

低地帯の地盤高平面図

■地盤高別面積一覽表

地盤高	面積 (km²)	割合 (%)
A.P. ±0m以下 (干潮面)	31.5	5.1%
A.P. 2m以下 (満潮面)	124.3	20.0%
A.P. 5m以下	254.6	41.0%
A.P. 5m以上	366.6	59.0%

23区面積 621.2km² (平均)

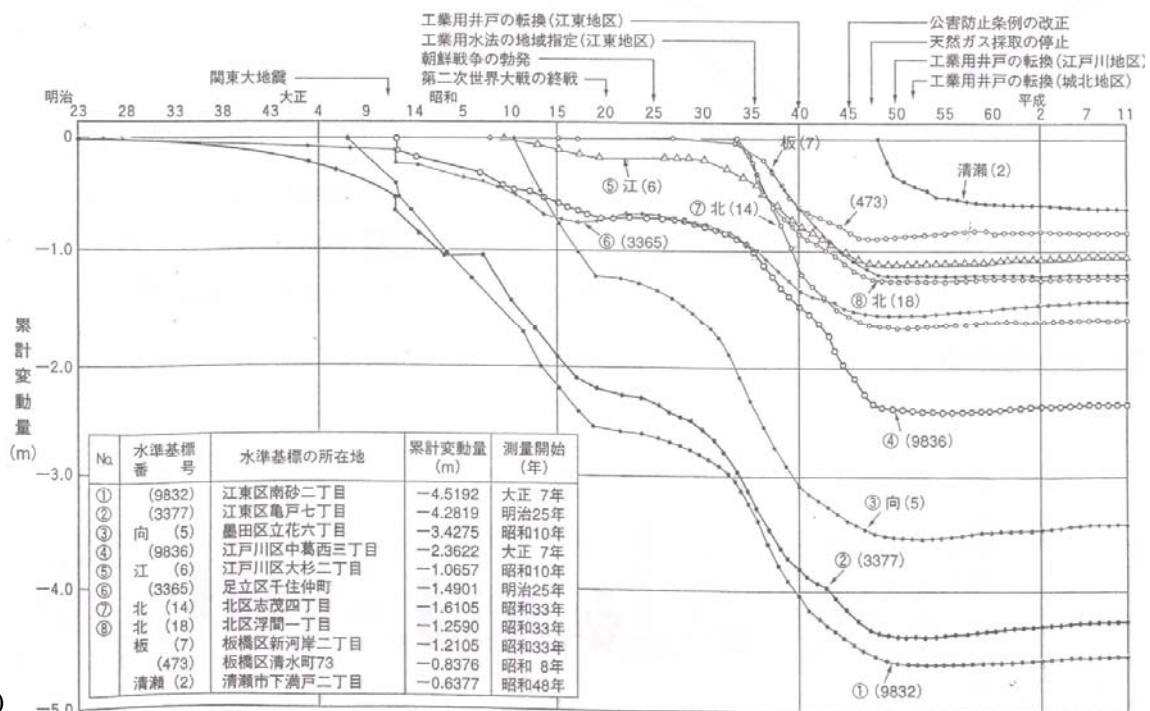
なぜ、海面下地域が広いのか

凡 例

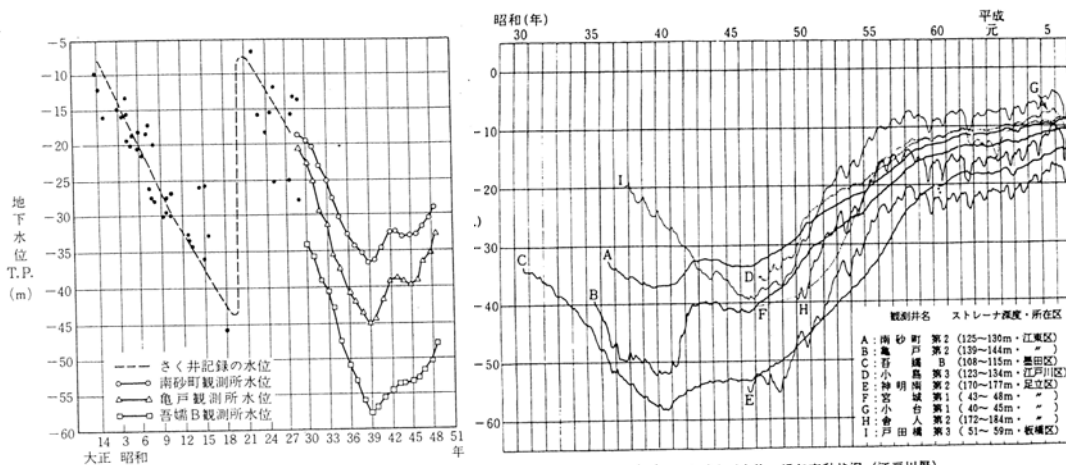
- 満潮面以上であるが高潮の脅威にさらされる地域 (A.P. +5.0m)
- 満潮面以下の地域 (A.P. +2.0m)
- 干潮面以下の地域 (A.P. ±0.0m)
- 主な水準点 (低地帯の地盤沈下の項参照)

