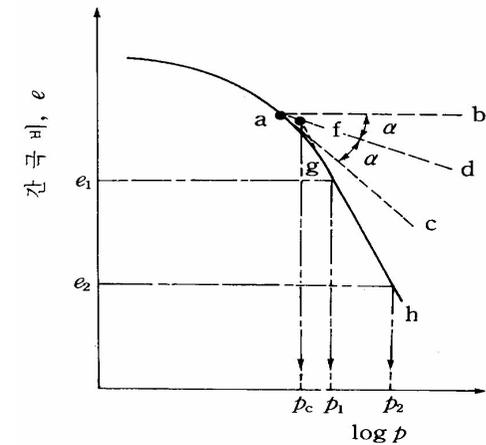
- 과압밀 점토 : 현재의 유효 상재하중이 그 흙이 과거에 받았던 최대 압축하중보다 더 작을 때를 말하며, OCR이 1보다 큰 경우이다.



- 과압밀 점토는 특이한 경우를 제외하고 공학적으로 제일 안정된 지반이다.

-  $e-\log p$  곡선영향 : (시료교란, 링측면마찰, 재하기간, 하중증가율)

▶ 선행압밀하중 발생원인 : (응력변화, 간극수압변화, 구조)



#### ▶ 압축지수 ( $C_c$ : Compression index)

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{P_2}{P_1}}$$

-  $C_c$ 값은 점성토가 크고 사질토는 작다.

- 교란시료의  $C_c$ 값은 나타내지 않는다.

- Cc값을 이용한 침하량 Sc의 산정

$$S_c = \frac{C_c}{1+e} \log \frac{P_2}{P_1} \times H = \frac{0.435}{P(1+e)} C_c \Delta P H$$

$$P = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)$$

▶ LL에 의한 Cc값의 추정 (Skempton의 공식)

- 불교란 시료 :  $C_c = 0.009(LL - 10)$

- 교란시료 :  $C_c = 0.007(LL - 10)$

- Skempton의 공식은 예민비가 작은 점토에 적용되며 유기토나 LL>100%인 흙, 자연함수비>LL인 예민한 흙에서는 적용이 불가능하다.

-  $C_c = \frac{w_u}{100}$ 도 예민비 점토시에는 유용하게 사용

▶ 부피 변화계수  $m_v$

$$m_v = \frac{\frac{\Delta V_v}{V}}{\Delta P} = \frac{\Delta V_v}{V \Delta P} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot \frac{1}{P_2 - P_1}$$

$$= \frac{a_v}{1 + e_1} (cm^2/kg)$$

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{-\Delta e}{\Delta P} (cm^2/kg)$$

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{C_c}{P_2 - P_1} \log \frac{P_2}{P_1}$$

▶ 투수계수(K) :  $K = C_v m_v \gamma_w$

▶ 시간-침하곡선(t-d 곡선) :  $C_v$ 를 구하는 방법에는  $\sqrt{t}$  법과  $\log t$  법이 있다. 보통 두 방법의 평균값이 타당한  $C_v$ 값이지만, 간편하게  $\sqrt{t}$  법이 많이 이용되고 있다.

▶  $\sqrt{t}$  법

$$- r_p = \frac{10}{9}(d_{90} - d_0)$$

$$- C_v = \frac{T_v H^2}{t_{90}} = \frac{0.048 H^2}{t_{90}} (cm^2/kg)$$

▶  $\log t$  법

$$- C_v = \frac{T_v H^2}{t_{50}} = \frac{0.196 H^2}{t_{50}} (cm^2/kg)$$

### ■ 압밀시험 예측치와 실측치 차이

▶ 예측치보다 적게 발생하는 경우

- (예측치보다 적게 발생) 물성치 부적절산정, 과압밀 지반을 정규압밀 점토로 판단, Sand seam 분포 무시, 다차원 압밀조건을 1차원으로 계산, 교란영향 무시, 연직배수재 영향무시

▶ 예측치보다 크게 발생하는 경우

- (피압 무시/압밀층 파소평가/급속성토/침하 무시)

### ■ CRS 압밀시험

▶ 개요 : 일정변형을 압밀시험이라고도 한다.

- 표준압밀 장시간을 요함.

- CRS는 하중 재하시 발생하는 과잉공극수압이 시료의 압밀에 영향을 주지 않는 범위 내에서 하중재하속도를 일정수준까지 높이므로 빠른 시간 내에 압밀을 완료.

- 표준압밀시험의 문제점인 강성가압관으로 불균등하게 응력이 분포, 링마찰

- 간극수압측정, 수평배수가 불가능 하여 → 단계하중만 가할 수 있는 문제점을 보완한 압밀시험이다.

▶ 표준압밀시험의 문제점 (강/마/수/하)

- ① 강성가압관 → 불균등한 응력 분포
- ② 링의 측면마찰 → 침하게 작게 산정
- ③ 간극수압측정, 수평배수가 불가능
- ④ 단계하중만 가할 수 있다.

▶ Rowe Cell 시험의 특징

- ① 직경이 큰 시료(D=25cm)도 시험 가능하다.
- ② 간극수압 측정이 가능
- ③ 시험기간 단축
- ④ 시험결과 신뢰성 높다.
- ⑤ 배압을 가할 수 있다.
- ⑥ 멤브레인을 통해 가습으로 시료구속 영향이 경감
- ⑦ 수평방향 압밀계수( $C_h$ )의 측정이 가능

CRS는 Rowe Cell을 이용한 압밀시험 중 하나로, 일정 속도로 시료의 수직변형을 발생시키는 시험방법 → 최근 여러나라에서 표준시험법으로 채택되어 기존 시험의 대안으로 인정.

### ■ 정규압밀과 과압밀 특성

▶ 정규압밀/과압밀특성

(액성한계, 간극수압, 지토압계수, 체적, 간극수압)

### ■ 3차원 압밀

▶ 개요

① 3차원압밀(3-dimensional consolidation)이란 입자골격의 변형 및 간극수의 유동이 3차원적으로 생기는 압밀을 말한다.

② 점토층에 부분적으로 재하하면 연직방향의 압축과 함께 측방으로도 압축 변형되므로 구조물의 침하도 1차원압밀보다 그만큼 많아진다. 또한 재하에 의하여 점토층에 발생하는 과잉간극수압에 의하여 간극수는 점토층의 연직방향과 구조물하중을 받지 않는 부분의 방향으로 배수가 되는데 이러한 상태의 압밀은 3차원적인 압축과 3차원적인 간극수 흐름에 의하여 생기므로 이를 3차원압밀이라 한다.

③ 이 때 1방향에 변화가 없으면 2차원압밀로 되며, 양자를 총칭하여 다차원압밀이라 부르는 경우도 있다.

▶ Terzaghi의 1차원 압밀방정식

① 점토층의 미소 6면체에 대해 고려하면 단위시간에 미소육면체로부터 유출되는 유출물은 간극의 감소율과 동일하다는 의미의 1차원 방정식을 유도

$$② C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

▶ 2차원 압밀

테르자기의 1차원 압밀이론을 확장한 것으로 탄성압밀론과 차이가 없으나 변형에 관해서 비선형성과 시간의존성을 추가해서 대단히 복잡해지므로 실제 문제에 적용하기가 매우 어렵다.

▶ Boit의 3차원 압밀방정식

① 3차원 압밀 방정식은 테르자기의 방정식을 그대로 3차원으로 확장한 열전도형 방정식과 Biot의 방정식이 있다.

② Biot의 이론은 지반을 탄소성(한계상태)체라고 가정하며 3차원이 흙과 물의 연성거동을 나타내는 기초방정식이다.

③ 테르자기가 압밀이론을 정립함에 있어 경계조건과 변형조건에 관한 가정을 두어 특정의 경우에 대해 취급한 반면 Biot는 몇 가지 기본가정을 두고, 정연하고 수학적으로 이해가능한 힘의 평형방정식과 유체의 연속방정식으로 구분된 2가지의 수식으로 압밀이론을 일반적으로 취급하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

### ■ 1차원 압밀방정식의 유도

▶ 식의 유도

$$\textcircled{1} \text{ 이미 유도된 2차원 라플라스 침투방정식 } K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

에 대해서 생각해 보자. 침투방정식에서는 지하수의 흐름을 연속방정식과 Darcy의 법칙이 성립한다는 전제에서 출발해서 유량변화가 없다고 보았다. 그러나 압밀의 경우에는 간극수의 변화가 없다고 하면 도대체가 압밀이 일어나지 않을 것이므로 간극 내의 간극수가 배출된다고 수학적으로 표현해 준다. 간극수가 배출된다는 것은 곧 체적의 감소를 의미한다. 뒤에 따라?

