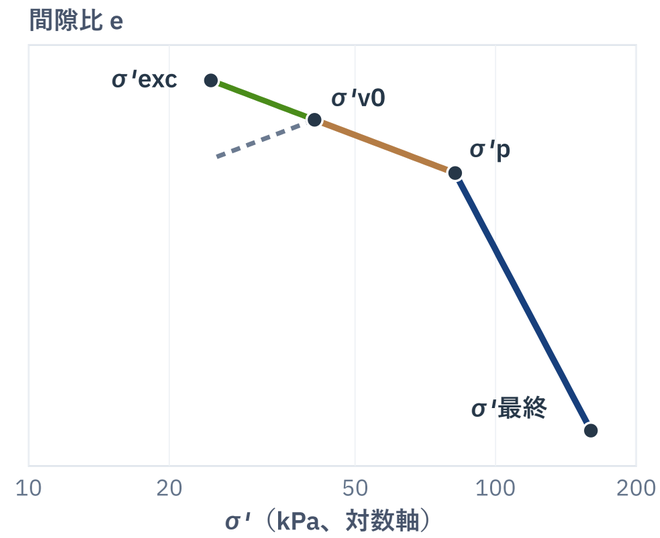
地盤工学講義スライド・沈下

圧密沈下

講義：粘土層の一次元圧密沈下；応力経路、先行圧密、掘削と膨張、Boussinesq応力、mv法と時間；各項目に計算例。

応力経路 / $C_c \cdot C_r \cdot C_s$ / 掘削とヒービング / Boussinesq / m_v法 / 時間依存沈下



この講義で学ぶこと

粘土の**応力経路**を追跡する：$\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$（$C_s$、$C_r$、$C_c$）

初期応力（σ_{v0}、u_0、σ'_{v0}）および**先行圧密応力**（$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$）を求めること

掘削の除荷と膨潤の影響、および沈下が**どの基準**から測定されるかを区別すること

Boussinesqによる応力増分と**影響深さ**を計算する方法

分割片の圧縮の**4つの領域**（再圧密、正規圧密）を適用すること。**m_v**法との比較。

時間依存の圧密（T_v、U、t_{50}、t_{90}）および層状地盤の沈下－時間曲線の描画

講義の流れ

各項目は**3つの手順**で扱う：

1 · **理論**：規則は何か、なぜそうなるのか

2 · **問題**：与条件と求めるもの

3 · **解答**：数値を用いて手順ごとに

例題地盤：厚さ6 mの粘土、地下水位は地表面（$\sigma'_{v0} = 8.19\,z$）、$e_0 = 1.0$、$C_c = 0.30$、$C_r = 0.06$。4 × 6 m基礎、q = 150 kPa。沈下はmm単位である。

このモジュールで計算する内容

理論

プロファイルの**各層はすべて粘土**である。他の土は入力できない。モジュールは粘土の**一次圧密**を計算する。荷重が作用すると水が徐々に排出され、粘土は応力経路に沿って圧縮する。

即時（弾性）沈下は弾性沈下モジュールにあり；両者の合計は総沈下（2B）モジュールにある。

解答は**解析的**である：Boussinesq の応力増分、分割片ごとの応力経路および Terzaghi の理論、静水圧の間隙水圧を用いる。有限要素は用いない。