1

■主要水準基標の累計変動量



地盤沈下の原因は？
地下水位の変遷を見ると

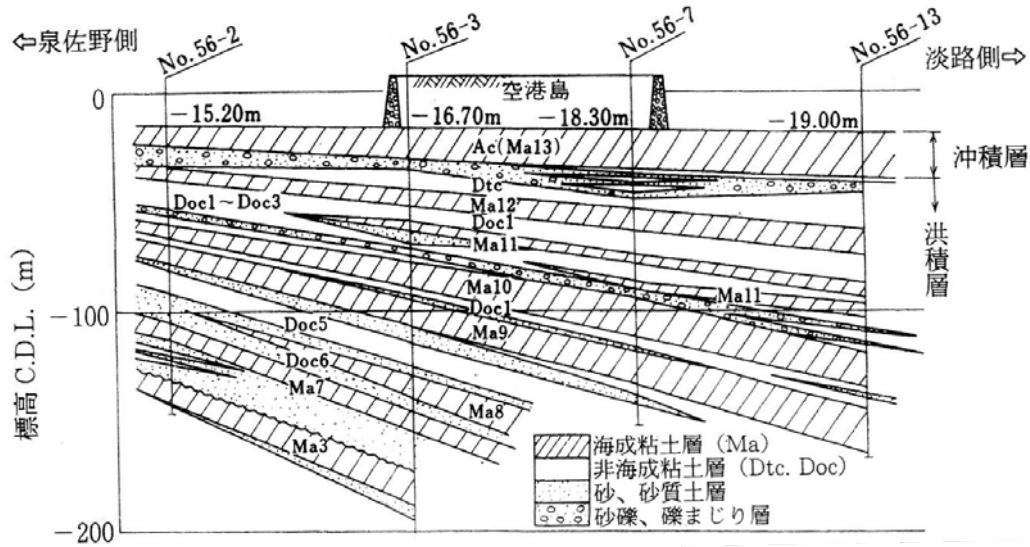


図・6.9 江東地区の地下水位の変動状況

図3-4 (1) 被圧地下水位の経年変動状況 (江戸川層)

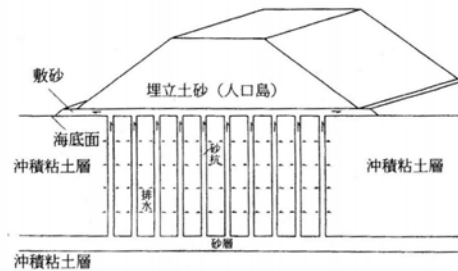
地下水位とは？
なぜ地下水位が変動するのか？
なぜ、地下水位が低下すると地盤沈下するのか？
地下水位が回復しても、なぜ元の高さまで地盤が隆起しないのか？

関西国際空港沈下記録



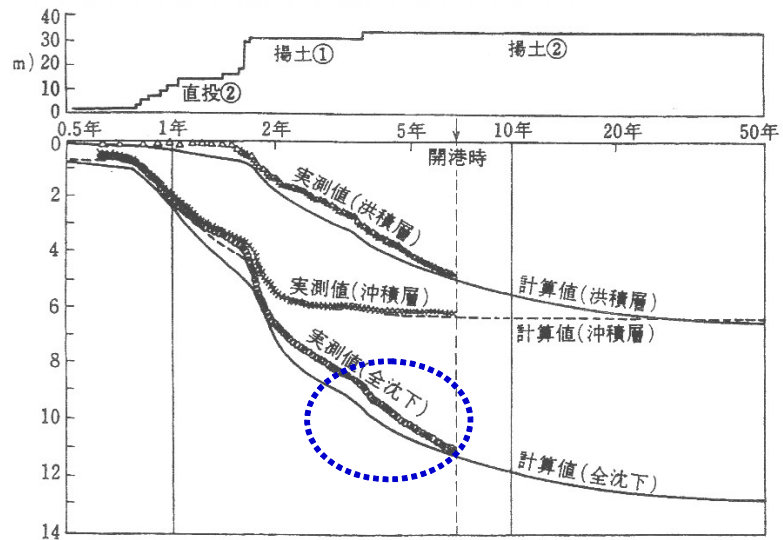
盛土をすると、どうして沈下するのか？
 どうして、沈下がゆっくり生じるのか？

1)



