

1.4 圧密試験 consolidation test, oedometer test

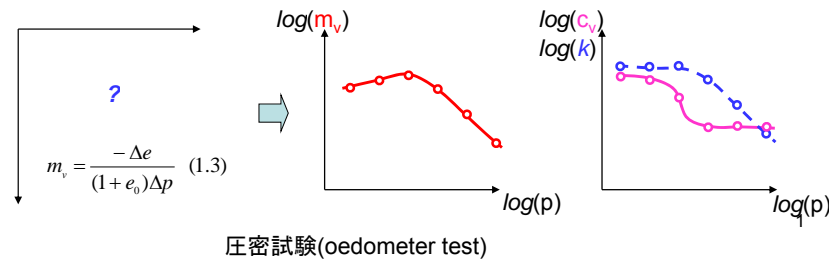
ある圧密圧力増分 $\Delta p (=p-p_i)$ に対する粘土地盤の一次元圧密

沈下量: 体積圧縮係数(m_v) + 圧縮層圧(h) $\Delta S_{90} = 0.9m_v \cdot h \cdot \Delta\sigma_{z0}$

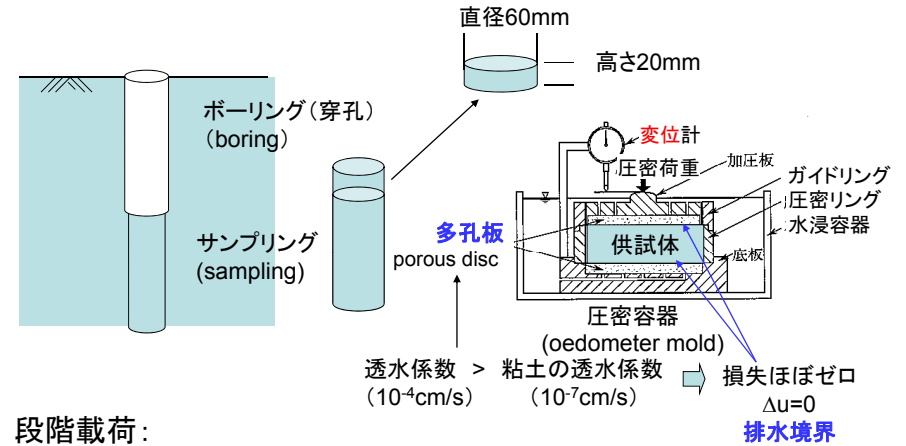
圧密時間: 圧密係数(c_v) + 最大排水長(H) $T_v = \frac{c_v t}{H^2} \Rightarrow t_{90} = \frac{T_{90} H^2}{c_v}$

$$\Delta\varepsilon_v = m_v \Delta p \quad (1.2) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \left(c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \right) \quad (1.15)$$

異なる圧密圧力における圧縮性(圧缩量)とそれにかかる時間



1.4.1 圧密試験(標準: 段階载荷による圧密試験)



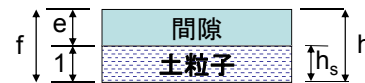
段階载荷:

圧密圧力: (0.05), 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8 (25.6) kgf/cm²
(4.9), 9.8, 19.6, 39.2, 78.5, 157, 314, 628, 1256, (2512) kN/m² (kPa)

一段階の载荷時間: 24時間(標準法)

圧密試験の計測項目(初期値)

- m_0 : 供試体の初期質量(g)
- m_s : 供試体の炉乾燥質量(g)
- h_0 : 供試体初期高さ(cm) 2cm
- D: 供試体直径(cm) 6cm
- ρ_s : 土粒子密度(g/cm³)
- ρ_w : 水密度(g/cm³)



$$w_0 = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\%) \quad (1.28)$$

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{h_0 \cdot A - m_s / \rho_s}{m_s / \rho_s} = \frac{h_0}{h_s} - 1 \quad (1.29)$$

