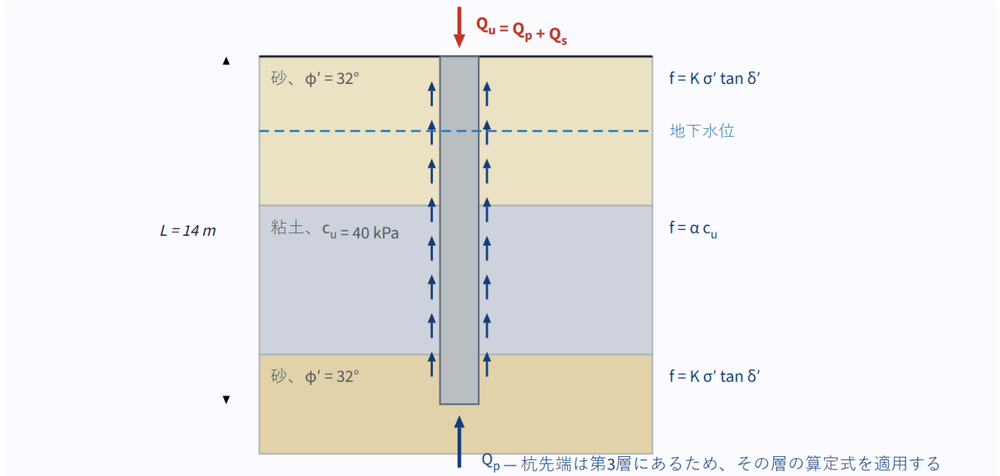
GeoTerva

地盤工学の講義スライド・杭

成層地盤における杭の支持力

講義：砂層と粘土層を貫く杭の支持力。どの規則がどこで適用されるか、有効応力が各層を通じてどのように累積するか；各項目に計算例を付す。

層別計算　先端：先端の層　砂＋粘土の規則　場所打ち杭　計算例



この講義で学ぶこと

有効応力を**層ごとに累積する**こと；粘土層が、その強度が砂に及ばなくとも、自重によって下の砂にどのように影響するかを見ること

先端支持力が先端の存在する層のみに依存し、その層の規則で計算されることを理解すること

砂層ではK–δ則（臨界深さL′ = 15Dは杭全体に適用）を、**粘土層**ではα、λおよびβ則を適用すること

層にわたって周面抵抗を合計する方法；層境界で摩擦が急変することと杭長の影響を解釈する方法

場所打ち杭ではα*の範囲とc_{ub}が複数の層から得られうることを理解すること

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

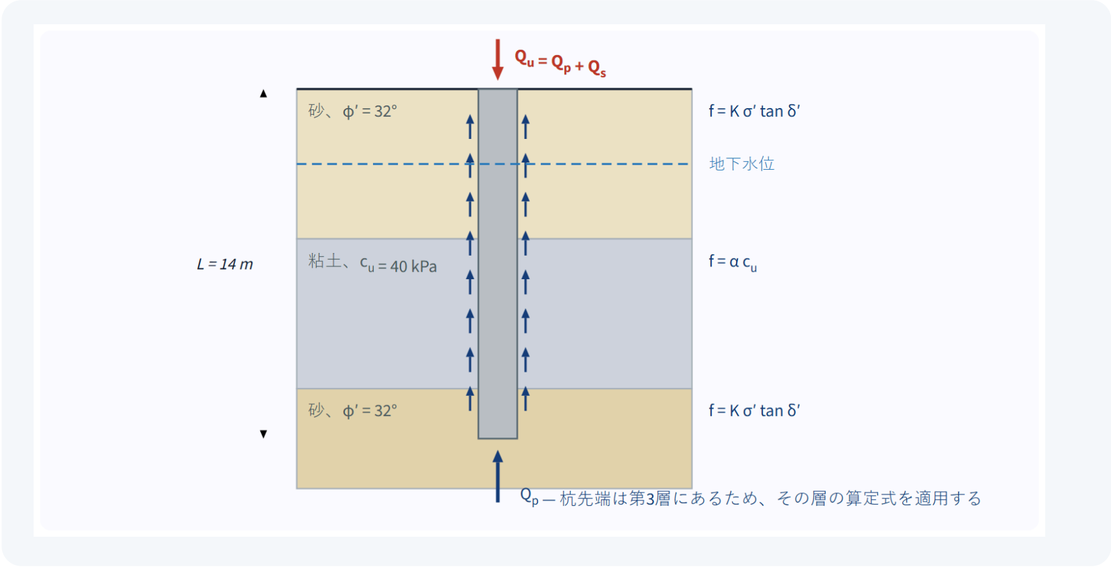
3 · **解答**：数値を用いて手順ごとに

例題の多くは同じ杭で行う：長さ14 m、砂–粘土–砂の土層構成を貫く直径0.4 mの杭。

本講義は**砂中の杭**および**粘性土中の杭**の講義の上に構築される：規則はそこで学んだ。ここではどちらがどこで妥当するかを確認する。

各層はそれぞれの規則に従って応答する

理論



杭が単一の地盤に収まることはまれである。プロファイルは**複数の層**からなり、各層は砂または粘土として定義され、**その材料自身の規則**を適用する。支持力もまた二つの部分からなるが、もはや単一の式から読み取るのではなく、**部分ごとに積み上げる**：

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