10年目程度までの沈下は、かなり正確に予測。

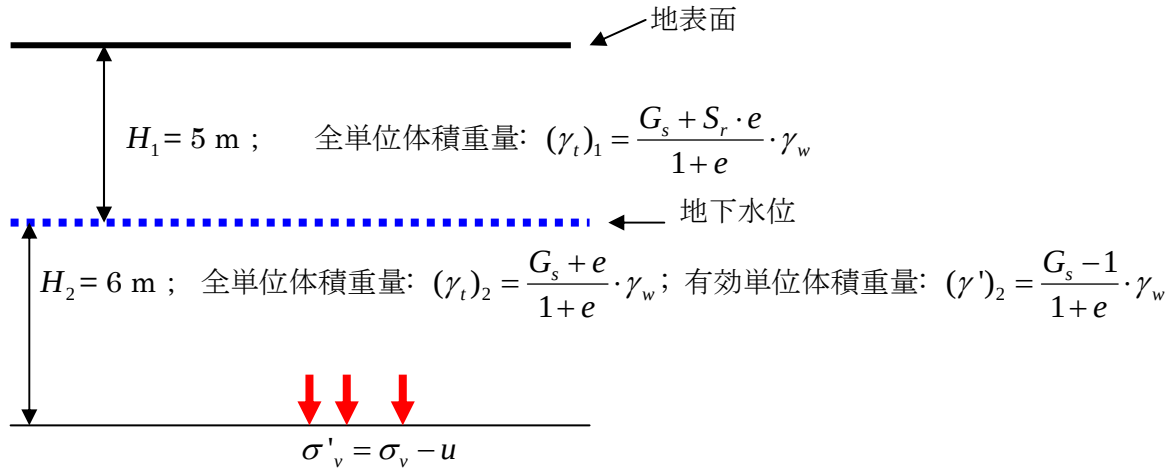
問題は、それ以降の長期残留沈下！



2)

圧密演習 1)

- 1) 下図の例で、深さ $H_1 + H_2$ での全応力での上載圧 σ 、有効応力での上載圧 σ' 、間隙水圧 u を求めよ。全層で $e = 0.7$, $G_s = 2.7$ 、 H_1 で $S_r = 95\%$ とせよ。
- 2) 地下水位が 2 m 低下した場合、 S_r 等の数値は不変と仮定すると、 σ'_v はどれだけ増えるか？



答

1) 地下水位よりも上の地層の単位体積重量 $(\gamma_t)_1 = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 + 0.95 \cdot 0.7}{1 + 0.7} \cdot \gamma_w = 1.98 \cdot \gamma_w$

地下水位よりも下の地層の単位体積重量：

$$(\gamma_t)_2 = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 + 1.0 \cdot 0.7}{1 + 0.7} \cdot \gamma_w = 2.0 \cdot \gamma_w ; \quad (\gamma')_2 = \frac{G_s - 1}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 - 1}{1 + 0.7} \cdot \gamma_w = 1.0 \cdot \gamma_w$$

$$(\sigma_v)_{\text{before}} = (\gamma_t)_1 \cdot H_1 + (\gamma_t)_2 \cdot H_2 = 1.98(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 5(\text{m}) + 2.0(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 6(\text{m})$$

$$= 21.9(\text{tonf} / \text{m}^3) = 2.19(\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

$$u_{\text{before}} = \gamma_w \cdot H_2 = 1.0(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 6(\text{m}) = 6.0(\text{tonf} / \text{m}^2) = 0.6(\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

$$(\sigma'_v)_{\text{before}} = (\gamma_t)_1 \cdot H_1 + (\gamma')_2 \cdot H_2 = 1.98(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 5(\text{m}) + 1.0(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 6(\text{m})$$

$$= 15.9(\text{tonf} / \text{m}^3) = 1.59(\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

または、 $(\sigma'_v)_{\text{before}} = (\sigma_v)_{\text{before}} - u_{\text{before}} = 2.19(\text{kgf} / \text{cm}^2) - 0.6(\text{kgf} / \text{cm}^2) = 1.59(\text{kgf} / \text{cm}^2)$

- 1) 地下水位が 2 m 低下した場合、 S_r 等の数値は不変と仮定すると、

$$(\sigma_v)_{\text{after}} = (\sigma_v)_{\text{before}} = (\gamma_t)_1 \cdot H_1 + (\gamma_t)_2 \cdot H_2$$

$$(\sigma'_v)_{\text{after}} = (\gamma_t)_1 \cdot H_1 + (\gamma')_2 \cdot (H_2 - 2\text{m}) + (\gamma_t)_2 \cdot 2\text{m} = (\gamma_t)_1 \cdot H_1 + (\gamma')_2 \cdot (H_2 - 2\text{m}) + \{(\gamma')_2 + \gamma_w\} \cdot 2\text{m}$$

$$= (\gamma_t)_1 \cdot H_1 + (\gamma')_2 \cdot H_2 + \gamma_w \cdot 2\text{m} = (\sigma'_v)_{\text{before}} + \gamma_w \cdot 2\text{m}$$