시간에 따라서... 그러므로  $\frac{\partial V}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$  라는 편미분이 나오는 것이다. (역시 라플라스 방정식을 1차원적으로 생각한 것이다.)

$$\textcircled{2} \quad \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{e}{1+e} = \frac{\partial e}{\partial t} \frac{1}{1+e} = \frac{\partial \Delta p}{\partial t} \frac{a_v}{1+e} \quad (a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \text{에서 } \Delta e = a_v \cdot \Delta p)$$

$$= \frac{\partial \Delta p}{\partial t} \cdot m_v = \frac{\partial u_e}{\partial t} \cdot m_v$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{\partial V}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \text{에서 우변에 대해서만 생각해 보자.}$$

$$\textcircled{4} \quad u_e = \gamma_w h_w \text{에서 } h_w = \frac{u_e}{\gamma_w} \text{이므로 이를 } \textcircled{3} \text{에 대입하면}$$

$$\textcircled{5} \quad K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{K_z}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

$$\textcircled{6} \quad \frac{\partial u_e}{\partial t} \cdot m_v = \frac{K_z}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \text{ (}\textcircled{2} \text{와 } \textcircled{5} \text{에서의 결과치만) 여기서 좌변의}$$

$m_v$ 를 소거해 주기 위해 우변에  $m_v$ 를 곱어들이기 위해

$$K_z = C_z m_v \gamma_w \text{에서 } \gamma_w = \frac{K_z}{C_z m_v} \text{를 } \textcircled{6} \text{의 우변에 대입한다.}$$

$$\textcircled{7} \quad \frac{\partial u_e}{\partial t} \cdot m_v = \frac{K_z}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{K_z}{C_z m_v} \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = C_z m_v \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

$$\textcircled{8} \quad \frac{\partial u_e}{\partial t} \cdot m_v = C_z m_v \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \text{에서 } \frac{\partial u_e}{\partial t} = C_z \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

$$\therefore \frac{\partial u_e}{\partial t} = C_z \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \rightarrow \text{1차원 압밀방정식}$$

▶ 공학적 의미

미소시간당 유출량은 수직방향 압밀계수(coefficient of consolidation)에 비례하고 배수거리의 제곱에 비례한다.

$$t = \frac{T_v H^2}{C_v}$$

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = C_z \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \text{을 시간에 대해 정리해 보면 } \partial t = \frac{\partial u_e \partial z^2}{C_z \partial^2 u_e} \text{에서}$$

$$\frac{\partial u_e}{\partial^2 u_e} \text{를 시간에 대한 계수 } T_v \text{로 보면 임의 압밀시간에서}$$

$$t = \frac{T_v H^2}{C_v} \text{과 동일한 형태가 됨을 알 수 있다.}$$

### ■ 압밀시험 결과의 이용

▶ 압밀침하량

(1) 정규압밀 점토

$$\Delta H = m_v \Delta PH = \frac{a_v}{1+e} \cdot \Delta PH = \frac{\Delta P}{1+e} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta P} \cdot H = \frac{\Delta e}{1+e} \cdot H$$

$$= \frac{C_c}{1+e} \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \cdot H$$

(2) 과압밀 점토

1)  $P_1 < P_c < P_1 + \Delta P$

$$\Delta H = \frac{C_s}{1+e} \log \frac{P_c}{P_1} H + \frac{C_c}{1+e} \log \frac{P_1 + \Delta P}{P_c} H$$

2)  $P_1 + \Delta P < P_c$

$$\Delta H = \frac{C_s}{1+e} \log \frac{P_1 + \Delta P}{P_1} H$$

$$\text{▶ 압밀소요시간 : } t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v}$$

$$\text{▶ 임의시간에서의 압밀침하량 : } \Delta H_t = U \Delta H$$

▶ 압밀도

(1) 압밀도

$$\textcircled{1} U_z = \frac{u_i - u}{u_i} \times 100\% \quad \textcircled{2} U_z = \frac{P - u}{P} \times 100\%$$

여기서,

$U_z$  : 깊이  $z$ 에서의 압밀도,  $u_i$  : 초기 과잉간극수압,  $u$  :

임의 점의 과잉간극수압,  $P$  : 점토층에 가해진 압력

(2) 평균압밀도

1) 근사식

① 점토층 전체의 압밀도를 평균압밀도라고 한다.

② 평균압밀도와 시간계수의 관계는 Terzaghi의 근사식을 사용한다.

$$\textcircled{3} 0 < \bar{U} < 53\% : T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{\bar{U}}{100} \right)^2$$

$$\textcircled{4} 54\% < \bar{U} < 100\% : T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - \bar{U})$$

$$2) \bar{U} = \frac{S_{ct}}{S_c}$$

$\bar{U}$  : 평균압밀도,  $S_c$  : 전 압밀침하량,  $S_{ct}$  :  $t$  시간에서의 압밀침하량

3) 면적에 의한 평균 압밀도

$$\textcircled{1} \bar{U} = \frac{B}{A+B}$$

② A : 현재의 과잉간극수압 면적, B : 간극수압 소산면적

### ■ 정규압밀점토에서 C/P Ratio

▶ 개요

① 비배수 전단강도는 흙의 고유특성은 아니지만 점토의 연경도를 표현하는데 이용되며 시험의 형태나 경계조건, 재하율, 초기응력상태 등의 영향을 받는다.

② 비배수 전단강도가 응력 의존성이므로 일반적으로 비배수 전단강도가 측정되는 연직유효 상재압력에 대해 정규화 된다. 즉, 연직유효 상재압력에 대한 비배수전단강도의 비율은 강도

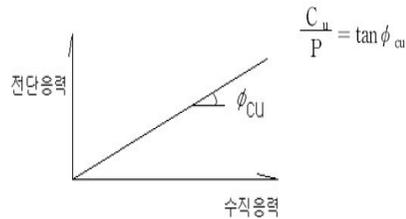
증가율(c/p)로 표현된다.

③ 정규압밀점토의 c/p비란 하중증가율 비를 의미하는 것으로 비배수 전단강도 시험과  $\overline{CU}$ 시험과 CU시험, 경험적 방법에 의해서 비를 산정한다.

▶ 산정방법

정규압밀점토의 c/p비를 산정하는 방법은 비배수전단강도와 Skempton 및 Hansbo의 경험식에 의한 방법으로 크게 구분할 수 있다.

(1) 비배수 강도정수를 이용하는 방법



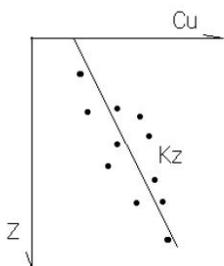
배수를 허용하지 않는 조건이므로 1축 및 3축 압축시험결과가 이용되나 3축 시험 중 CD는 배수시험이므로 제외된다. 따라서 비배수전단강도에 해당하는 것은

- ① 1축압축시험
- ② UU 삼축시험
- ③ CU 삼축시험

④  $\overline{CU}$  삼축시험 :  $\frac{C_u}{P} = \frac{\sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (A_f = 1)$

⑤ 정적사운딩 (베피다이징) (Vane/피조콘/정적사운딩/다이랴토미터) : 각종 사운딩 결과값은 그대로 이용하면 안되고 UU test 결과와 비교 후 적용해야 함.

$$\frac{c_u}{P} = \frac{K}{\gamma_{sub}} \quad (C_u = Kz, \quad P = \gamma_{sub}z)$$



(2) 경험식을 이용하는 방법

1) 소성지수를 이용하는 방법

- ① Skempton은 정규압밀 점토의 현장배수시험에서 결정된 비배수전단강도와 소성지수의 관계를 제안하였다.
- ② 강도증가율 (a)=0.11+0.0037PI 단, 소성지수가 10이상이어야 한다.
- ③ 높은 액성지수의 예민성 점토는 비배수전단강도와 소성지수의 관계가 잘 맞지 않으며
- ④ 이 경우 강도증가율은 액성지수와 관계가 더 바람직하다고 보고된다.

2) 액성한계를 이용하는 방법

- ① Hansbo는 액성한계를 이용하여 다음 식을 제안하였다.
- ② 강도증가율 (a)=0.45LL (LL은 40 이상)

3. 평가

- ① 1축압축시험이 과소평가 되는 이유는 시료교란의 영향이다.
- ② CU,  $\overline{CU}$ 가 과대평가되는 이유는 등방압밀로 인한 것이므로 적용은 85~90% 정도를 하는 것이 좋겠다.
- ③ 합리적 시험방향은
  - 현장응력조건을 고려한 삼축시험이 요구되며
  - 교란영향 배제, 현장응력 조건을 고려한 SHANSEP 방법의 적용 검토
- ④ 강도증가율은 0.2~0.3 범위가 우세하며 적용시 신중한 검토가 요망됨.
- ⑤ 실제시공시 기대한 만큼 강도증가가 발생하지 않으면 사면 붕괴, 과대변위 발생, 사면안정대책 등이 필요해 지므로
- ⑥ 측정시 다소 보수적으로 평가하고 필요시 시험시공, 시공사례, 개량강도 확인 등으로 조정함이 좋겠다.