対象外：砂質土層、二次圧密（C_α）、砂のSPT/CPT沈下、岩の沈下、2次元/3次元圧密、支持力、液状化。

符号の規約

沈下は**正**、隆起は**負**とする。正味変形量 $S_{net} = S_c + S_{heave}$。

初期応力から最終応力へ一段階では進まない

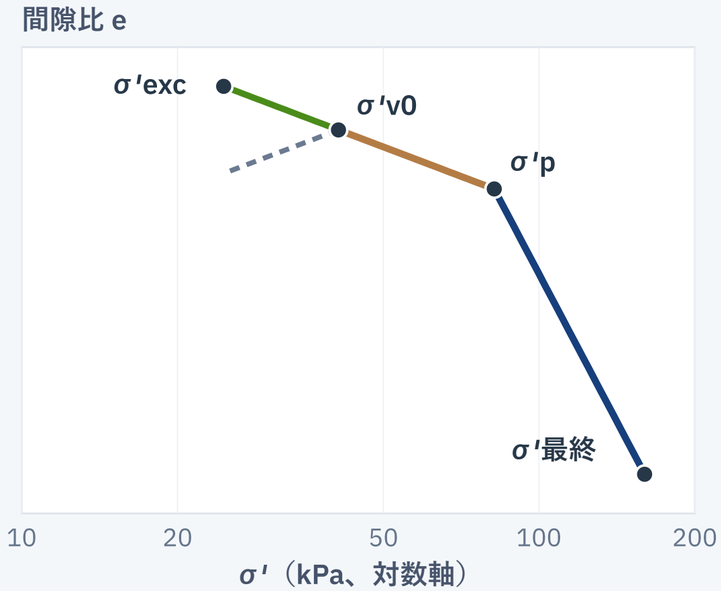
理論

計算は初期応力から最終応力へ**一段階で**進むことは決してない。掘削は有効応力を減らし、粘土は除荷線（C_s）に沿って**膨張する**。構造物が再載荷すると、粘土はまず同じ線をたどってσ'_{v0}に戻り（膨張は回復する）、次にC_rに沿ってσ'_pまで再圧密し、最終応力がσ'_pを超える場合は圧密降伏線（C_c）に沿って圧密する：

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_pは過去の最大応力であり、**掘削によって減少しない。**

載荷–除荷サイクルはσ'_{v0}で**閉じる**：取り除かれた上載土を単に元に戻すだけの載荷は、初期状態に対して沈下を生じない。C_sとC_rの値にかかわらずそうである。



模式図：破線は除荷、緑線は再載荷（C_s）、橙線は再圧縮（C_r）、青線は正規圧密（C_c）。

各分割片の中央点において

理論

基礎底面と計算深さz_{lim}の間の各層を、厚さが最大Δzの**分割片**に分割する（地下水位で区切る）。各応力は分割片の中央点で計算する：

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γは地下水位より上、γ_{sat}はその下で用いる；γ_w = 9.81 kN/m³。

初期地盤応力は以降の各段階の**基準**である。

分割片を薄くするほど結果は正確になる。手計算では単一分割片でも概算値が得られる。

地下水位が地表面にある場合

γ_{sat} = 18の場合、γ' = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³、σ'_{v0} = 8.19 z。以降の例題はすべてこの地盤を用いる。

問題

例題

与条件

地盤	$\gamma = 17$ kN/m^3（**地下水位より上**）、$\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**地下水位より下**）
地下水位	**地表面から1.5 m**
深さ	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

求めるもの

各深さにおける **σ_{v0}**、**u_0**、**σ'_{v0}**の値を求めよ。

解答

解答

1 z = 3.0 m（地下水位1.5 m）

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

地下水位より下ではσ'_{v0}の増加はより**緩やか**になる（勾配γ' = 8.19 kN/m³）：z = 6 mで全応力は106.5、有効応力はわずか62.4 kPaである。

GeoTervaで解答を確認する ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$または実験値

理論

各モデルには**単一の定義**を用いる：過圧密比OCRまたは室内試験のσ'_p値のいずれか：

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{または} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1：正規圧密粘土、$\sigma'_p = \sigma'_{v0}$であり、初期応力を超える載荷はすべて未圧密（正常）圧密である。

室内試験によるσ'_pの値がσ'_{v0}を下回る場合、警告を伴ってσ'_{v0}に引き上げる：**軽度の過圧密粘土は対象外である**。

σ'_pは過去の最大応力を示し、掘削によって低下しない。

OCRから何がわかるか

OCR = σ'_p / σ'_{v0}。OCRが大きいことは、粘土が荷重を受けてまず**小さなC_r**で圧縮される広い再圧縮領域があることを意味する。

問題

例題

与条件

分割片	**中点**$z = 3$ m：$\sigma'_{v0} = 24.57$ kPa（**地下水位は地表面、**$\gamma_{sat} = 18$）
ケース	**(a)** $OCR = 3$ ・ **(b) 室内** $\sigma'_p = 60$ kPa ・ **(c) 室内** $\sigma'_p = 20$ kPa

求めるもの

各ケースで**σ'_p**と**OCR**を求め、状態を解釈する。

解答

解答

1 (a) OCRが与えられた場合と(b)実験値

$$\text{(a)}:\ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad \text{(b)}:\ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) 室内試験値が σ′v0 より小さい場合

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow\ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a)および(b)は過圧密粘土（σ′p > σ′v0）である；(c)についてはモジュールが警告を発し、粘土を**正規圧密**とみなす（σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa）：過圧密の程度が小さい粘土は対象外である。

GeoTervaで解答を確認する ↗

除荷と膨張

理論

取り除かれた荷重は、掘削底面における**初期の有効上載圧**である（地下水位は変化しない。水中では取り除かれた重量をγ'で計算する）。除荷は掘削平面のBoussinesq影響係数I_{exc}で分散する（広い掘削では$I_{exc} = 1$）：

$$q_{uplift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{uplift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\, \Delta H}{1 + e_0}\, \log_{10} \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

膨張は**負**とする（沈下 +、膨張 −）。C_s が与えられていない場合は $C_s = C_r$ とし、報告書に明記する。

純圧力$q_{net} = q_{gross} - q_{uplift}$は報告のみ行う。計算は純圧力で一括して行わず、応力経路を追跡する。

NEDEN KABARMA?