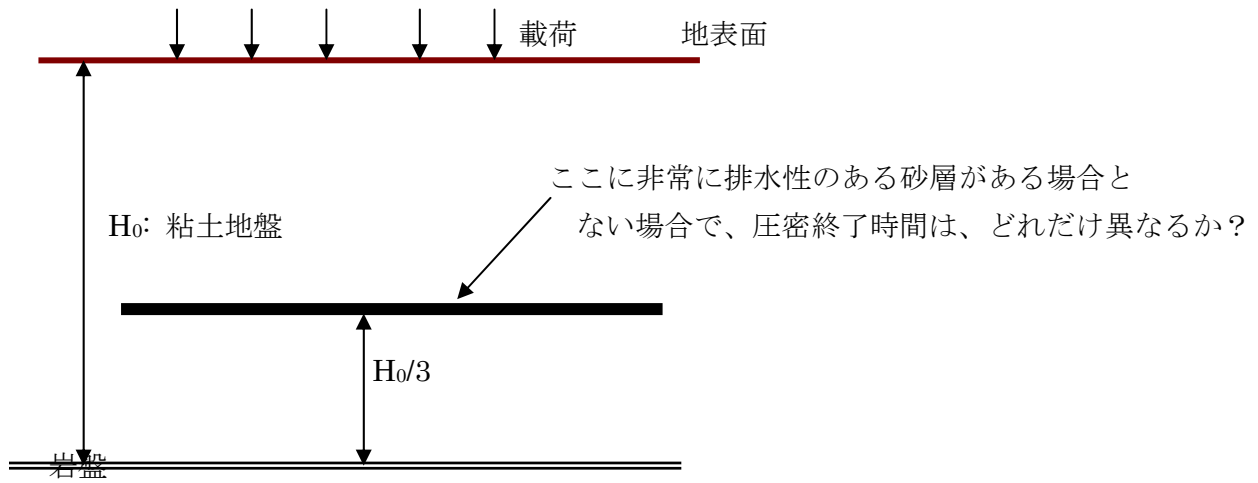
または、

$$(\sigma'_v)_{\text{after}} = (\sigma_v)_{\text{after}} - u_{\text{after}} = (\sigma_v)_{\text{before}} - (u_{\text{before}} - \gamma_w \cdot 2\text{m})$$

$$= (\sigma_v)_{\text{before}} - u_{\text{before}} + \gamma_w \cdot 2\text{m} = (\sigma'_v)_{\text{before}} + \gamma_w \cdot 2\text{m}$$

即ち、 $\Delta\sigma'_v = (\sigma'_v)_{\text{after}} - (\sigma'_v)_{\text{before}} = \gamma_w \cdot 2\text{m} = 2.0(\text{tonf} / \text{m}^2) = 0.2(\text{kgf} / \text{cm}^2)$ だけ増加する。

演習問題 2):



[答]排水距離が $1/3$ になったから、圧密終了時間は $1/9$ になる。

圧密演習 3) :

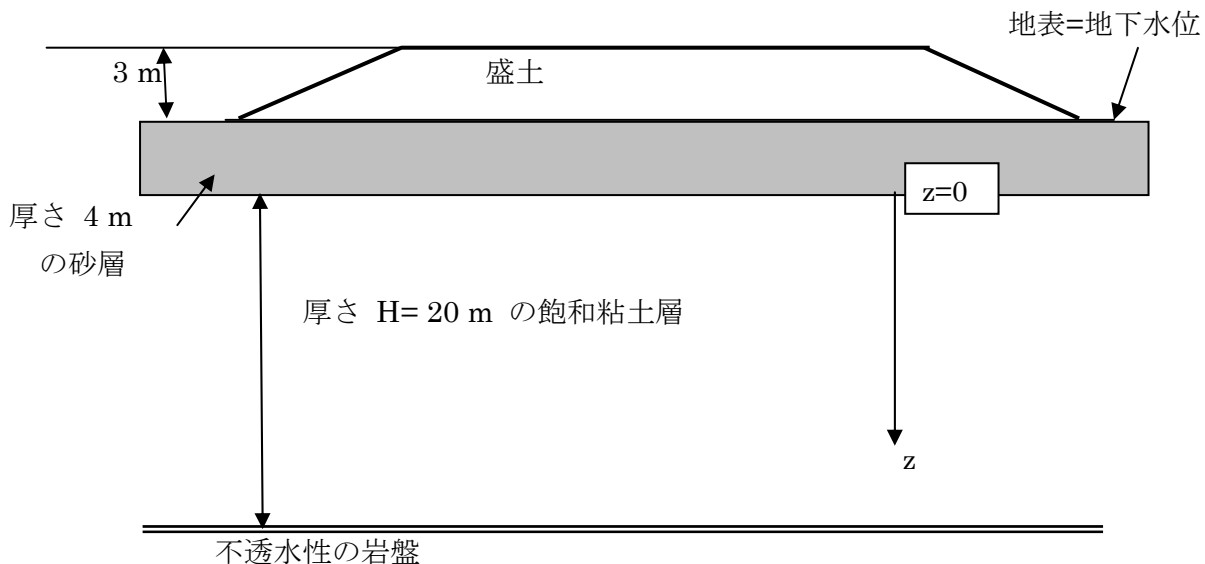
下図のような一様な飽和粘性土地盤に、非常に広い範囲で一定の高さ (3m) の盛土を建設した。盛土は、平均間隙比 $e=0.75$ 、粒子比重 $G_s=2.65$ 、飽和度 $S_r=50\%$ であった。粘性土地盤は、厚さ $H=20\text{ m}$ で、初期間隙比 $e=2.5$ 、粒子比重 $G_s=2.7$ 、 $C_c=0.75$ であり、地表近くは砂層 (厚さ 2 m 、平均間隙比 $e=0.65$ 、 $G_s=2.65$ 、飽和度 $S_r=100\%$) が存在しており、下端は岩盤である。

盛土による砂層の圧縮を無視し、地下水面は常に地表面に存在しているとして、盛土による地盤の最終的な総沈下量 S_f を計算せよ。

計算手順

- 1) 盛土建設前の粘土地盤内の初期有効応力 σ'_0 の深度分布を計算する。
- 2) 盛土による荷重増加量 (全応力の増加分) $\Delta\sigma_v$ を計算する。
- 3) 各深度 z での盛土荷重によるひずみの増分 $\Delta\varepsilon_v$ を計算する。
- 4) $\Delta\varepsilon_v$ を、深度方向に積分して沈下量 S_f を求める。