■ K<sub>0</sub> 압밀

▶ 개요

- ① 반무한한 넓이의 지표에 하중을 가하면 흙의 압축이 연직방향으로만 발생하고 수평방향으로는 상대적으로 작은 변형이 발생
- ② 그런데 수평방향 변형은 공학적으로 무시해도 좋을 정도이므로 수평방향으로는 변형이 없이 정지상태를 유지한다고 가정

③ 이러한 자연조건을 가장 근사적으로 시뮬레이션하는 방법은 시료를 강성이 큰 압밀링에 넣고 시료의 횡방향 변형을 실제의 1차원 압밀상태를 재현하게 된다.

④ 이처럼 실제의 자연지반의 압밀상태와 같이 3축시험에서 공시체의 반경방향으로 변형이 일어나지 않는 조건에서 압밀하는 것을 K<sub>0</sub>압밀이라고 한다.

⑤ K<sub>0</sub>압밀은 압밀시험 및 비등방 3축압축 시험에서 현장조건과 일치시키기 위해 사용된다.

▶ 결과의 보정

① 그림 실제로는 어떤가? 만일 이 가정처럼 수평변형이 무시되어도 좋다면 측방변위가 전혀 생겨서는 안되지만, 실제로는 측방변위가 발생되며 초기 과잉간극수압은 A값에 의해 좌우된다. (기초가 두꺼운 점토에 설치되는 경우)

② 점토지반 내의 한 점에서 초기과잉간극수압은

$$u_i = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

여기서,  $1 > A > 0$ 이면,  $u_i > \sigma_3$

A = 1이면,  $u_i = \Delta\sigma_1$ 이다.

③ A는 점토의 종류, 응력 크기에 따라 달라지는 값이며 층을 분할해서 침하량을 산정하는 경우 1차 압밀의 침하량은 다음과 같다.

$$\text{가. } S_{ocd} = \int_0^H m_v \Delta\sigma_1 dz$$

$$\text{나. } S_c = \int_0^H m_v \Delta\sigma_1 [A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} (1-A)] dz$$

$\beta = \frac{S_c}{S_{ocd}}$ 를 침하비라 정의하면 간극수압계수에 따른 압밀침하량은  $S_c = \beta S_{ocd}$ 로부터 구할 수 있다.

■ 자중압밀

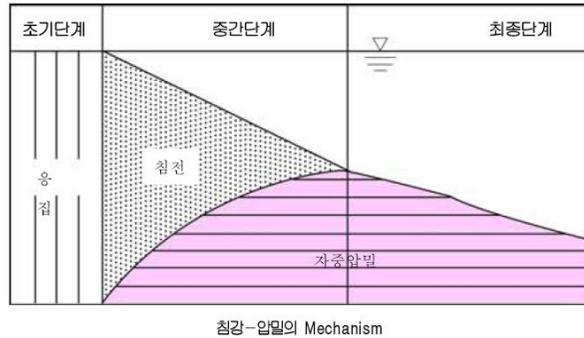
▶ 개요

자중압밀(self-weight consolidation)이란 함수비가 많아 액상에 가까운 점토가 자중에 의하여 압밀되는 현상. 해저의 점토를 준설하여 매립지에 투입할 경우 등에서 생긴다.

▶ 자중압밀의 원리

- ① 초기단계 : 침전은 발생하지 않고 floc(응집)의 형성과정임.

- ② 중간단계 : floc이 점차로 침전하여 압밀이 시작되고 침전 물이 점진적으로 증가하면서 상부의 침전영역은 점점 좁아져 없어지게 됨.
- ③ 최종단계 : 모든 침전물이 자중압밀하에 있게 되며, 자중압 밀이 완료된 상태에 도달함.



▶ 자중압밀의 효과

- ① 점토입자는 입자크기가 매우 작고 중량이 작고 표면적이 크므로 침강하기 보다는 자유로이 떠도는 형태, 즉 Brown 운동을 함.
- ② 실제로는 토입자들이 응집(Floc)되어 중량이 커져 침강하게 되며 stokes 법칙( $v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} \cdot d^2$ )보다 수십~수백배의 큰 속도로 침강한다.
- ③ 현장부근의 점성토를 이용하므로 매립재의 양적확보 가능, 토취로 인한 환경피해, 산사태 문제 해결이 가능하며 방류로 인한 피해방지 됨.
- ④ 국내사례로 마산항 공유수면 매립, 울촌 산업단지 등에서 자중압밀을 이용하여 부지조성하고 있음.

▶ 자중압밀의 문제점

- ① 초연약지반형성으로 장비진입을 위한 표층처리공법의 필요.
- ② 자중압밀시험, 현장 대형 토조시험 등이 필요.
- ③ 배토관거리에 따라 입자크기가 달라지므로 균질한 부지조성이 곤란함.

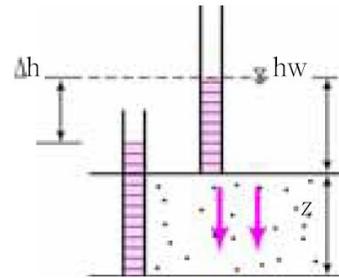
■ Hydraulic Consolidation

▶ 개요

침투압밀(Hydraulic consolidation)이란 ① 지반중의 두 점사

이에 물이 흐르면 수두차가 발생하게 되어 침투수로 인해 유효 응력의 변화가 생긴.

- ② 그림과 같이 하향흐름시 유효응력은 정수상태보다 유효응력이  $\Delta h \cdot \gamma_w$  만큼 증가 됨.



전응력 :  $\sigma = h_w \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}$

간극수압 :  $u = h_w \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_w - \Delta h \cdot \gamma_w$

유효응력 :  $\bar{\sigma} = \sigma - u = z \cdot \gamma_{sub} + \Delta h \cdot \gamma_w$

▶ 투압밀의 효과

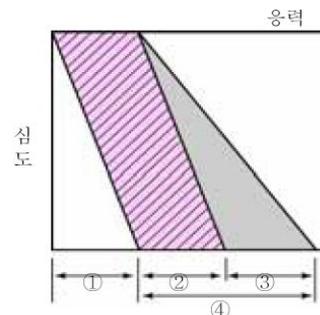
- ① 침투압을 이용하므로 성토등 재하중이 필요없음.
- ② 배수층을 여러층 포설하고 배수시키면 압밀시간을 단축할 수 있음.

▶ 침투압밀의 문제점

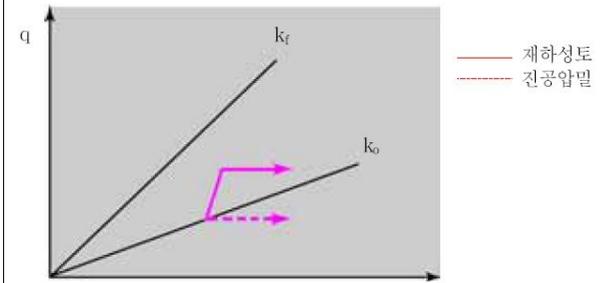
- ① 배수층 모래가 필요
- ② 연직으로 수직정과 배수 pump 등 설치 필요
- ③ 특히 수직정 훼손, 배수층 기능 저하시 대책곤란.

■ Vacuum Consolidation

▶ 원리



- ① : 지하수의 변동이 없으므로 간극수압은 당초와 같음.
- ② : 진공압에 의한 유효응력 증가분
- ③ : 당초의 유효응력.
- ④ : 진공압밀 후 전체 유효응력



진공압밀 응력경로

▶ 진공압밀의 효과

- ① 지반과괴위험성 없음(등방압밀)
  - ② 장비진입성문제 적음
  - ③ 침하소요시간 약 2배 단축
  - ④ 잔류침하 거의 없게됨
  - ⑤ 파잉간극수압발생 없음
- ▶ 진공압밀의 문제점
- ① 재하중크기 제한 (약 6tonf/m2), 필요시 추가성토 필요
  - ② 정교한 시공, 진공막, 진공펌프 등 필요
  - ③ 공기차단막 sealing, 펌프효율 문제 발생가능

■ 압밀계산문제

〈Case 1〉 압밀계수 산정

3m의 포화점토 층에 임의의 하중이 작용하여 75일이 경과한 후 90% 압밀이진행되었다. 점토층의 배수조건이 양면일 경우 이 하중 단계에 대한 점토의 압밀계수  $C_v$ 를 구하시오.

▶ 문제의 이해

- ① 표준압밀시험에서 압밀링의 상하부에 포러스한 판을 놓고 시험을 한다. 이것은 곧 양면배수조건(점토층 상하 측에 샌드 층이 있는 경우처럼)을 모사한 시험이다.
- ② 압밀계수는 시간계수와 정비례하고 압밀시간과 반비례한다.