掘削により有効応力が低下し、粘土が膨張する。構造物が再載荷されると膨張は回復する。これが膨張した地盤の**再圧縮**である。

基礎中心下のΔσ

理論

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

長方形B × L、その中心直下：Newmarkの隅角係数を用いて$I_z = 4 \cdot I_{隅角}$(m = B/2z′, n = L/2z′)：

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

（$V < m^2n^2$ のとき、逆正接の項は π だけ増加させる）。**帯状**（幅 B）荷重の中心線直下：$I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$、$\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$。$z' = 0$ のとき $I_z = 1$ である。

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

注記

応力増分は基礎中心下の鉛直線に沿って採る（分割片および時間解析）；色帯の領域では、基礎外の点に対しては隅角矩形に分割する。

問題

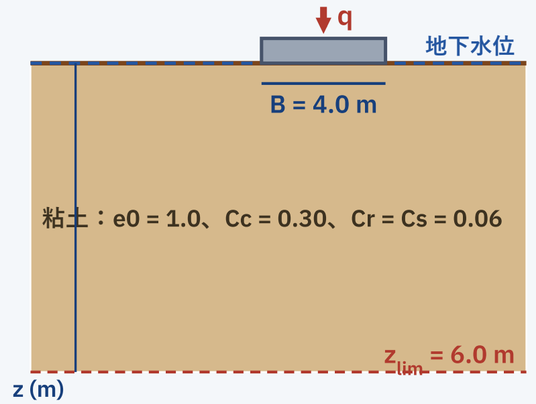
例題

与条件

基礎	**4 × 6 mの長方形、$q = 150$ kPa、地表面（$D_f = 0$）**
点	**分割片の中点 z′ = 3 m、中心の下方**
比較	**B = 4 m幅の帯状基礎**

求めるもの

I_zと$\Delta\sigma$；帯状荷重にも同じ値を用いる。



解答 (1/2)

解答

1 長方形：m = B/2z′ = 2/3 = 0.667；n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444,\quad m^2n^2 = 0.4444,\quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1}\frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 長方形と帯状

$$\text{長方形}: I;_z = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}\ \text{kPa}$$

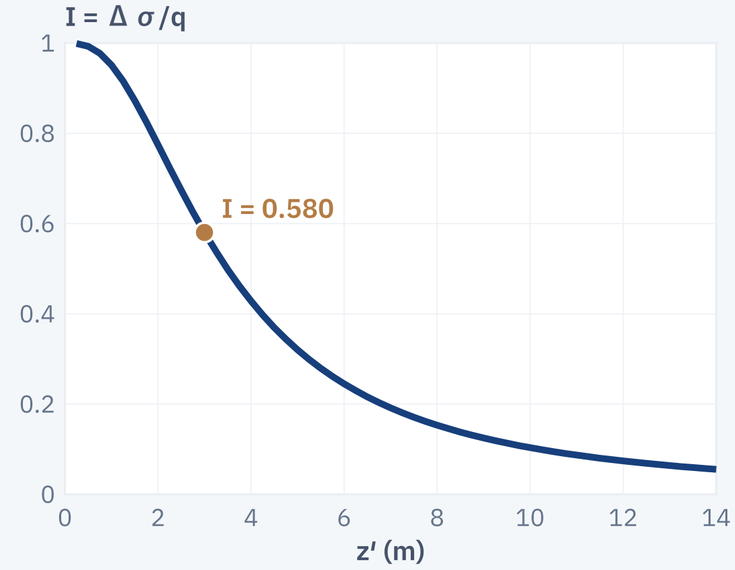
$$\text{帯状}: \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

解答 (2/2)

解答

z' (m)	I_z	$\Delta\sigma$ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



分割片の中央で$\Delta\sigma$ = **87.0 kPa**（qの58%）；狭い帯状荷重（同じB）では100.2 kPaとなる：**長い基礎はより深くまで影響する**。応力増分はz' = 10 mでもなお10%である。