その際、厳密法、実務的法、簡便法、超簡便法で計算し、その結果を比較せよ。



$$\text{厳密法: } S_f = \int dS = \int \Delta\varepsilon_v \cdot dz \quad (1a)$$

$$\Delta\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{C_c [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma'_v) - \log(\sigma'_0)]}{1+e_0} = \frac{C_c}{(1+e_0) \cdot \ln 10} [\ln(\sigma'_0 + \Delta\sigma'_v) - \ln(\sigma'_0)] \quad (1b)$$

を直接積分する。

実務的方法: 粘土層を区分して、各層で $\Delta S_f = \Delta\varepsilon_v \cdot \Delta z$ (Δz は各層の厚さ) を計算して合計する。

簡便法: $z=H/2$ に対して (1b) 式を計算して得た ($\Delta\varepsilon_v$ at $z=H/2$) を用いて、

$$S_f = \int dS \approx H \cdot (\Delta\varepsilon_v \text{ at } z=H/2) \quad (3)$$

を計算する。

$$\text{超簡便法: } \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_0} = \frac{1}{\ln 10} \cdot \ln \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_0} = \frac{1}{2.3} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'_v}{\sigma'_0} \right) \approx \frac{1}{2.3} \cdot \frac{\Delta\sigma'_v}{\sigma'_0} \quad (2) \text{ を用いる。}$$

$z=H/2$ に対して (2) 式を計算して、これを (1b) に代入して得た ($\Delta\varepsilon_v$ at $z=H/2$) を用いて、

$$S_f = \int dS \approx H \cdot (\Delta\varepsilon_v \text{ at } z=H/2) \quad (3)$$

を計算する。

答)

1) 盛土建設前の粘土地盤内の初期有効応力 σ'_0 の深度分布を計算する。

$$\text{砂層の有効単位体積重量を求める：} (\gamma')_{\text{砂層}} = \frac{G_s - 1.0}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.65 - 1}{1 + 0.65} \cdot \gamma_w = 1.0 \cdot \gamma_w$$

$$\text{粘土層の有効単位体積重量を求める：} (\gamma')_{\text{粘土層}} = \frac{G_s - 1.0}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 - 1}{1 + 2.5} \cdot \gamma_w = 0.486 \cdot \gamma_w$$

以上から、粘土地盤内の初期有効応力 σ'_0 の深度 $z(m)$ に対する分布は、

$$\begin{aligned} (\sigma'_0)_{\text{初期}} &= 1.0(\text{tonf} / m^3) \cdot 4(m) + 0.486(\text{tonf} / m^3) \cdot z(m) \\ &= 4.0(\text{tonf} / m^2) + 0.486 \cdot z(\text{tonf} / m^2) \end{aligned}$$

2) 盛土による荷重増加量（全応力の増加分） $\Delta \sigma_v$ を計算する。

$$\text{盛土の全単位体積重量を求める：} (\gamma_t)_{\text{盛土}} = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.65 + 0.5 \cdot 0.75}{1 + 0.75} \cdot \gamma_w = 1.73 \cdot \gamma_w$$

$$\text{従って、} \Delta \sigma_v = 1.73 \cdot \gamma_w (\text{tonf} / m^3) \cdot 3(m) = 5.2(\text{tonf} / m^2)$$

3) 各深度 z での盛土荷重によるひずみの増分 $\Delta \varepsilon_v$ を計算する。

2) $\Delta \varepsilon_v$ を、深度方向に積分して沈下量 S_f を求める。

厳密法：

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_v &= -\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{C_c [\log(\sigma'_0 + \Delta \sigma_v) - \log(\sigma'_0)]}{1 + e_0} = \frac{C_c}{(1 + e_0) \cdot \ln 10} [\ln(\sigma'_0 + \Delta \sigma_v) - \ln(\sigma'_0)] \\ &= \frac{0.75}{(1 + 2.5) \cdot 2.3} [\ln(4.0 + 0.486 \cdot z + 5.2) - \ln(4.0 + 0.486 \cdot z)] \\ &= 0.093 [\ln(18.9 + z) - \ln(8.23 + z)] \end{aligned}$$

$$S_f = \int_{z=0}^{20m} \Delta \varepsilon_v \cdot dz = 0.093 \left[\int_{z=0}^{20m} \ln(18.9 + z) \cdot dz - \int_{z=0}^{20m} \ln(8.23 + z) \cdot dz \right]$$

$\int \ln(a + z) \cdot dz = [(a + z) \cdot \ln(a + z) - z]$ を利用すると、

$$\begin{aligned} S_f &= 0.093 [(18.9 + z) \cdot \ln(18.9 + z) - z - (8.23 + z) \cdot \ln(8.23 + z) + z]_{z=0}^{z=20} \\ &= 0.093 [(18.9 + z) \cdot \ln(18.9 + z) - (8.23 + z) \cdot \ln(8.23 + z)]_{z=0}^{z=20} = 0.91m \end{aligned}$$

実務的方法：各層での $\Delta S_f = \Delta \varepsilon_v \cdot \Delta z$ （ Δz は各層の厚さ）を計算して、合計する。