新しい理論はない：砂の規則は砂モジュールに、粘土の規則は粘土モジュールに属する。

新しいのは**計算の枠組み**である：どの規則が杭周面のどの部分に適用され、有効応力が上部の層からどのように累積するか。

先端支持力は**単一の層**から、周面摩擦抵抗は**全層の合計**から得られる。

応力は連続、摩擦は段階的

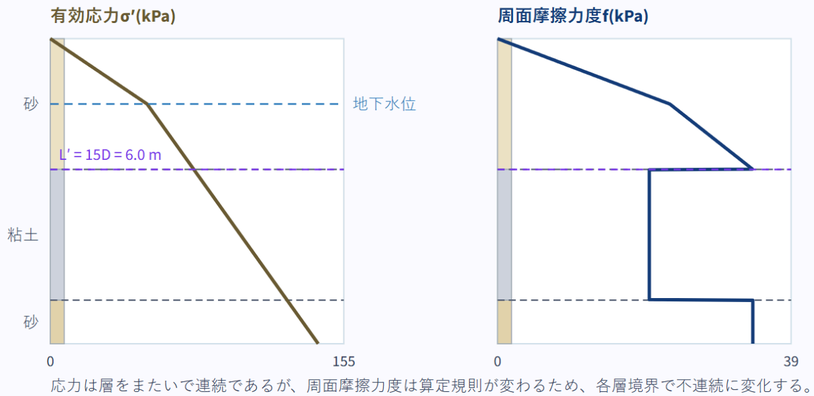
理論

有効鉛直応力は層をつなぐものである：**上方の各層の重量**が累積する；地下水位より上では湿潤単位体積重量、下では水中単位体積重量を用いる。

$$\sigma'(z) = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(地下水位以浅)}$$
$$+ \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(地下水位以深)}$$

粘土層は砂に自身の強度を与えない；しかし**その重量によって**、下にある砂が発揮する抵抗を変化させる。

一方、摩擦は連続ではない：砂–粘土境界では**規則自体が変化する**ため、単位摩擦は大きく跳躍することがある。この跳躍は計算の誤りではなく、成層土層構成の**特徴**である。



応力は層をまたいで連続であるが、周面摩擦力度は算定規則が変わるため、各層境界で不連続に変化する。

問題

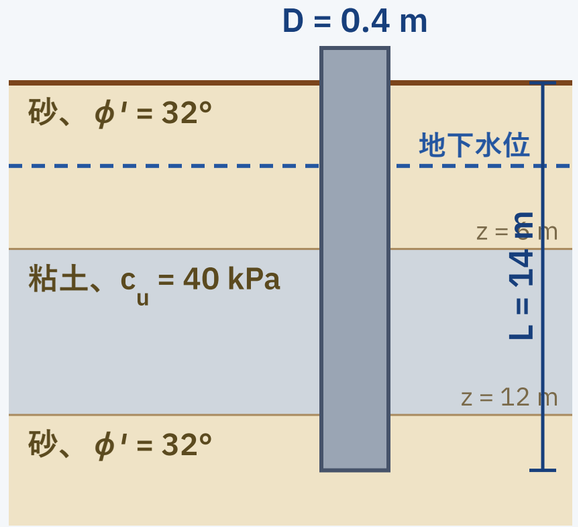
例題

与条件

砂1（0–6 m）	$\varphi' = 32^\circ$
粘土 (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**3層**）
地下水	**深さ3.0 mで**
杭	**打込み杭、D = 0.4 m、L = 14 m**
水の単位体積重量	$\gamma_w = 9.81$ kN/m^3