GeoTervaで解答を確認する ↗

影響深さ：I(z′) = p

理論

応力増分は深さとともに減少するが決してゼロにはならない。分割片の圧縮量の総和には下端の限界が必要である：**計算深さz_{lim}**。影響深さの規則では、粘土は中心下のBoussinesq増分が載荷圧力の**p**倍まで低下するまで圧密する（一般にp = 10%）：

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

同じ影響係数は同一平面形状の掘削の除荷も支配する。したがって、根入れ深さは q_{gross} または q_{net} のいずれで評価しても同じである。

土層構成がz_{lim}より上方で終わる場合、最終層は同じ特性でz_{lim}まで続く。下方で終わる場合、z_{lim}以深の地盤は圧縮しないものとする。

別ルールでは**土層構成の下端**とする：剛な基盤を仮定する。（$\Delta\sigma = 0.2\ \sigma'_{v0}$ の基準は、深い位置の小さな基礎ではより深くなる。モジュールのルールは幾何形状のみに依存する。）

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
帯状	6.34 B	3.13 B

問題

例題

与条件

基礎	**(a) 4 × 6 m、p = %10および%20 ・ (b) 20 × 30 mのラフト基礎、p = %10および%20**
規則	**影響深さ；$D_f = 0$**

求めるもの

各ケースでz'とz_{lim}、4 × 6 mに対する$I(z')$の照査。

解答

解答

1 照査：4 × 6 m、p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

基礎	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
20 × 30 m のラフト基礎	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′は**基礎の寸法に比例する**：4 × 6 m基礎ではz_{lim} = 10.19 m、20 × 30 mのラフトでは**50.9 m**となる。ラフトは約51 mの深さまで圧縮する粘土を考慮する。

GeoTervaで解答を確認する ↗

再載荷時の分割片のピンチング

理論

分割片についてf = ΔH/(1 + e_0)；$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$として、最終応力の位置に応じた分割片の圧縮量：

条件	再載荷時の分割片のピンチング
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{final} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s f \log(\sigma'_{最終}/\sigma'_{掘削})$：ヒービングの一部は回復する
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{final}$（NC）	$S_b + S_v = C_c f \log(\sigma'_{最終}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{最終} < \sigma'_{除荷}$	C_sによる追加膨張（負）

掘削なしの場合

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ かつ $S_b = 0$：初期応力からの古典的な再圧密と正規圧密。

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

問題

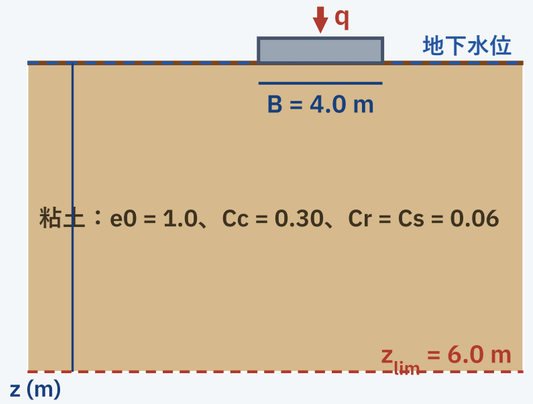
例題

与条件

地盤	**単一粘土層、厚さ6 m；**$\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3**；地下水位は地表面；**$e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
基礎	**4 × 6 mの長方形、**$q = 150$ kPa**、地表面（掘削なし）**
分割片	**単一分割片、H = 6 m、中点**$z = 3$ m**：**$\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57$ kPa
過圧密	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
応力増分	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04$ kPa**（例題3）⇒** $\sigma'_{final} = 111.61$ kPa

求めるもの

各粘土について**圧密状態**と圧密沈下S_c。



解答 (1/2)

解答

1 共通：f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m；log(σ'_{fin}/ σ'_{v0}) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6： σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{final} ⇒ 再圧縮のみ

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

同一の粘土、同一の荷重：正規圧密粘土は**591.6 mm**、OCR = 6の粘土は**118.3 mm**沈下する；差はC_c/C_r = 5の比に由来する。

解答 (2/2)