$\Delta \varepsilon_v = 0.093 [\ln(18.9 + z) - \ln(8.23 + z)]$ を用いて、

$z = 0 - 2m$ では、

$$\Delta \varepsilon_v = 0.093 [\ln(18.9 + 1) - \ln(8.23 + 1)] = 0.0714, \quad (\Delta S_f)_{z=0-2m} = \Delta \varepsilon_v \cdot \Delta z = 0.0714 \cdot 2 = 0.14(m)$$

$z = 2 - 6m$ では、

$$\Delta\varepsilon_v = 0.093[\ln(18.9 + 4) - \ln(8.23 + 4)] = 0.0583, (\Delta S_f)_{z=2-6m} = \Delta\varepsilon_v \cdot \Delta z = 0.0583 \cdot 4 = 0.23(m)$$

z= 6 – 12 m では、

$$\Delta\varepsilon_v = 0.093[\ln(18.9 + 9) - \ln(8.23 + 9)] = 0.0448, (\Delta S_f)_{z=6-12m} = \Delta\varepsilon_v \cdot \Delta z = 0.0448 \cdot 6 = 0.27(m)$$

z= 12 – 20 m では、

$$\Delta\varepsilon_v = 0.093[\ln(18.9 + 16) - \ln(8.23 + 16)] = 0.0339,$$

$$(\Delta S_f)_{z=12-20m} = \Delta\varepsilon_v \cdot \Delta z = 0.0339 \cdot 8 = 0.27(m)$$

従って、 $(S_f)_{z=0-20m} = 0.91(m)$ となり、厳密法と一致した。

簡便法： z= H/2 に対して (1b)式を計算して得た($\Delta\varepsilon_v$ at z= H/2)を求めると、

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_v &= 0.093[\ln(18.9 + z) - \ln(8.23 + z)] \\ &= 0.093[\ln(18.9 + 10) - \ln(8.23 + 10)] = 0.043\end{aligned}$$

$$S_f = (\Delta\varepsilon_v)_{z=10m} \cdot 20(m) = 0.043 \cdot 20(m) = 0.86(m)$$

意外と厳密解に近い値である。

超簡便法： $\log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} = \frac{1}{\ln 10} \cdot \ln \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} = \frac{1}{2.3} \cdot \ln(1 + \frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_0'}) \approx \frac{1}{2.3} \cdot \frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_0'}$ (2) を用いる。

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_v &= -\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{1}{1+e_0} \cdot C_c \cdot \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} = \frac{C_c}{(1+e_0) \ln 10} \cdot \ln \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} \approx \frac{C_c}{(1+e_0) \ln 10} \cdot \frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} \\ &= \frac{0.75}{(1+2.5) \cdot 2.3} \cdot \frac{5.2}{4.0+0.486 \cdot z} = 0.093 \cdot \frac{10.7}{8.23+z} = \frac{1.0}{8.23+z}\end{aligned}$$

z= H/2 に対して、

$$(\Delta\varepsilon_v)_{z=10m} = 1.0 \cdot \frac{1}{8.23+z} = 1.0 \cdot \frac{1}{8.23+10} = 0.055$$

$$S_f = (\Delta\varepsilon_v)_{z=10m} \cdot 20(m) = 0.055 \cdot 20 = 1.1(m)$$

超簡便法に値は厳密法とやや異なる。この差は、

$$\log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} = \frac{1}{\ln 10} \cdot \ln \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_0'} = \frac{1}{2.3} \cdot \ln(1 + \frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_0'}) \approx \frac{1}{2.3} \cdot \frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_0'}$$

の誤差のためである。この近似式は、 $\frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_0'}$ が小さいほど正しいが、この例では誤差がやや大きい。

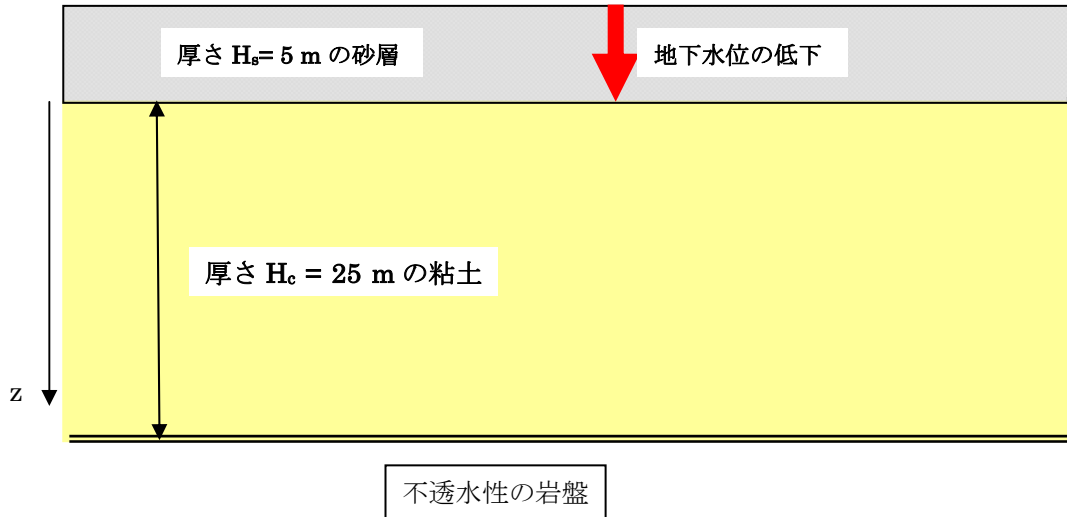
圧密演習 4) :