$$S_{r0} = \frac{w_0 G_s}{e_0} = \frac{w_0 \rho_s}{e_0 \rho_w} \quad (1.30)$$

$$h_s = \frac{m_s}{\rho_s A} = \frac{m_s}{\rho_s \pi D^2 / 4} \quad (1.31)$$

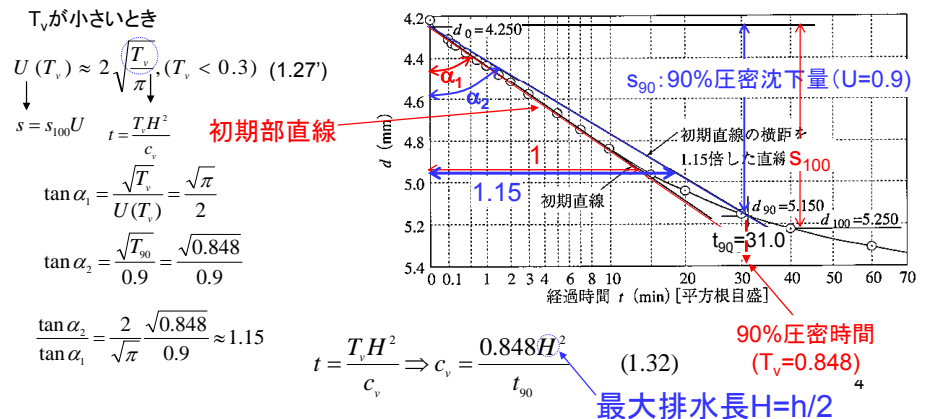
- 初期含水比 w_0 :
- 初期間隙比 e_0
- 飽和度 S_{r0}
- 供試体実質高さ h_s

一定(∵土粒子非圧縮)

圧密試験の計測項目(沈下-時間関係)

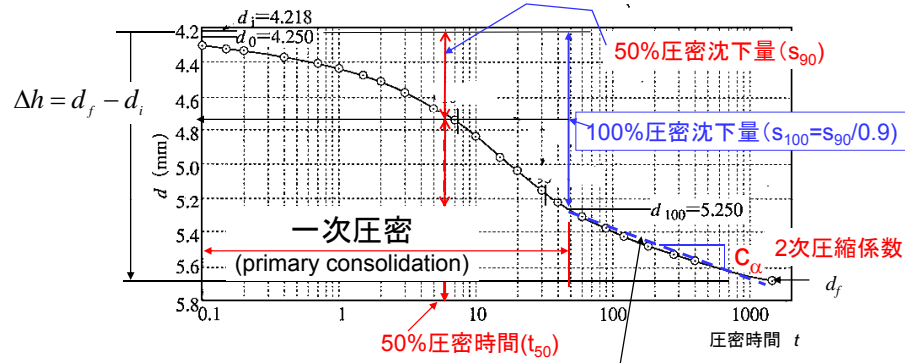
- 変位計の読み: $t=6, 9, 12, 18, 30, 42$ sec (目安)
- 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 min
- 1, 1.5, 2, 3, 6, 12, 24 hr

c_v の求め方 => \sqrt{t} 法: 読みを時間の平方根に対してプロット



圧密試験の計測項目(沈下-時間関係)

log法: 読みを時間の対数に対してプロット => 曲線定規法 t_{50}



この時間沈下関係
各荷重段階で得られる

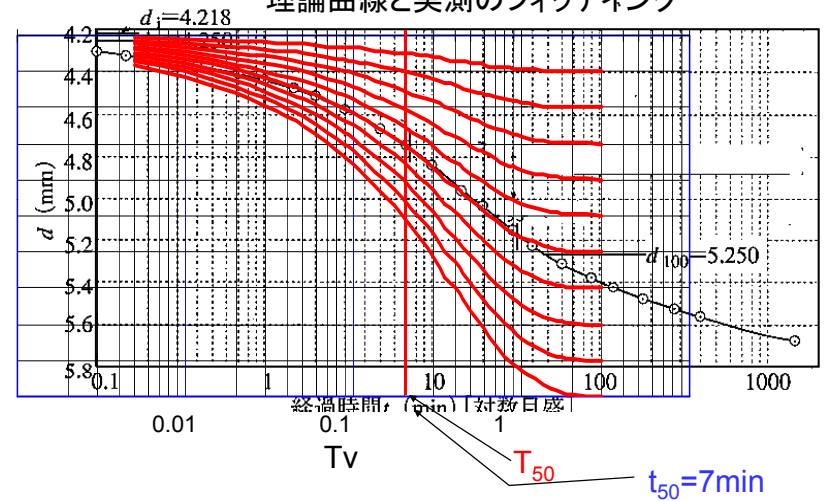
一次圧密比 $r = \frac{s_{100}}{\Delta h}$

100%圧密沈下後も、沈下継続
二次圧密 (Secondary compression)
排水クリープ (creep)
ほぼ時間の対数に比例

曲線定規

縦軸のスケールが異なる理論圧密曲線:

理論曲線と実測のフィッティング



圧密量の整理 (e~logp関係、 m_v)

各荷重段階圧密終了時の供試体高さ: h

$h = h' - \Delta h$

各荷重段階の平均高さ: \bar{h}

$\bar{h} = \frac{h + h'}{2} \Rightarrow \bar{H} = \frac{\bar{h}}{2}$

各荷重段階圧密終了時の間隙比 e :

$e = \frac{h}{h_s} - 1$

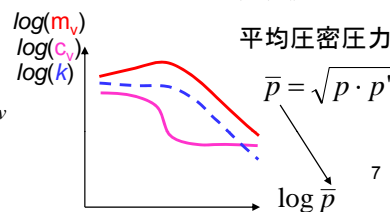
h' : 直前の荷重段階終了時の高さ
 p : 現圧密圧力
 p' : 直前の荷重段階の圧密圧力
 Δp : 現段階の圧力増分

\sqrt{t} 法 $c_v = \frac{0.848 \bar{H}^2}{t_{90}} \quad (1.32)$

log法 $c_v = \frac{0.197 \bar{H}^2}{t_{50}} \quad (1.32')$

各荷重段階で生じる圧縮ひずみ: $\Delta \varepsilon$

$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = \frac{h' - h}{h}$

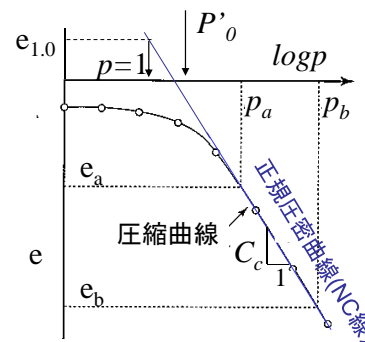


各荷重段階の体積圧縮係数: m_v

$m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p} \quad (1.33)$

$(1.15) \Rightarrow k = c_v m_v \gamma_w \quad (1.34)$

圧縮曲線 (e~logp関係)



圧縮指数: C_c

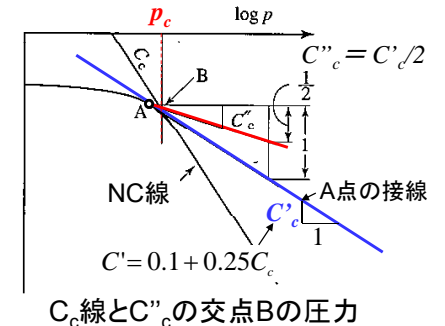
$C_c = \frac{e_a - e_b}{\log(p_b / p_a)} \quad (1.35)$

正規圧密曲線

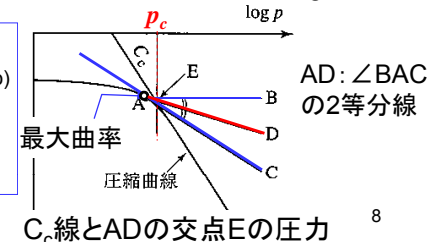
$e = e_{1.0} - C_c \log p \quad (1.4)$

過圧密比 (Overconsolidation ratio)
 $OCR = \frac{p_c}{p'_0}$
有効土被り圧

圧密降伏応力 p_c の決定法1 (三笠の方法)



圧密降伏応力の決定法2 (Cassagrande法)



1.4.2定ひずみ速度圧密試験 (CRSテスト) Constant rate of strain test

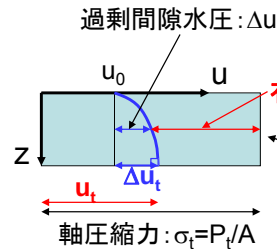
標準試験:
荷重増分: log スケールで等間隔

データ数: 載荷段階数

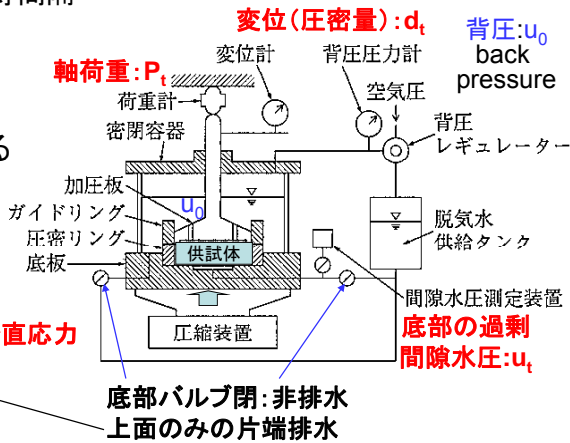
CRSテスト:

一定ひずみ速度で
連続的に軸圧縮を与える

データ数: サンプルング数

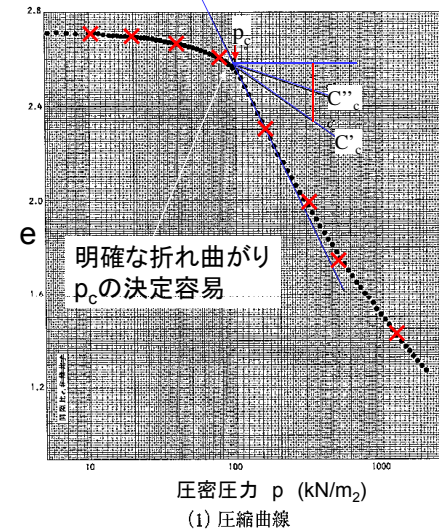


定ひずみ速度圧密試験機の構成例



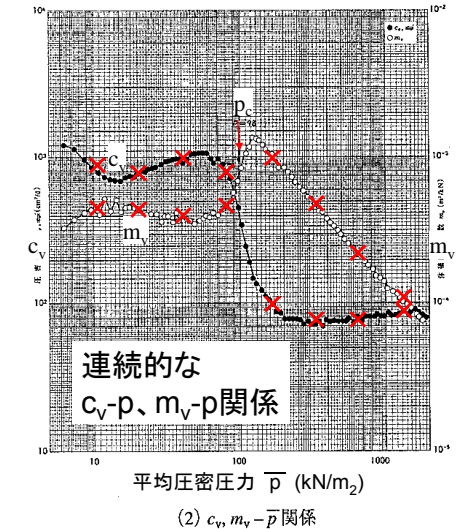
9

CRSテストの試験結果例 (土質試験: 基本と手引き: 地盤工学会)



明確な折れ曲がり
 p_c の決定容易

最大の利点: ひずみ速度 0.1%/min ($lp < 10$) 600min
実験時間が短い: 0.05%/min ($lp = 10 \sim 40$) 1,200min $\Rightarrow d_t = 12$ mm
弱点: 2次圧密を観測できない 0.01%/min ($lp > 40$) 6,000min (60%) 10



CRSの結果の整理

時間tにおける
供試体高さ: h_t

$$h_t = h_0 - d_t$$

間隙比: e_t

$$e_t = \frac{h_t}{h_s} - 1$$

軸圧縮力: σ_t (全応力)

$$\sigma_t = \frac{P_t}{A}$$

圧密圧力: p_t (平均有効応力)

$$p_t = \sigma_t - \frac{2}{3} \Delta u_t \quad (1.36)$$

平均底部過剰間隙水圧: \bar{u}_t

$$\Delta \bar{u}_t = \frac{\Delta u_t + \Delta u'_t}{2} \quad (1.37)$$

$$\Delta h = h_t - h'_t \Rightarrow \Delta \varepsilon = \frac{-\Delta h}{h} \quad \text{体積圧縮係数: } m_v$$

$$\bar{h} = \frac{h_t + h'_t}{2} \Rightarrow m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} \quad (1.38)$$

$$\Delta \sigma = \sigma_t - \sigma'_t \Rightarrow \text{圧密係数: } C_v \quad c_v = \frac{\Delta \sigma \bar{h}^2}{2 \Delta \bar{u}_t \Delta t} \quad (1.39)$$

正確な間隙水圧の測定 $\leftarrow ??$

$$\text{透水係数: } k \quad k = c_v m_v \gamma_w \quad (1.34)$$

(1.36), (1.38), (1.39)の理論的背景

11

CRSの原理 (1.36), (1.38), (1.39)の理論的背景

ひずみに関する圧密方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \quad \left(c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \right) \quad (1)$$