求めるもの

有効鉛直応力を深さ**3、6、12、14 m**で求める（14 m = 杭先端）。



解答 (1/2)

解答

1 地下水位まで（3 m）：層全体が湿潤、γ = 17

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m（砂–粘土境界）：地下水位以下では $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

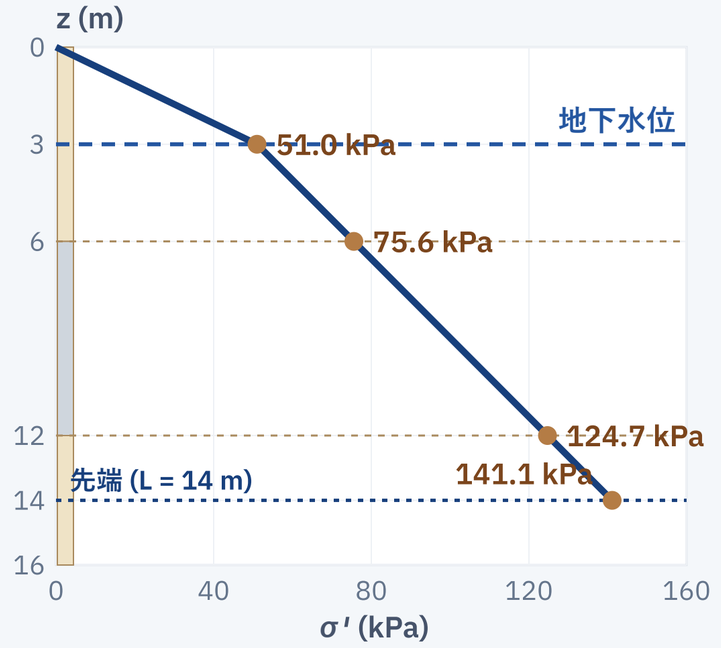
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m（粘土–砂境界）：粘土の γ_{sat}も18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m（杭先端）

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



解答 (2/2)

解答

5 各区分における σ' 分布図の面積（台形）；これらは周面摩擦の計算で平均応力を与える

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$

$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$

$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ' は**層を通じて連続である**。砂–粘土境界で跳びはない。勾配は地下水位と γ' が変化する箇所でのみ変わる。これら3つの領域は例題4および5で平均 $\bar{\sigma}'$ として用いる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

先端は自身の層のみに依存する

理論

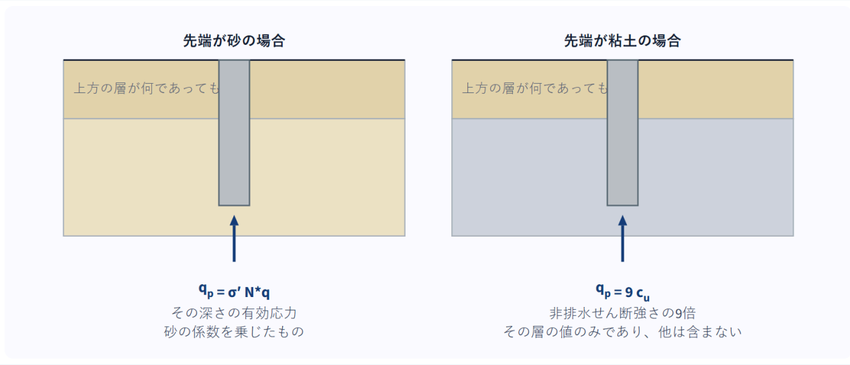
先端支持力は**単一の層**に属する：杭先端が存在する層である。その層の材料に応じて計算され；上部の層は σ' を通じてのみ（**砂の先端**では）影響し、**粘土の先端では全く影響しない**。

砂： $Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l,\quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$

粘土： $Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*,\quad N_c^* = 9$ (Meyerhof)