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t}$$

③ 시간계수를 우리가 모두 기억할 수도 없고 그럴 필요도 없다. 보통 90% 압밀도와 50% 압밀도의 경우의 시간계수에 관한 문제가 출제되며 두 가지 경우 이외의 압밀도에서는 시간계수 table을 제공한다.

④ 90% 압밀도의 경우 : Taylor의  $\sqrt{t}$  법에 의한 계수 0.848을 이용하며

⑤ 50% 압밀도의 경우 : Casagrande의  $\log t$  법에 의한 계수 0.197을 사용한다.

▶ 문제의 풀이

① 이 문제의 경우 압밀도 90%라는 단서가 있으므로 시간계수는 0.848을 이용한다.

$$② C_v = \frac{T_v H^2}{t} = \frac{0.848 \times 150^2}{75 \times 24 \times 3600} = 2.94 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$\therefore C_v = 2.94 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

### <Case 2> 압밀시간 산정

배수조건이 일면배수인 4m인 포화점토층이 있다. 이 점토를 채취하여 토질시험한 결과 간극비 1.96,  $a_v = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{gf}$ ,  $k = 4 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 가 얻어졌다. 이 점토가 90% 압밀되는데 걸리는 시간을 구하여라.

▶ 문제의 이해

① 점토층의 압밀시간을 구하는 문제는 시간계수를 이용해야 하는데 이 문제 역시 압밀도 90%라는 가정을 주었으므로

② 테일러의  $\sqrt{t}$  법에 의해 풀이하라는 암시이다.

③ 어떤 방법이 좋냐구? 당연히 답은 없다. 따라서 가장 합리적인 방법은  $\sqrt{t}$  법과  $\log t$  법에 의해 각각의  $C_v$ 를 구한 후 평균치를 취하는 것이 가장 좋을 것이다.

④ 하지만 이 문제에서는  $\sqrt{t}$ 에 의해서 풀이를 하는 수 밖에 없다.

⑤ 압밀시간을 구하기 위해서  $C_v = \frac{T_v H^2}{t}$ 에서  $t = \frac{T_v H^2}{C_v}$ 가 된다.

⑥ 여기서  $T_v$ ,  $H$ 는 모두 기지값이므로 미지수는  $C_v$ 이므로

이것을 먼저 해결해야만 한다.

$$⑦ \text{ 투수계수 } k = C_v m_v \gamma_w \text{ 이므로 } C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

⑧  $m_v$ 를 모르므로  $a_v$ (압축계수)에서  $m_v$ 를 끌어 내야 한다.

▶ 문제의 풀이

$$① m_v = \frac{\Delta V}{V \Delta p} = \frac{\Delta V}{V \Delta p} = \frac{\Delta e}{1+e} \cdot \frac{1}{\Delta p} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{a_v}{1+e}$$

$$= \frac{3 \times 10^{-4}}{1+1.96} = 1.014 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{gf}$$

$$② C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{4 \times 10^{-4}}{1.014 \times 10^{-4} \times 1} \cdot \frac{\frac{\text{cm}}{\text{s}}}{\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 3.945 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$③ t = \frac{0.848 \times 400^2}{3.945 \times 10^{-3}} = 34.393 \times 10^6 \text{ sec} = 398 \text{ days}$$

### <Case 3> 압밀시험의 간극비 계산

압밀시험 결과  $e - \log P$  곡선에서 압밀하중  $9.7 \text{ tf/m}^2$ 일 때 간극비가 1.24이고, 압밀하중  $46.5 \text{ tf/m}^2$ 일 때 간극비가 0.96이었다면  $60.5 \text{ tf/m}^2$ 의 압력에 대한 간극비를 구하여라.

▶ 문제의 이해

① 만일 압밀하중과 간극비간에 모종의 relation이 없다면? 해결불가지만, 다행스럽게도 어떤 관계가 있다.

②  $e - \log P$  곡선에서 비선형으로 가다가 선형으로 변하는 구간이 생기는데 이 부분의 기울기를 압축지수( $C_c$ )라고 한다.

▶ 문제의 풀이

1) 하중 9.7에서 46.5로 갈 때 간극비가 1.24에서 0.96으로 줄어 드는 구간

① 하중이 커지면 당연히 공극이 줄어든다.

$$② \text{ 이 때의 압축지수 } C_c = \frac{0.28}{\log(46.5/9.7)} = \frac{0.28}{\log 4.994} = 0.4113$$

③ 압축지수가 크다는 의미는? 약간의 하중증가에도 간극이 팽팽 줄어든다는 의미이므로 대단히 불안정한 지반이라는 의미다.

2) 연결고리는 바로 압축지수가 같다는 것이며

① 따라서 압밀하중이 46.5에서 60.5로 가는 경우에도  $C_c=0.4113$ 이 그대로 유지된다는 것입니다.

$$② 0.4113 = \frac{\Delta e}{\log \frac{60.5}{46.5}}$$

$$③ \Delta e = 0.4113 \times 0.1143 = 0.0470$$

④ 간극비가 0.96에서 0.0470만큼 줄어야 맞는 것이니까

$$3) \text{ 간극비} = 0.96 - 0.0470 = 0.913$$

### <Case 4> 과압밀비 계산

지표면 아래 1m되는 점이 있다. 본래 이 지점은 건조했으나 댐 건설로 인해 현재는 지표까지 포화가 되어 있다. 이 지점의 건조단위무게가  $1.5 \text{ tf/m}^2$ , 포화단위무게가  $2.1 \text{ tf/m}^2$ 일 때 과압밀비(OCR)를 구하여라. 단, 다른 변수는 모두 고려하지 않는다.

▶ 풀이

$$① \text{ 선행압밀하중 : } P_c = 1.5 \times 1 = 1.5 \text{ tf/m}^2$$

$$② \text{ 유효상재하중 : } P_0 = (2.1 - 1.0) \times 1 = 1.1 \text{ tf/m}^2$$

$$③ \text{ 과압밀비 : } OCR = \frac{P_c}{P_0} = \frac{1.5}{1.1} = 1.36$$

### <Case 5> 압밀시험 하중단계별 간극비 계산

시료의 건조무게가 128g이고, 시료의 초기높이가 2.54cm인 흙 시료에 대한 압밀시험의 결과가 다음과 같다. 흙 입자의 비중이 2.75이고 시료의 단면적이  $30.68 \text{ cm}^2$ 일 경우 다음에 답하시오.

1) 시료의 고체부분의 높이

2) 간극의 초기 높이와 각 하중단계마다의 간극비를 계산하라.

하중 P (tf/m <sup>2</sup> )	압밀완료시 시료의 최종높이 (cm)
0	2.540
1	2.465
2	2.431
4	2.389
8	2.324
16	2.225
32	2.115

▶ 풀이

1) 시료의 고체부분의 높이

① 이 높이는 압밀시험 전과정을 통해 불변한다.

$$② G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} = \frac{W_s}{AH_s \cdot \gamma_w} \quad (V_s = A \cdot H_s \text{이므로})$$

$$③ H_s = \frac{W_s}{AG_s \cdot \gamma_w} = \frac{128}{30.68 \times 2.75 \times 1} = 1.52 \text{cm}$$

2) 하중단계별 간극비의 계산

하중 P (tf/m <sup>2</sup> )	압밀완료시 시료의 최종높이 (cm)	H <sub>v</sub> = H - H <sub>s</sub>	e = $\frac{H_v}{H_s}$
0	2.540	1.02	0.671
1	2.465	0.945	0.622
2	2.431	0.911	0.599
4	2.389	0.869	0.572
8	2.324	0.804	0.529
16	2.225	0.705	0.464
32	2.115	0.595	0.391

◀Case 6▶ 투수계수 계산

두께 20m의 점토지반에 구조물을 축조한 후 침하량을 측정할 결과 8cm에 도달했다. 이 때, 구조물에 의해서 점토지반에 가해지는 평균압력이 5tf/m<sup>2</sup>인 경우에 이 점토층의 부피변화계수 m<sub>v</sub>는 얼마인가? 또 압밀시험 결과 압밀계수 C<sub>v</sub>가 5×10<sup>-4</sup>cm<sup>2</sup>/s라면 이 지반의 투수계수는 얼마인가?