下図のような地盤において、地下水位が砂層の上端面（地表面と一致）から砂層の下端面へ低下した。低下後十分時間が経過して沈下が収まった時の最終沈下量 S_f を簡便法で求めよ。ただし、

1) 地下水位の低下による砂層の圧縮は無視せよ。

2) 粘性土は、厚さ $H_c = 25 \text{ m}$ で、初期間隙比 $e = 2.0$ 、粒子比重 $G_s = 2.7$ 、 $C_c = 0.7$ であり、

3) 砂層は、平均間隙比 $e = 0.70$ 、 $G_s = 2.7$ 、飽和度 S_r は地下水位低下前は 100 % で低下後は 50 % である。



答)

1) 地下水位低下前の粘土地盤内の初期有効応力 σ'_0 の深度分布を計算する。

$$\text{砂層の有効単位体積重量を求める: } (\gamma')_{\text{砂層}} = \frac{G_s - 1.0}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 - 1.0}{1 + 0.7} \cdot \gamma_w = 1.0 \cdot \gamma_w$$

$$\text{粘土層の有効単位体積重量を求める: } (\gamma')_{\text{粘土層}} = \frac{G_s - 1.0}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 - 1.0}{1 + 2.0} \cdot \gamma_w = 0.567 \cdot \gamma_w$$

以上から、粘土地盤内の初期有効応力 σ'_0 の深度 $z(\text{m})$ に対する分布は、

$$(\sigma'_0)_{\text{初期}} = 1.0(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 5(\text{m}) + 0.567(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot z(\text{m}) = 5.0(\text{tonf} / \text{m}^2) + 0.567 \cdot z(\text{tonf} / \text{m}^2)$$

2) 地下水位低下による有効応力の増加分 $\Delta\sigma'_v$:

$$\text{地下水位低下後の砂層の全単位体積重量: } (\gamma_t)_{\text{砂層}} = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.7 + 0.5 \cdot 0.7}{1 + 0.7} \cdot \gamma_w = 1.79 \cdot \gamma_w$$

$$\text{従って、} \Delta\sigma'_v = (1.79 - 1.0) \cdot \gamma_w(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 5(\text{m}) = 3.95(\text{tonf} / \text{m}^2)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_v &= -\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{1}{1 + e_0} \cdot C_c \cdot \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_0} = \frac{C_c}{(1 + e_0) \ln 10} \cdot \ln \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_0} \\ &= \frac{0.7}{(1 + 2.0) \cdot 2.3} \cdot \ln \frac{5 + 0.567z + 3.95}{5 + 0.567z} = 0.101 \cdot \ln \frac{5 + 0.567z + 3.95}{5 + 0.567z} \end{aligned}$$

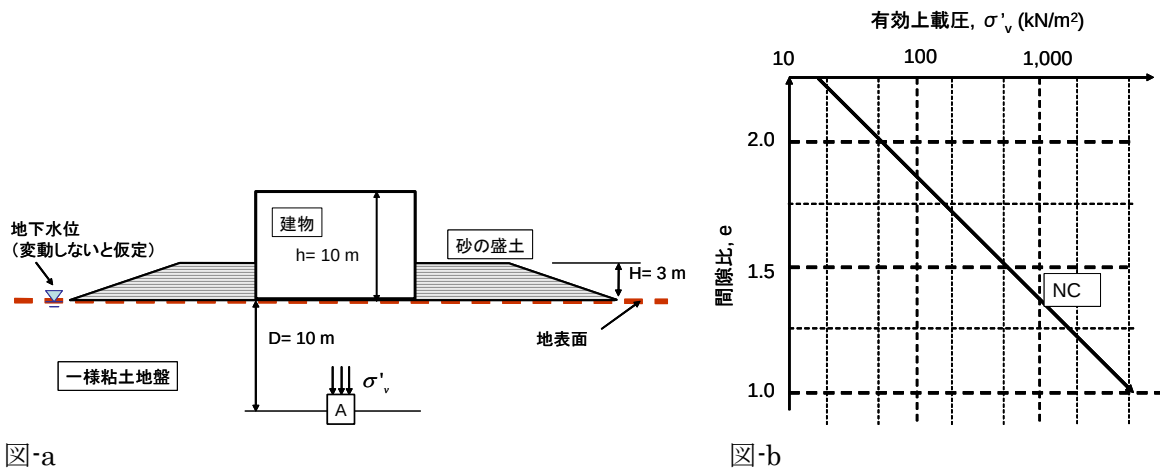
$z = H/2$ に対して、

$$(\Delta\varepsilon_v)_{z=12.5\text{m}} = 0.101 \cdot \ln \frac{5 + 0.567z + 3.95}{5 + 0.567z} = 0.101 \cdot \ln \frac{16.0}{12.1} = 0.028$$

$$S_f = (\Delta\varepsilon_v)_{z=12.5\text{m}} \cdot 25(\text{m}) = 0.028 \cdot 25(\text{m}) = 0.7(\text{m})$$

圧密演習 5)