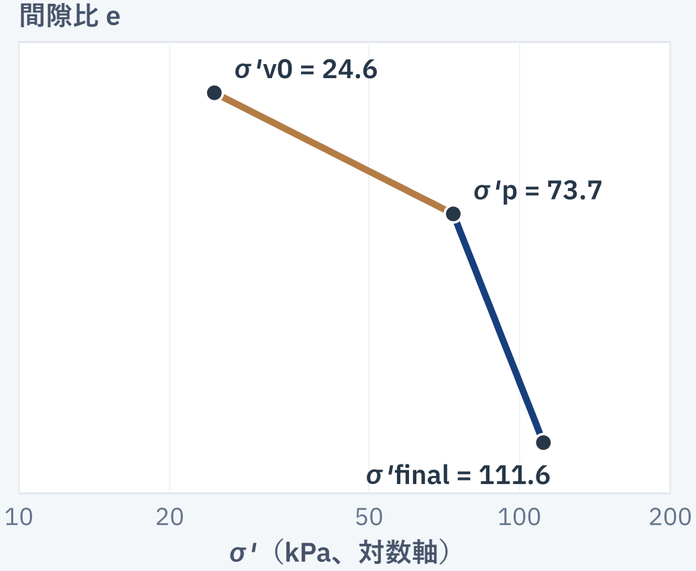
解答

3 (c) OCR = 3： $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{final} = 111.61$ ⇒ 再圧縮＋処女圧縮

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9 \text{ mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2 \text{ mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	状態	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	乱さない	0	591.6	**591.6**
6	147.4	再圧密	118.3	0	**118.3**
3	73.7	再圧密＋未圧密	85.9	162.2	**248.0**



GeoTervaで解答を確認する ↗

原地盤からか、それとも隆起した底面からか。

理論

掘削の後に基礎が続く：沈下は変位を**どの基準**から測るかに依存する（掘削段階での*掘削後変位*の選択）：

保持 — 原地盤から（デフォルト）：隆起も別途表示する。基礎の沈下は載荷終了時の正味変形である：$S = S_c + S_{隆起}$ = σ'_{v0}を超える全圧縮量。除去された上載土に等しいかそれ以下の荷重では$S = 0$となる。荷重が小さい場合、地盤は元の地表面より上に留まる（報告され、沈下は0）。

載荷前にゼロリセットする：掘削段階の変位をゼロとする。沈下はヒービングした掘削底面から測定する：$S = S_c = S_b + S_r + S_v$。ヒービングの再圧縮は沈下とみなす：完全に釣り合った基礎は、底面がヒービングした分だけ沈下する。構造物が建設されるまで掘削を開放したままにしてヒービングが生じた場合、これが正しい答えである。

2つの指標は常に出力される；選択により、基礎の沈下として報告される量、時間曲線および結果が決まる。

まとめ

保持：$S = S_c + S_{ヒービング}$（小）。ゼロとする：$S = S_c$（大）。

問題

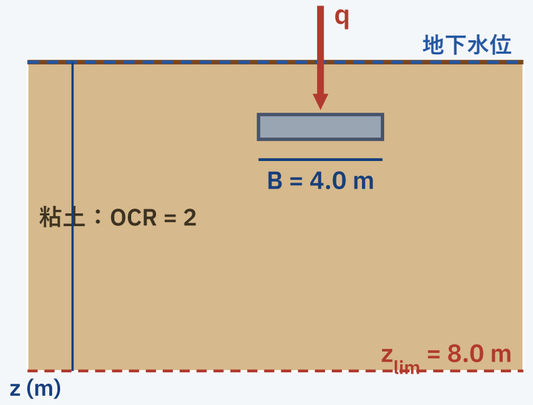
例題

与条件

地盤	**粘土0–8 m、$\gamma_{sat} = 18$、地下水位は地表面；** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$； $OCR = 2$
掘削	**広い掘削（$I_{exc} = 1$）、深さ2 m；基礎の掘削底面位置**
基礎	**4 × 6 m,** $q_{gross} = 100$ kPa
分割片	**単一分割片 2–8 m、**$H = 6$ m**、**$z = 5$ m**、** $f = 3$ m：$\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95$ kPa

求めるもの

σ'_{exc}、膨張量、S_b、S_r、S_v、S_c；基礎の沈下（原地盤からのものとリセット後のもの）。



解答 (1/3)

解答

1 掘削：除去荷重、除荷とヒービング

$$q_{uplift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = -\mathbf{39.9\ mm}$$

2 載荷：$I_z(z' = 3) = 0.5803$（例題3）、$\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

解答 (2/3)

解答

3 領域：$\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{final} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

再載荷時にはまず膨張が回復し（S_b = 39.9 mm = 膨張の全量）、次にC_rによる54.2 mmの再圧縮、そしてσ'_pをわずかに超える3.3 mmの正常圧密が生じる。

解答 (3/3)