▶ 풀이

1) 체적변화계수

① 압력 5tf/m<sup>2</sup>=0.5kgf/cm<sup>2</sup>

② 체적변화계수란 하중증가량에 대한 체적의 변화율의 비로

$$m_v = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\frac{\Delta H}{H}} = \frac{\frac{\Delta H}{H} \cdot \frac{1}{\Delta P}}{\frac{\Delta H}{H} \cdot \frac{1}{\Delta P}} = \frac{8}{2000} \times \frac{1}{0.5} = 8 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{kgf})$$

2) 투수계수

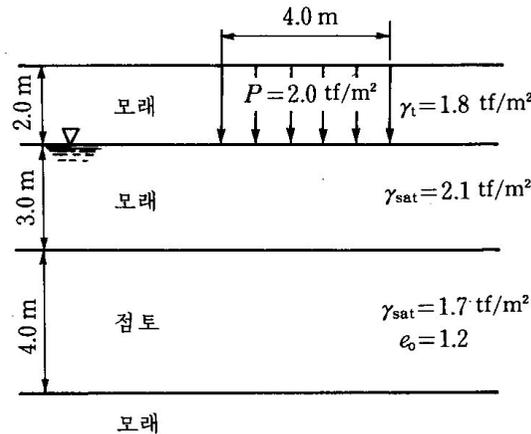
$$k = C_v m_v \gamma_w =$$

$$5 \times 10^{-4} \times 8 \times 10^{-3} \times 10^{-3} = 4 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$$

$$(\gamma_w = 1000 \text{kgf/m}^3 = 1000 \text{kgf}/(10^2 \text{cm})^3 = 10^3/10^6 = 10^{-3} \text{kgf/cm}^3)$$

◀Case 7▶ 지중응력과 압밀침하량

모래층 사이에 긴 점토지반 위에 그림과 같이 P = 20tf/m<sup>2</sup>인 하중이 작용한다. 점토의 액성한계가 60%라고 할 때, 다음 물음에 답하여라.



- ① 점토층 중앙단면에 작용하는 유효응력을 구하여라.
- ② 점토층 중앙단면에 작용하는 응력증가분을 2:1분포법으로 구하여라.
- ③ Skempton의 공식에 의한 점토지반의 압축지수를 구하여라.
- ④ 점토지반의 최종 압밀침하량을 구하여라.

▶ 풀이

1) 유효응력

① P가 작용하기 이전의 점토층 중앙단면에서의 유효응력 그 위에 작용하는 흙의 압력과 같다.

② σ'<sub>v</sub> = 1.8×2 + (2.1-1.0)×3 + (1.7-1.0)×2 = 8.3tf/m<sup>2</sup>

2) 응력증가분

① 2:1 분포법에 의해 구하면

② Δσ =  $\frac{PB^2}{(B+z)^2} = \frac{(20-2 \times 1.8) \times 4^2}{(4+5)^2} = 3.24 \text{tf/m}^2$  (구조물 깊이를 2m 아래에 시공하였으므로 압밀하중은 P에서 2×1.8을 마이너스 해 준 것이다)

3) 압축지수

① 압축지수는 e-logP 곡선에서의 기울기로 구하는 것이 원칙이지만 경험식에 의해 추정할 수 있으며

② 불교란 상태의 식을 선택한다.

③ C<sub>c</sub> = 0.009(LL-10) = 0.009(60-10) = 0.45

4) 최종압밀침하량

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e} \cdot H \log \frac{P_1 + \Delta P}{P_1} = \frac{0.45}{1+1.2} \times 4 \times \log \frac{8.3+3.24}{8.3} = 0.117 \text{m} = 11.7 \text{cm}$$

◀Case 8▶ m<sub>v</sub>, C<sub>c</sub>, e<sub>0</sub> 이용한 침하량 산정

압밀시험 결과 e-logP 곡선에서 압밀하중 P<sub>1</sub> = 1.6kg/cm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub> = 3.2kg/cm<sup>2</sup>일 경우, 이에 해당하는 간극비가 각각 e<sub>1</sub> = 1.46, e<sub>2</sub> = 1.34였다. 점토층의 두께가 10m일 때, 압밀침하량을 다음의 방법으로 구하시오.

- ① 부피변화계수 이용
- ② 압축지수 이용
- ③ 간극비 이용

▶ 풀이

1) 부피변화계수

①

$$m_v = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\frac{\Delta P}{\Delta P}} = \frac{\frac{\Delta e}{1+e}}{\frac{\Delta P}{\Delta P}} = \frac{1.46-1.34}{1+1.46} \cdot \frac{1}{3.2-1.6} = 0.03049 \text{cm}^2/\text{kgf}$$

② ΔH = m<sub>v</sub>HΔP = 0.03049 × 10 × 100 × (3.2-1.6) = 48.78cm

2) 압축지수

① C<sub>c</sub> =  $\frac{\Delta e}{\log \frac{P_2}{P_1}} = \frac{1.46-1.34}{\log \frac{3.2}{1.6}} = 0.3986$

②

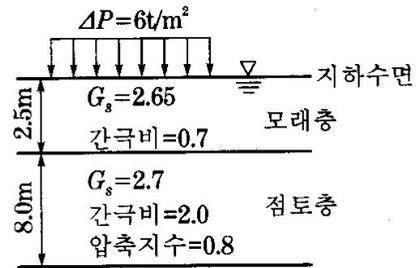
$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e} \cdot H \log \frac{P_1 + \Delta P}{P_1} = \frac{0.3986}{1+1.46} \times 1000 \times \log \frac{1.6+1.6}{1.6} = 48.78$$

3) 최종 압밀침하량

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1+e} H = \frac{1.46-1.34}{1+1.46} \times 1000 = 48.78 \text{ cm}$$

### 〈Case 9〉 압밀침하량 산정

그림과 같은 지반에 등분포하중  $\Delta P = 6.0 \text{ t/m}^2$  을 가하였다. 점토층의 1차 압밀에 의한 침하량은 얼마인가? 단, 지하수면은 지표면과 일치한다.



▶ 풀이

① 지표에  $\Delta P$  가 해지기 전의 자중에 의한 하중강도가  $P_1$  이므로 먼저 이것을 구해야 한다.

② 모래층의 단위중량 :

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.65+0.7}{1+0.7} \times 1 = 1.97 \text{ t/m}^3$$

③ 점토층의 단위중량 :  $\gamma_{sat} = \frac{2.7+2.0}{1+2} \times 1 = 1.57 \text{ t/m}^3$

$$④ P_1 = 0.97 \times 2.5 + 0.57 \times \frac{8}{2} = 4.705 \text{ t/m}^2$$

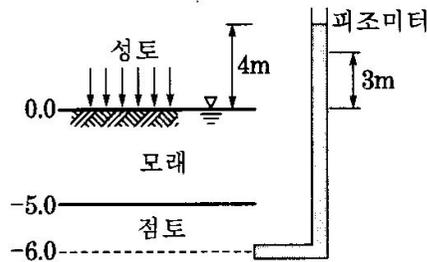
$$⑤ P_2 = P_1 + \Delta P = 4.705 + 6 = 10.705 \text{ t/m}^2$$

$$⑥ \Delta H = \frac{C_c}{1+e} \log \frac{P_2}{P_1} H = \frac{0.8}{1+2} \times \log \frac{10.705}{4.705} \times 8 = 0.762 \text{ m}$$

### 〈Case 10〉 과잉간극수압 및 압밀도

그림과 같이 지반에 피조미터를 설치하고 성토한 순간에 수주가 지면에서부터 4m였다. 4개월 경과후 수주가 3m가 되었다면

지하 6m 되는 점의 압밀도와 간극수압을 구하시오.



▶ 풀이

① 지표면까지 포화된 지반이므로 -6m인 지점의 초기 과잉간극수압은 정수압 이상의 부분이므로  $u_i = \gamma_w \times h = 1 \times 4 = 4 \text{ t/m}^2$

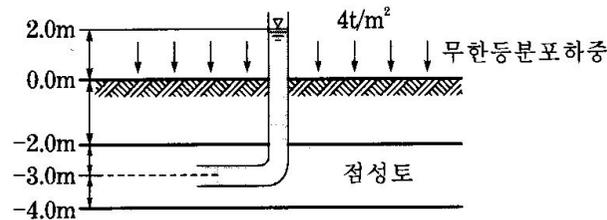
② 현재의 과잉간극수압  $u = 3 \text{ t/m}^2$

③ 압밀도는 초기과잉간극수압에 대한 과잉간극수압 소산량의 비율이므로

$$U = \frac{u_i - u}{u_i} = \frac{4-3}{4} = 0.25$$

### 〈Case 10-1〉 과잉간극수압 및 압밀도

그림과 같은 조건에서 지하 3m 지점의 현재 압밀도는?



<풀이>

$$① u = 2 \text{ t/m}^2$$

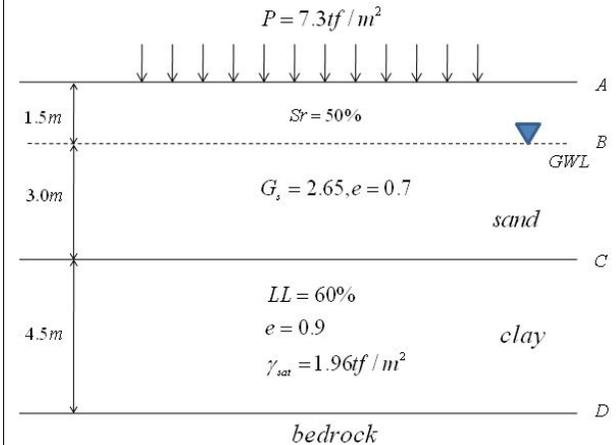
$$② U = \frac{P-u}{P} = \frac{4-2}{4} = 50\%$$

### 〈Case 11〉

그림과 같이 점토층 위에 4.5m 두께의 모래층이 있다. 모래 입

자의 비중이 2.65이고 간극비가 0.7일 때 다음을 구하여라.