図-a に示すように、一様な正規圧密粘性土地盤（平均初期間隙比 $e_0 = 2.0$ 、粒子比重 $G_s = 2.62$ ）が存在する。図-b に示す NC は、この粘土の正規圧密状態での有効上載圧 σ'_v と間隙比 e の関係である。



以下の問に答えよ。

- 砂盛土と建物を建設する前の初期状態での「図-a に示す要素 A の有効上載圧 σ'_v と間隙比 e を座標とする点」を図-b に示せ。
- この正規圧密粘性土地盤の圧縮指数 C_c の値を示せ。
- この粘性土地盤に図-3 に示すような砂盛土（平均間隙比 $e = 0.8$ 、粒子比重 $G_s = 2.6$ 、平均飽和度 $S_r = 50\%$ ）を建設した後の「要素 A の有効上載圧 σ'_v と間隙比 e を座標とする点」を図-b に示せ。
- この粘性土地盤に砂盛土を建設してから 5 年後に除去し、その後建物（単位体積重量は水の $1/10$ ）を建設した。この場合の建物の沈下量と、砂盛土を建設しないで直ちに建物を建設した場合の沈下量の大小関係を示せ。その理由を、図-b を活用して説明せよ。

答)

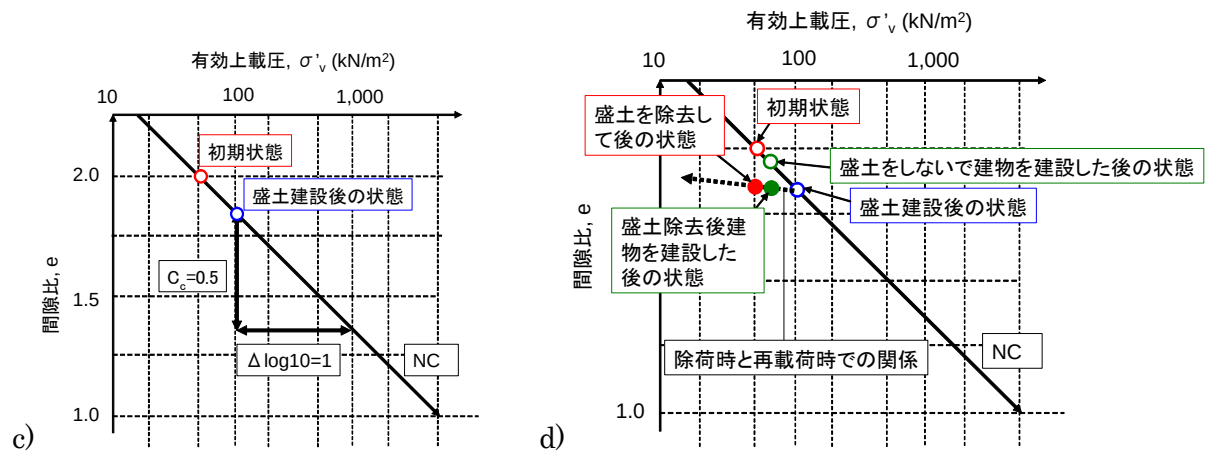
- 砂盛土と建物を建設する前の初期状態での要素 A の初期間隙比 e_0 は 2.0 なので、その座標とする点」を図-b のようになる。この要素の初期有効上載圧 σ'_v は、

$$\text{粘土層の有効単位体積重量} : (\gamma')_{\text{粘土層}} = \frac{G_s - 1.0}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.62 - 1}{1 + 2.0} \cdot \gamma_w = 0.54 \cdot \gamma_w$$

粘土地盤内深さ $D = 10\text{m}$ での初期有効応力 σ'_0 は、

$$(\sigma'_0)_{\text{初期}} = 0.54(\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 10(\text{m}) = 5.4(\text{tonf} / \text{m}^2) = 52.9(\text{kN} / \text{m}^2)$$

従って、この点は粘土の図中の直線上に位置する。



b) 図 c から、この正規圧密粘性土地盤の圧縮指数 $C_c = 0.5$ である。

c) 砂盛土の全単位体積重量を求める：
$$(\gamma_t)_{\text{盛土}} = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2.6 + 0.5 \cdot 0.8}{1 + 0.8} \cdot \gamma_w = 1.67 \cdot \gamma_w$$

従って、有効上載圧は $\Delta \sigma'_v = 1.67 \cdot \gamma_w (\text{tonf} / \text{m}^3) \cdot 3(\text{m}) = 5.0 (\text{tonf} / \text{m}^2) = 49 (\text{kN} / \text{m}^2)$

だけ増加して、 $\sigma'_v = 53 + 49 (\text{kN} / \text{m}^2) = 102 (\text{kN} / \text{m}^2)$ となる。

その時の座標は、図 c に示すようになる。

d) 建物（単位体積重量は水の 1/10）により地盤に加わる荷重は、 $1 \text{ tonf} / \text{m}^2 = 9.8 \text{ kN} / \text{m}^2$ である。
盛土を建設しないでいきなり建物を建設すると、図 d に示すようにこの荷重によって粘土は圧縮して地盤は沈下する。砂盛土を建設後除荷してから建物を建設した場合は、圧縮曲線の勾配は 1/10 程度以上小さくなり圧縮性は小さくなるので、地盤の沈下量ははるかに小さくなる。