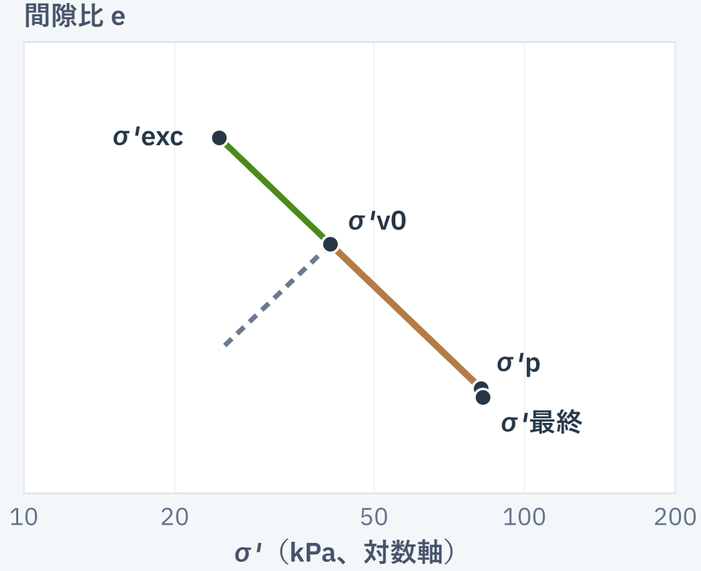
解答

4 基礎の沈下

保持される： $S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$

0になる： $S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$

原地盤から測った沈下は**57.5 mm**；隆起した底面から測ると**97.4 mm**である。差は隆起量に等しい（39.9 mm）：基準の選び方で結果が69%変わる。



GeoTervaで解答を確認する ↗

直線経路：$\Delta H = m_v \Delta \sigma' H$

理論

独立した**線形**の計算経路である：同一のm_vを除荷時にも再載荷時にも用いる；C_c、C_r、C_s、e_0は関与しない：

$$\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H_{slice}$$

$$\text{ヒービング} = -m_v \left(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc}\right) H \qquad S_c = m_v \left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right) H$$

S_cのうちσ'_{v0}までの部分は回復した膨張量（S_b）である。

線形であるため、ループは自然に閉じる。

m_vの単位は1/kPa（体積圧縮係数）；応力範囲に応じて選定する必要がある。

e – log σ′との違い

m_v法は応力レベルを考慮しない（σ'_pなし）：すべての応力増分が同じ圧縮量を与える。

問題

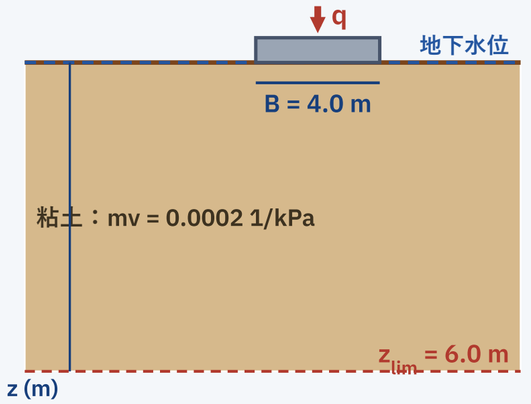
例題

与条件

地盤	**6 mの粘土、$m_v = 0.0002$ 1/kPa、地下水位は地表面**
ケース(a)	**切ばりなし：4×6 m、$q = 150$ kPa、$\Delta\sigma = 87.04$ kPa（例題3）**
ケース(b)	**例題6の掘削と基礎（2 m掘削、$q = 100$ kPa、2–8 mの分割片）**

求めるもの

いずれの場合も**S_c**。(b)ではヒービング、S_bおよび正味沈下。



解答

解答

1 (a) 掘削なし

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) 掘削あり：σ'_{v0} = 40.95；σ'_{exc} = 24.57；$\Delta\sigma_{load}$ = 58.03；σ'_{final} = 82.60 kPa

$$\text{ヒービング} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

原地盤からの純沈下S = S_c + 隆起 = **50.0 mm**；沈下を生じさせるのはσ'_{v0}を超える41.65 kPaの増分のみである。線形経路ではe – log σ'法にσ'_pの影響はない。