- 1) 지하수면 위 모래의 습윤단위무게, 지하수면 아래 모래의 포화단위무게, 수중단위무게와 점토의 수중단위무게를 구하여라.
- 2) A,B,C,D에서의 전응력, 간극수압, 유효응력을 구하여라.
- 3) 점토층 중앙단면에 작용하는 유효응력을 구하여라.
- 4) 점토층의 압축지수를 구하여라.
- 5) 지표면에  $7.3 \text{ tf/m}^2$ 의 하중이 작용할 때, 이로 인한 최종 압밀침하량을 구하여라.



▶ 풀이

1) 단위무게

① 지하수면 위 모래층의 습윤단위중량

$$\gamma_t = \frac{G_s + Se}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.65+0.5 \times 0.7}{1+0.7} \times 1 = 1.76 \text{ tf/m}^2$$

② 지하수면 아래 모래의 포화단위중량

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.65+0.7}{1+0.7} \times 1 = 1.97 \text{ tf/m}^2$$

③ 지하수면 아래 모래의 수중단위중량

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w = 1.97 - 1 = 0.97 \text{ tf/m}^2$$

④ 지하수면 아래 점토의 수중단위중량

$$\gamma_{sub} = 1.96 - 1 = 0.96 \text{ tf/m}^2$$

2) A, B, C, D에서의 전응력, 간극수압, 유효응력

- ① A
  - $\sigma_A = 0$
  - $u_A = -\gamma_w hS = -1 \times 1.5 \times 0.5 = -0.75tf/m^2$
  - $\sigma'_A = 1 - (-0.75) = 0.75tf/m^2$
- ② B
  - $\sigma_B = 1.76 \times 1.5 = 2.64tf/m^2$
  - $u_B = 0$
  - $\sigma'_B = 2.64 - 0 = 2.64tf/m^2$
- ③ C
  - $\sigma_C = 1.76 \times 1.5 + 1.97 \times 3 = 8.55tf/m^2$
  - $u_C = 3tf/m^2$
  - $\sigma'_C = 8.55 - 3 = 5.55tf/m^2$
- ④ D
  - $\sigma_D = 1.76 \times 1.5 + 1.97 \times 3 + 1.96 \times 4.5 = 17.37tf/m^2$
  - $u_D = (3 + 4.5)\gamma_w = 7.5tf/m^2$
  - $\sigma'_D = 17.37 - 7.5 = 9.87tf/m^2$

3) 점토층 중앙단면에서의 유효응력

- ① 전응력 :  $\sigma = 1.76 \times 1.5 + 1.97 \times 3 + 1.96 \times 2.25 = 12.96tf/m^2$
- ② 간극수압 :  $u = 5.25tf/m^2$
- ③ 유효응력 :  $\sigma' = 12.96 - 5.25 = 7.71tf/m^2$

4) 점토층의 압축지수

- ① 점토층은 현장조건으로 불교란상태이므로
- ②  $C_c = 0.009(LL - 10)_n = 0.009(60 - 10) = 0.45$

5) 최종압밀침하량

①

$$\Delta H = m_v \Delta PH = \frac{C_c}{1+e} \log \frac{P+\Delta P}{P} H = \frac{0.45}{1+0.9} \times \log \frac{7.725+7.3}{7.725} \times 4.5$$

$$= 0.308m = 30.8cm$$

- ② 압밀침하량 산정은 점토층의 중앙단면의 유효응력 값을 이용해야 한다.

**<Case 12> 간극수압과 압밀도의 관계**

어느 점토지반에  $20tf/m^2$ 의 압밀하중이 작용한다. 압밀도  $U$ 가 90%일 때의 과잉간극수압  $u_e$ 를 구하시오.

▶ 풀이

① 초기간극수압  $u_i = 20tf/m^2$ 이고, 압밀이 완벽히 종료되는 이론상의 개념인 압밀도 100%일 경우 최종간극수압은  $u = 0$ 이다. (간극수압이 완전히 소산된 것)

②  $U = \frac{u_i - u_e}{u_i} \times 100 = (1 - \frac{u_e}{u_i}) \times 100$

③ 이 상황을 방정식으로 표현하면  $90 = (1 - \frac{u_e}{20}) \times 100$ 과 같으며

④  $90 = (1 - \frac{u_e}{20}) \times 100 = 100 - \frac{u_e}{20} \times 100 = 100 - 5u_e$

$$5u_e = 100 - 90 = 10$$

$$u_e = \frac{10}{5} = 2tf/m^2$$

## 제 9 장 기초지반의 조사 및 시험

### ■ 토공을 위한 지반조사

#### ▶ 예비조사 : 현지조사+자료수집

- 자료수집 : (지형도/지질도/항공사진도/토양도/기존토질조사 자료/기존의 공사기록 및 현장의 이력/기상 및 재해기록)

- 현지답사 : 비사화(실제상태의 비교 확인/사운딩/ 기존 구조물의 상태 확인)

#### ▶ 본조사 (테지보시트)

- Test Pit 조사

- 지하수

- 시추조사(피쿠션/오거/로터리)

- 시료의 채취(교란시료 : - 에터버그/비중/다짐/입도)(불교란시료 : 압전도-압밀/전단/투수)

- 토질시험 ( -성토/토취장/사면안정/절토/배수설계/지반개량)

#### ▶ 실내시험 :

(삼축/투수계수/압밀/입도/함수비/비중/단위중량/연경도)

▶ 현장시험 : CSV투(SPT-sand/CPT-silt, clay / Vane-soft clay/현장투수)

▶ 불교란시료 채취시 샘플러 구비사항 : (시료 교란되지 않아야한다/ 시료빠는데 편리해야한다/회수비 가능한 100%/신뢰도 높아야한다, 연속된 시료채취가능/시료와샘플러 튜브내면마찰이 적어야 한다)

### ■ 지반의 물리탐사

▶ 토공을 위한 지반조사의 일종으로 광범위한 지역에 적용 → 지하구조와 관련하여 발생하는 물리현상을 측정·분석하고 그 결과를 필요한 물리상수로 번역하여 지하구조를 해석·평가하는 탐사법.

▶ 물리탐사의 종류 :

▶ 탄성파 탐사 : P파 사용(P파가 종파이므로 토층의 탐사에 유리)

- P파의 특징 : (종파/5km/sec/진폭이 적고 주기가 짧다.)

#### ▶ 전기 비저항 측정 :

- 흙의 저항은 습기나 용해이온의 농도에 주로 좌우되는 특성을 이용

- 포화된 점토는 건조토보다 일반적으로 낮은 비저항을 가지며, 건조토는 높은 비저항을 가진다.

- 일직선상에 같은 간격으로 전기막대를 토층속에 박아서 측정한다.

#### ▶ 중력탐사

- 지하구조의 밀도분포가 서로 다른 점을 이용하여 지하구조를 탐사하는 방법.

- 지구는 완전한 구형이 아니어서 지구의 자전에 의한 원심력의 영향 및 중력이 다르므로 → 중력 이상이 발생 → 이를 토대로 지하구조의 밀도분포를 해석해 지하구조 해석

#### ▶ 자기탐사

- 지하구조의 자성체 분포가 서로 다른 점을 이용하여 지하구조를 탐사하는 방법이다.

- 지하구조는 모두 지구자기를 띠고 있어서 정도의 차는 있으나 자석상태(자기화)로 되어 있다.

- 자기화의 차는 지하구조의 자기화율(투자율)의 차에 따라 다르다.

- 자기이상에서 지하구조의 자성체 분포를 해석하여 철광상 등을 탐사한다.

#### ▶ 방사능탐사

- 지하구조 내의 천연방사성광물에서 방출되는 방사선을 이용하는 탐사법.

- 전기탐사나 탄성파탐사와는 달리 방사성광물 광상과는 직접적이다.

- 단층이나 사태로 방사성광물이 함유되는 경우가 있으므로 측정결과에서 단층이나 사태의 상태를 간접적으로 해석한다.

#### ▶ 과도현상탐사

- 어떤 정상상태에서 다른 정상상태로 이행하는 과정에서 발생하는 현상이 과도현상

- 과도현상을 이용하면 정상상태에서는 얻을 수 없는 지하구조의 자료를 얻을 수 있는 경우가 있다.