上面(排水面)の変位速度: r一定

$$\frac{\partial w(0,t)}{\partial t} = r = \text{一定} \quad (2)$$

$w(0,t)$: 排水面のz方向の変位

$$w(0,t) = \int_0^{h_0} \varepsilon(z,t) dz \quad (3)$$

(注)微小ひずみを仮定: 層厚変化考慮せず

平均ひずみ速度は $\bar{\varepsilon}(t)$ を平均ひずみとして

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial t} dz \quad (4)$$

$$(2), (3), (4) \Rightarrow \frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{r}{h_0} \quad (5)$$

$$(1), (4), c_v = \text{const} \Rightarrow \frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{c_v}{h_0} \int_0^{h_0} \frac{\partial^2 \varepsilon(z,t)}{\partial z^2} dz \quad (6)$$

$$\text{上面(排水面)の変位速度: r一定} \quad (6) \text{を積分} \quad \frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{c_v}{h_0} \left[\frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial z} \right]_0^{h_0} \quad (7)$$

$$(5), (7) \Rightarrow \left[\frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial z} \right]_0^{h_0} = \frac{r}{c_v} \quad (8)$$

下面(非排水面)での境界条件

$$\left. \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial t} \right|_{z=h_0} = 0 \quad (9)$$

上面(排水面)での境界条件

$$(8), (9) \Rightarrow \left. \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial t} \right|_{z=0} = -\frac{r}{c_v} \quad (10)$$

12

CRSの原理 (1.36),(1.38),(1.39)の理論的背景(2)

境界条件(9)(10)のように時間的に変化しない場合、(1)式のような放物型微分方程式の解は、ある時間経過後定常状態に達し、

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}(t)}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon(z)}{\partial z^2} \quad (11)$$

定常状態での解

常微分

$$(1),(5),(11) \Rightarrow c_v \frac{\partial^2 \varepsilon(z)}{\partial z^2} = \frac{r}{h_0} \quad (12)$$

(12)式を境界条件(13),(14)のもとで積分

$$\text{非排水面 } \left. \frac{\partial \varepsilon(z)}{\partial t} \right|_{z=h_0} = 0 \quad (13)$$

$$\text{排水面 } \varepsilon(z)|_{z=0} = \varepsilon(0) \quad (14)$$

$$\varepsilon(z) = \varepsilon(0) - \frac{r}{c_v h_0} \left(h_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (15)$$

$$\varepsilon(0) - \varepsilon(h_0) = \frac{r h_0}{2 c_v} \quad (16)$$

線形弾性を仮定

$$\varepsilon = m_v \sigma' \quad (17)$$

$$\boxed{z=0 \text{ では } u=0} \\ \sigma = \sigma'$$

有効応力の原理 $\sigma = \sigma' + u$ (18)

$$(15) \quad \sigma'(z) = \sigma - \frac{r}{m_v c_v h_0} \left(h_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (19)$$

$$(17) \quad u(z) = \frac{r}{m_v c_v h_0} \left(h_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (20)$$

$$\text{zのみの関数 } \frac{du}{dz} = 0 \quad (21)$$

2次曲線

CRSの原理 (1.36),(1.38),(1.39)の理論的背景(3)

全応力 σ は供試体内では一定
+(17),(18),(19),(21)

$$m_v \text{ は (17) より } m_v = \frac{d\varepsilon}{d\sigma'} \quad (26)$$

$$\frac{d\sigma'}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\bar{\sigma}'}{dt} = \frac{1}{m_v} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{r}{m_v h_0} \quad (22)$$

m_v 一定で、供試体が定常状態になると(22)が成立し、

$$z=h_0 \text{ の過剰間隙水圧 } \Delta u_t \\ (20) \quad \Delta u_t = \frac{r h_0}{2 m_v c_v} \quad (23)$$

$$m_v = \frac{d\varepsilon}{d\sigma'} = \frac{\varepsilon(z,t) - \varepsilon(z,t-\Delta t)}{\sigma(z,t) - \sigma(z,t-\Delta t)} = \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\Delta \sigma} = \frac{r \Delta t}{h_0 \Delta \sigma} \quad (27)$$

$$(22),(23) \quad \Delta u_t = \frac{h_0^2}{2 c_v} \frac{d\sigma}{dt} \quad (24)$$

$$\text{平均過剰間隙水圧 } m_v = \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\Delta \sigma} \quad (1.38)$$

$$\text{したがって } c_v = \frac{h_0^2}{2 \Delta u_t} \frac{d\sigma}{dt} \quad (25)$$

$$\Delta \bar{u}(z) = \left[\frac{r}{m_v c_v h_0} \int_0^{h_0} \left(h_0 z - \frac{z^2}{2} \right) dz \right] / h_0 \quad (23) \\ = \frac{r}{m_v c_v h_0} \left[\frac{h_0^2}{2} - \frac{h_0^3}{6} \right] = \frac{r h_0}{2 m_v c_v} \frac{2}{3} = \frac{2}{3} \Delta u_t \quad (28)$$