GeoTervaで解答を確認する ↗

Terzaghi：T_v、Uおよびt

理論

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

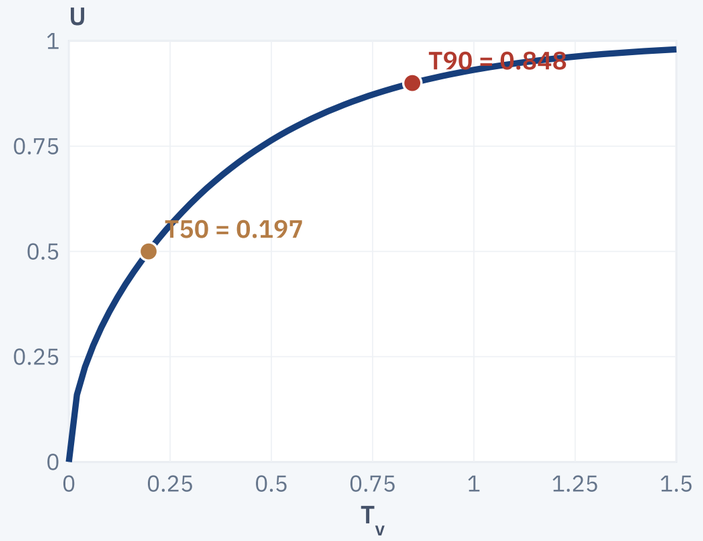
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H（片側排水）またはH/2（両側排水）；Hは基礎底面下の層厚（土層構成を超えて続く最終層についてはz_{lim}まで）。

$T_{v,50}$ = 0.197、$T_{v,90}$ = 0.848。T_v < 0.05では初期時間解 U = 2$\sqrt{(T_v/\pi)}$ を用いる。

C_vおよびH_{dr}の異なる層は異なる速度で圧密する：土層構成の曲線は**各層の曲線の和**であり、そのt_{50}およびt_{90}はこの和から読み取る。

曲線は載荷沈下S_cに関するものである。隆起は載荷前に完了していると仮定する。



問題

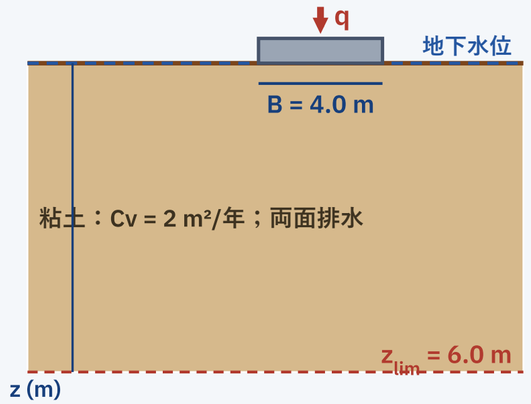
例題

与条件

粘土	**6 m、正規圧密（例題5a）：$S_c = 591.6$ mm**
圧密	**$C_v = 2\ \mathrm{m}^2/$年；上下端で排水（両面排水）**
時間	**t = 0.25、0.5、1、2、4、8年**

求めるもの

H_{dr}、t_{50}、t_{90}および**S(t)**。片側排水でのt_{90}。



解答 (1/2)

解答

1 排水経路と特性時間

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{年} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{年}$$

2 一方向排水（H_{dr} = 6 m）

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3}\ \text{年}$$

両面排水では排水距離が半分になり、時間は**4分の1**に低下する：t_{90} = 3.82 年、片面排水では 15.3 年。

解答 (2/2)

解答

t（年）	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	$S(t) = U\,S_c$ (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

1年で沈下のわずか53%、4年で91%が完了する（S_c = 592 mm）。8年でU = 0.990である。小さなT_v値（< 0.05）では$U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$を用いる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

基礎	4 × 6 m、q = 150 kPa、地表面載荷；地下水位は地表面（γ_{sat} = 18）
層A（0–4 m）	軟弱、NC：$e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$；$C_v = 1$；両面排水
層B（4–8 m）	硬質、$OCR = 2$：$e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$；$C_v = 3$；片面排水
計算	地盤プロファイルの下端（8 m）；各層を1分割片とする（A：z = 2 m、B：z = 6 m）

求めるもの

各層のS_c値、t_{50}およびt_{90}；系のS(t)曲線。

解答 (1/3)

解答

1 A：z = 2 m、 σ'_{v0} = 16.38；$I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ $\Delta\sigma$ = 116.19； σ'_{final} = 132.57；f = 4/2.10 = 1.9048 m；NC

$$S_{c,A} = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048)\log\frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B：z = 6 m、 σ'_{v0} = 49.14、 σ'_{p} = 98.28、$I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ $\Delta\sigma$ = 36.74、 σ'_{final} = 85.88 < σ'_{p}、f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222)\log\frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

圧密沈下の合計は**627.0 mm**：軟弱なNCの上層が全体の97%を負担し、硬く過圧密な下層はわずか21.6 mmである。

解答 (2/3)