#### ▶ 상대탐사

- 인공적 또는 자연적으로 변화하는 물리현상의 상대적 변화를 이용하는 탐사법.

- 자기탐사, 방사능탐사 → 직접적

- 이미 알고 있는 고유저항 액체를 지하구조에 주입하여 고유저항의 상대적인 변화에서 지하구조의 공학적 성질을 평가한다.

### ■ 물리탐사의 특징

물리탐사(탄성파, 전기비저항, 음파)특성: 장점 (넓은지역을 빠르고 경제적으로 조사, 시추조사는 1개지점의 수직분포를 알 수 있으나 물리탐사는 전체지반 상태조사, 파쇄대공동지하수조사, 시추필요없음, 탄성파는 Rippability 분류시 적용), 단점(지반의 특성을 개략적으로 나타냄. 시료채취무함, 시추조사와 병행판단, 탄성파탐사는 하부층이 상층보다 탄성파속도가 느리면 적용곤란)

### ■ 정적사운딩

#### ▶ 정적사운딩(피조콘/휴대용콘/화란식콘) 결과이용

연속적인 토층성상 파악/토층의 경면파악/점성도의점착력/차량진입여부/직접기초지지력/말뚝기초지지력/개량전후지반변화파악/샌드심깊이두께판단/간극수압/수평방향압밀계수/수평방향투수계수/사질토의전단저항각/상대밀도/연직배수재/압밀도/압밀기간

### ■ SPT

▶ SPT : 중공의 split spoon sampler를 boring rod 끝에 붙여서 63.5kg의 해머로 낙하고 75cm의 높이에서 타격을 하여 split spoon sampler가 30cm 관입할때의 타격수를 N값이라고 한다.

- 동적 Sounding 의 일종

- 현장 원위에서, 보링콘 속에서, 흙의 경, 연 지표인 N 측정

- 교란시료 채취(sampling) ⇒ 실내시험: 토성, 연경도, 입도 시험

▶ N값의 수정방법 : (유효응력, 해머효율, 로드길이, 샘플러, 시추공경)

- rod 길이에 대한 수정 : 심도증가 → N값이 과대평가(타격에너지손실 및 마찰)

$$N_1 = N' \left(1 - \frac{x}{200}\right)$$

$N'$  : 시험에서 얻어진 N값,  $x$  : 로드의 길이  
- 토질에 의한 수정

$$N_2 = 15 + \frac{1}{2}(N_1 - 15)$$

여기서,  $N_1$  : 로드의 수정값 (단,  $N_1 > 15$  인 경우)

- 상재하중에 의한 수정

$$N = N' \left( \frac{5}{1.4P + 1} \right)$$

$P$  : 유효 상재하중 ( $\text{kgf/cm}^2$ )  $\leq 2.8$  ( $\text{kgf/cm}^2$ )

▶ N값의 이용

- 모래의 상대밀도와 N값의 관계

N값	상대밀도
0~4	very loose
4~10	loose
10~30	medium
30~50	dense
50 이상	very dense

- N값과 모래의 내부마찰각  $\phi$ 의 관계

① Dunham의 공식

- ① 토립자가 모나고 입도 양호 :  $\phi = \sqrt{12N} + 25$
- ② 토립자가 모나고 입도 불량 :  $\phi = \sqrt{12N} + 20$
- ③ 토립자가 둥글고 입도 양호 :  $\phi = \sqrt{12N} + 20$
- ④ 토립자가 둥글고 입도 불량 :  $\phi = \sqrt{12N} + 15$

② Peck의 공식  $\phi = 0.3N + 27$

③ 오오지키 공식  $\phi = \sqrt{20N} + 15$

- N값과 점토의 컨시스턴시 및 일축압축강도  $q_u$ 의 관계

① N값과 점토의 컨시스턴시

점토의 컨시스턴시		N값	$q_u$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
very soft	매우 연약	<2	<0.25
soft	연약	2~4	0.25~0.5
medium	중간	4~8	0.5~1.0
stiff	견고	8~15	1.0~2.0
very stiff	매우 견고	15~30	2.0~4.0
hard	고결	>30	>4.0

② N값과  $q_u$ 의 관계

$$q_u = \frac{N}{8} \quad (\text{단, } \phi=0 \text{ 이면 } C = \frac{N}{16})$$

▶ 원위치시험 특징(장, 단점):

(연속기록)

/경제적/불교란시료채취/시료교란영향/배수조건/실내시험병행/장래환경변화/응력분포및경로/시료채취곤란)

▶ SPT 결과이용 : 지반내토층분포및토층종류, 지지층분포심도. 연약층분류, 액상화대상층, 토사와리핑암구분, 상대밀도와내부마찰각, 기초지반의탄성침하, 허용지지력, 지반반력계수탄성계수, 일축압축강도점착력

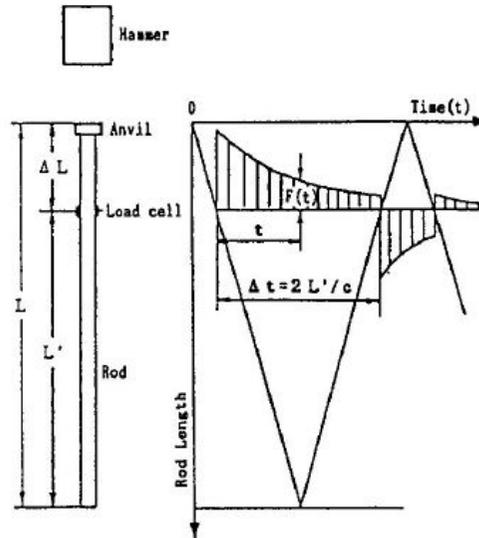
### ■ SPT 에너지의 측정

▶ 개요

① 로드에 전달되는 에너지를 정확히 측정하는 것은 SPT의 결과해석에 상당한 영향을 미치므로 이것을 측정하기 위해 많은 방법들이 제시되었다. 초창기에는 단지 해머가 앤빌과 충돌하기 직전의 에너지를 측정하는 노력이 있었으나 이런 방법은 해머시스템의 동적효율을 고려하지 못한다.

② 실제 로드에 전달되는 에너지를 정확히 측정하기 위해서는 로드셀이나 스트레인 게이지, 가속도계에 의해 측정하는 것이 합리적이다.

▶ F2 적분방법



<해머 시스템과 이론적 힘의 이력>

① 로드 상단에 로드셀을 부착하고 해머로 타격하여 힘과 시간 이력을 구해 로드에 전달된 에너지를 측정한다.

② 해머의 타격으로 발생한 압축파는 5120m/sec의 속도로 로드 선단부에 도달하며, 선단부에서 인장파로 변환되어 로드 상단으로 파가 전달된다.

③ 압축파를 양으로, 인장파를 음의 기호로 표시하면 그림과 같이 시간축 상에 힘의 이력이 나타나며

④ 다음 식으로 적분하여 로드에 전달된 에너지 수준을 측정한다.

$$E_i = \frac{c}{EA} \int [F(t)]^2 dt$$

여기서,

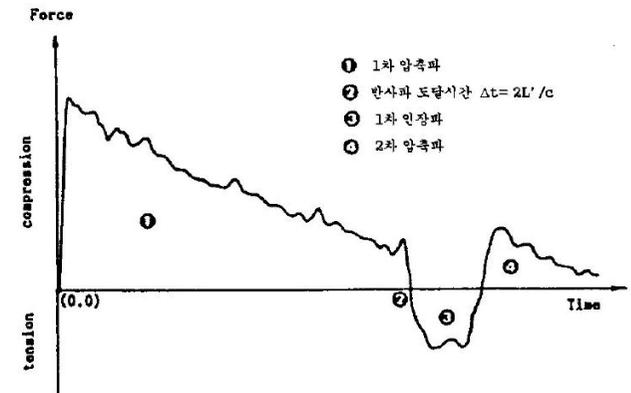
$c$  : 로드로 전달되는 파속

$E$  : 로드의 탄성계수

$A$  : 로드의 단면적

$F(t)$  : 시간에 따른 힘의 이력

위 식에서  $\frac{EA}{c}$ 는 로드의 임피던스로 로드재료 성질에만 관계된 항이다.



<측정된 힘의 이력>

▶ FV 적분법

① SPT는 해머로 세장비가 큰 로드를 타격하여 압축응력파를 발생시킨다는 점에서 pile의 항타시스템과 대단히 유사한 메커니즘을 가진다.