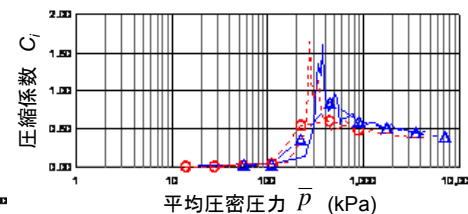
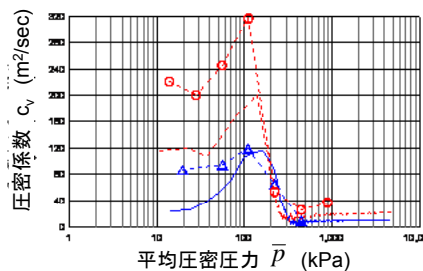
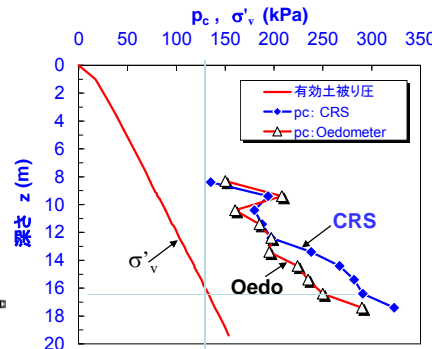
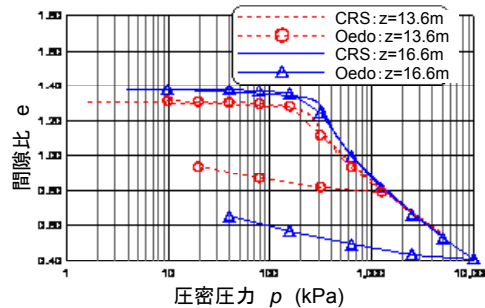
$$c_v = \frac{\Delta \sigma h_0^2}{2 \Delta \bar{u}_t \Delta t} \quad (1.39)$$

$$\text{平均圧密圧力: } \bar{\sigma}' = \sigma - \bar{u} = \sigma - \frac{2}{3} \Delta u_t \quad (29)$$

$$p_t = \sigma_t - \frac{2}{3} \Delta u_t \quad (1.36)$$

標準圧密試験とCRS試験の比較

ヘトナムハイソ粘土



本日のTechnical terms

圧密試験: consolidation test, oedometer test

ボーリング: boring; サンプルング: sampling

過圧密比: overconsolidation ratio (OCR)

一次圧密: Primary consolidation

二次圧密(圧縮): secondary consolidation (compression)

定はずみ速度圧密試験: constant rate of strain test (CRS test)

課題 (11/18)

- 前ページのe-logp関係のうち、深さ16.6mのCRS試験から得られる p_c は概略いくらか。
- 16.6mの深さの有効土被り圧 p'_0 が130kPaとすると、この深さの土の過圧密比(OCR)はいくらか。

宿題(提出: 11/25)

土粒子密度 $\rho_s=2.5\text{g/cm}^3$ 、初期高さ $h_0=2\text{cm}$ 、直径6cm(断面積 $A=28.26\text{cm}^2$)、初期質量 $m_0=98.81\text{g}$ 、乾燥質量 $m_s=70.65\text{g}$ の圧密試験供試体がある。これに対して、段階荷重圧密試験(標準圧密試験)を行い、圧密圧力 p を40kPaから80kPaに増加させる荷重段階において、90%圧密時間(t_{90})は10minであり、供試体は18mmから17mmに圧縮した。

- この供試体の初期含水比(w_0)、間隙比(e_0)、飽和度(S_0)はいくらか?
- この荷重段階における、体積圧縮係数(m_v)、圧密係数(c_v)、透水係数(k)はいくらか?