解答

3 排水経路と時間（$t = 0.197\, H_{dr}^2/C_v$；$0.848\, H_{dr}^2/C_v$）

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{年}$$

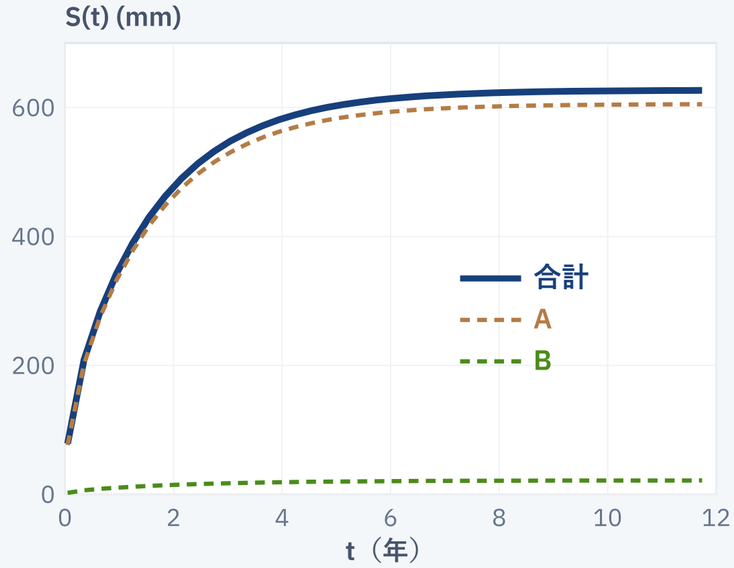
$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{年}$$

系の曲線は$S(t) = U_A(t)\, S_A + U_B(t)\, S_B$の和であり、固有の時間はこの和から読み取る：**$t_{50}$ = 0.794年、t_{90} = 3.43年**（支配的なA層に近い）。

解答 (3/3)

解答

t（年）	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000



1年で沈下の56%、5年で96%が完了する；約10年で終了する（627 mm）。曲線は**軟弱なA層**によって決まる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

結果を読む際の留意点

理論

基礎位置 = 掘削底面（掘削がなければ地盤表面）；**静水圧**の間隙水圧；地下水位は掘削の影響を受けない。

応力増分は**基礎中心直下の鉛直線**上で求める（分割片と時間解析）；色分けされた領域は各点で同じ応力経路をたどる。

e_0は各段階の初期間隙比である；**二次圧密（C_α）は考慮しない**。

沈下を正、隆起を負とする。ヘッダーの切替えスイッチで符号を反転し、上向き正の表示に切り替える（計算エンジンは従来のままである）。

色帯：沈下、膨張、変形のように深さとともに急減する領域は$1・1.5・2・3・5・7 \times 10^n$の階級で塗り分ける。等間隔の帯では下層部が単一色に圧縮されてしまう。

まとめ

ポイントのまとめ

応力経路：$\sigma'_{v0} \to \sigma'_{exc} \to \sigma'_{v0}$（$C_s$）$\to \sigma'_{p}$（$C_r$）$\to \sigma'_{最終}$（$C_c$）；$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$であり、掘削によって減少しない

分割片の圧縮 $f = \Delta H/(1 + e_0)$：NC：$C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$；OCかつ$\sigma'_{final} \le \sigma'_p$：$C_r\, f \log(\ldots)$；$\sigma'_{final} > \sigma'_p$：$C_r + C_c$の部分

掘削：$q_{除荷} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$、リバウンド $= -C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$；$S = S_c + S_{リバウンド}$（原地盤）または$S_c$（再ゼロ設定）

Boussinesq：$\Delta\sigma = q\, I_z(z')$。長方形中心は$4\, I_{角}$、帯状は$(\alpha + \sin\alpha)/\pi$。**$z_{lim}$**：$I(z') = p$（正方形2.09 B、L = 1.5 Bで2.55 B、帯状6.34 B）

m_v法：$\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$、線形；膨れ上がり $= -m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\, H$

時間：$T_v = C_v\, t/H_{dr}^2$；$T_{v,50} = 0.197$、$T_{v,90} = 0.848$；$H_{dr} = H$（片面排水）または$H/2$（両面排水）；$S(t) = \Sigma\, U_i\, S_{c,i}$

参考文献

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

注記

数値例はすべてモジュール自身の計算エンジンで作成されており、モジュールは同じ値を与える（例の分割片：dz = 層厚）。

GeoTerva

オンライン地盤工学計算

理論から実務へ

このプレゼンテーションの例題をGeoTervaで手順ごとに計算する；モジュールでは層数と掘削形状を自由に入力できる。

モジュールを開く →

理論ページ →

スマートフォンで開く

お試しモジュールは登録不要です。

講義で使用したい場合：info@geoterva.com