② 따라서 동재하시험에 의한 식으로 적분해서 에너지를 구할 수 있다.

$$E_i = \int F(t) \cdot V(t) dt$$

여기서

$E_i$  : 룯드에 전달되는 에너지

$F(t)$  : 시간에 따른 힘의 이력

$V(t)$  : 시간에 따른 속도의 이력

- ③ 이 식은 타격에너지를 이용한 관입메커니즘에 보편적으로 이용이 가능한 식이며
- ④ 기존의 F2 적분법의 단점을 보완할 수 있다. (F2 적분법은 힘의 이력만으로 에너지를 구하며, 이상적인 무한길이의 룯드로 보정하므로 실제 룯드에 전달된 에너지와는 다소 오차가 있다.)
- ⑤ SPT 룯드는 이음새가 많고 길이방향으로 임피던스가 일정하지 않으므로 1차 압축과 부분에서 힘과 입자속도가 불일치 하는 경우가 많아서 F2 적분법으로 구한 에너지의 신뢰도가 낮다.

## Perfect Sampling

### 정의

- ① 교란(disturbance)은 원지반에 비해 함수비, 간극비, 입자배열과 결합력 상실등에 따라 공학적 성질이 변하는 현상임.
- ② 완전 시료채취는 교란이 전혀 없는 이상적 상태로 시료를 채취하는 것임.

### 시료채취의 중요성

- ① 원래 있던 지반상태를 그대로 즉, 교란방지, 입자배열 유지하면서 시료채취가 되어야 함이 원칙임.
- ② 채취된 시료로 시험시 원지반의 역학적 특성인 전단강도, 압축성, 투수성 등을 정확히 파악할 수 있음

### 채취방법

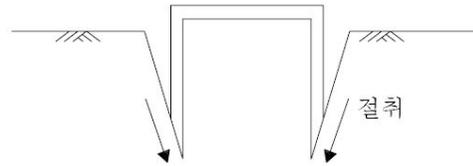
#### 1) 원칙

- ① 교란은 크게 기계적 원인과 지중응력해방에 의해 발생되어 전혀 교란이 없게 하기는 현실적으로 곤란하나 시료크기대형화와 정성스런 작업으로 교란을 최소화 하도록 해야 함.

#### 2) Block Sampling

- ① 채취시료가 크면 클수록 시료내부는 양호한 상태를 유지할 수 있음.

### ② 방법



#### 3) 대구경 sampler 사용

- ① 보통 시료채취직경이 70mm정도의 sampler를 사용하나 200~400mm의 대구경 채취기 사용

#### ▶ 평가

- ① 시추에서 시험까지 일련의 작업과 관련된 기계적 교란은 정성스런 작업과 규정된 장비로부터 줄일 수 있음을 명심해야 하며 교란영향이 응력해방에 의한 것보다 크다고 알려져 있음
- ② 교란영향을 최소화하기 위해 시료를 대형 크기로 채취함이 요망되고 지표는 Block Sampling, 지중심부는 대구경 Sampler (직경 20~40cm)의 사용이 필요함
- ③ 국내에서도 한국건설기술연구원, 건설회사에서 여러 대구경 Sampler가 시료교란 감소에 효과적인 것으로 확인되고 있음

## 현장베인시험

### ▶ 개요

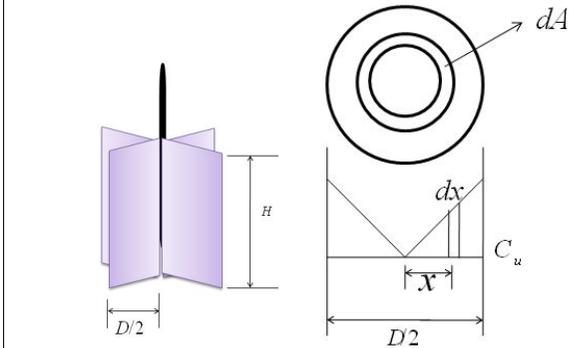
- ① 조사지역에 분포하는 연약지반(퇴적점토층)의 불교란상태의 강도 정수를 측정
- ② 비배수전단강도 및 예민비 측정

### ▶ 시험 방법

- ① 유압식 관입장치와 Rod를 이용하여 일정 심도까지 Vane 날개를 압입시켜 시험을 실시
- ② 현장 Vane시험은 원위치 비배수강도를 직접 측정할 수 있는 장점이 있으나 흙의 소성이 클수록 실제의 비배수강도를 과대평가하는 경향이 있으므로 Bjerrum의 제안식에 따라 보정하여 설계에 적용

### ▶ Vane 시험 공식 유도

$$\begin{aligned} \text{① } M_{1\max, \text{상, 하}} &= 2 \int_0^{\frac{D}{2}} (c_u 2\pi dx)(x) = 4\pi C_u \int_0^{\frac{D}{2}} x^2 dx = 4\pi C_u \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^{\frac{D}{2}} \\ &= 4\pi C_u \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{D}{2} \right)^3 \right] = 4\pi C_u \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3}{8} \right) = \frac{\pi C_u D^3}{6} \quad (\text{상하면의 모멘트값}) \end{aligned}$$



$$dA = 2\pi x dx$$

$$\text{② } M_{2\max, \text{주변}} = C_u \pi D H \frac{D}{2} = \frac{\pi C_u H D^2}{2}$$

$$\begin{aligned} \text{③ } M_{\max} &= M_{1\max} + M_{2\max} = \frac{\pi C_u D^3}{6} + \frac{\pi C_u H D^2}{2} \\ &= C_u \left( \frac{\pi D^3}{6} + \frac{\pi H D^2}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\text{④ } C_u = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi D^3}{6} + \frac{\pi H D^2}{2}}$$

### ▶ 베인시험 적용시 유의할 사항

- ① 예민성 점토는 교란되어 일축강도와 상관관계만 있음
- ② 샘플링이 어려운 점토에서 UU test에 의한 급속전단시험으로 단기안정해석에 이용
- ③ Skempton의 비배수전단시험에서의  $C_u = \bar{\sigma}(0.11 + 0.0037PI)$   
여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 시험위치에서의 유효상재응력이며, 관입시 교란되어 과잉간극수압이 증대하므로 PI가 낮은 지반에서는 간극수압을 소산시킬 시간을 두고 테스트해야 정확한 값이 얻어진다.
- ④ 따라서 얻어진 값을 그대로 사용해서는 안되며 다음과 같이 수정적용해야 한다.
- ⑤  $C_u = \lambda C_{u(test)}$ ,  $\lambda = 1.7 - 0.54 \log PI$
- ⑥ 직접전단이나 3축시험은 유효상재응력을 가해주므로 베인전단시험의 강도보다 값이 크게 나온다.

## ■ Dilatometer

▶ 개요 : 납작한 관형 시험기구를 지중에 삽입하고 시험기구 속으로 압력을 주어 steel membrane을 팽창시켜 원지반정수를 측정하는 시험

▶ 장점 : (점/사질토의 지반정수/신속 간편/시추공이 불필요/신뢰성)

▶ 단점 : (암층적용불가/실적미미/중간에 견고한 층 관입곤란하며/장비손상/시료샘플링불가)

▶ 시험방법

- 블레이드를 관입한다. (2cm/sec의 속도로)

- 멤브레인은 rod내에 에어튜브를 통해 가스압에 의해서 팽창시킨다.

- 블레이드 중앙의 멤브레인이 0.05mm 팽창시 압력을 A라고 하고 1.1mm 팽창시 압력을 B라한다.

④ 원위치로 되돌아올 경우의 압력을 C로 측정

4. 시험시 유의할 사항

① 블레이드 관입시 수직도 유지

② 재하속도 유지

③ 시험실시 전에 지반조건을 파악

④ 멤브레인 점검을 주기적으로 실시

5. 용도 (결과 의 이용)

① 물질지수와 횡방향 응력지수

② 점성토지반에서 정지토압계수/비배수전단강도/과압밀비/압밀계수/체적변화계수/탄성계수

③ 사질토지반에서 내부마찰각/정지토압계수/탄성계수

## ■ 공내재하시험

▶ 공내재하시험 결과이용 : (변형계수, 정지토압계수, 수평반력계수, 직접기초말뚝기초지지력, 내부마찰각, 지반개량확인)

## ■ 차량시스템

▶ 차량시스템 : 표준관입시험/피조콘/다이라이토미터/배인/자가굴착식 공내재하시험

## ■ Hydraulic fracturing

▶ 수압시험 결과이용 : (투수성 판단/그라우팅효과/누수량산정/댐그라우팅 범위판단/그라우팅차수효과 확인)

## ■ 해상탐사 및 시추조사

▶ 해상탐사시 현장조사장비 : 위성항법 장치(GPS), 착지형 시추작업대(SEP Self Elevated Platform), Suspension PS검층

▶ 시추조사 유의사항 : 시추조사간격적정, 시료채취적정, 현장 원위치시험은 실내시험과 대비 종합검토자료가 되도록 함, 제실 내시험은 심도별 대표물성치 파악되도록한다, 암반시추는 NX, 다블코아베를 이상, 평면적 입체적인 조사

## ■ 추적자 조사

▶ 추적자에 의한 지하수시 Tracer 종류 : 색소류 (Floressen)/전해질류(식염 등)/RI(인공방사성 동위 원소 등)