先端が**ちょうど境界**に一致する杭は、境界の**下**の層に支持されるとみなす。

Coyle–Castelloは**砂**の相関式である。粘土の先端では意味を持たず、選択しても粘土の規則が有効である。



砂の先端では σ' と N^*_q が支配的；粘土の先端ではその層の c_u 値のみ。

問題

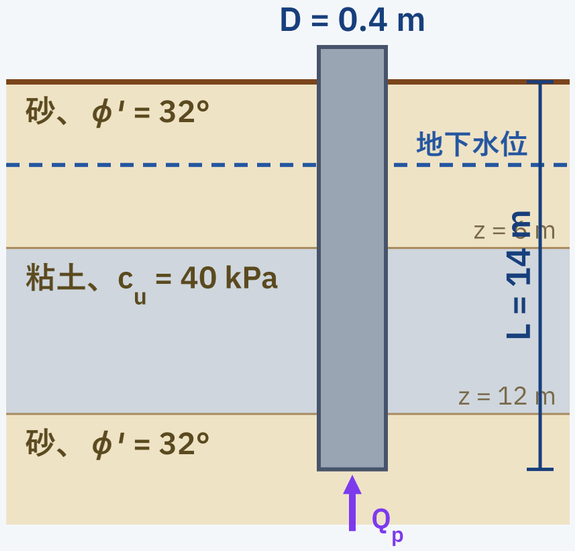
例題

与条件

砂1（0–6 m）	$\varphi' = 32^\circ$
粘土 (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**3層**）
地下水	**深さ3.0 mで**
杭	**打込み杭、円形断面、D = 0.4 m、L = 14 m**
先端支持力法	**Meyerhof**
大気圧	$p_a = 100$ kPa
先端の有効応力	$q' = \sigma'(14) = 141.1$ kPa（**例題1**）

求めるもの

先端がどの層にあるかを判定し、**先端支持力Q_p**を求める。



解答 (1/2)

解答

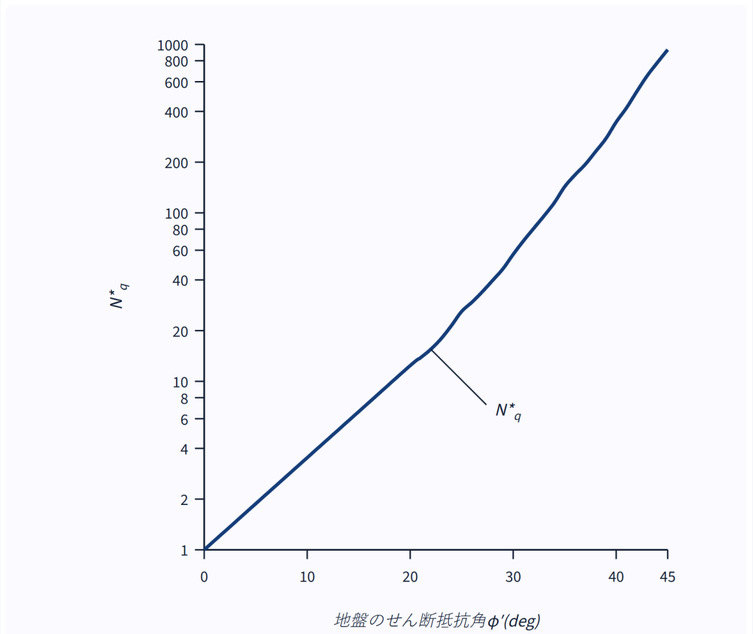
1 先端の層：L = 14 m、12–16 mの間の砂中 → 砂の規則（上部の粘土は先端に関係しない）

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1 \text{ kPa}$$

2 ϕ' = 32°に対するMeyerhofの図表からN^*_qを求め、次に2つの値を並べる

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428 \text{ kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531 \text{ kPa}$$

図表上のN^*_q値（側方）は81、$q'N^*_q$ = 11,428 kPaは限界値q_l = 2,531 kPaよりはるかに大きい：**限界値が支配する。**



解答 (2/2)

解答

3 単位先端支持力：両者の小さい方

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \text{kPa}$$

4 杭先端の面積と先端支持力

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \text{kN}$$

先端支持力は**318.0 kN**。杭先端が砂中にあるため砂の規則が適用される。限界値が支配しているため、この例では σ' の値は結果を変えない。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

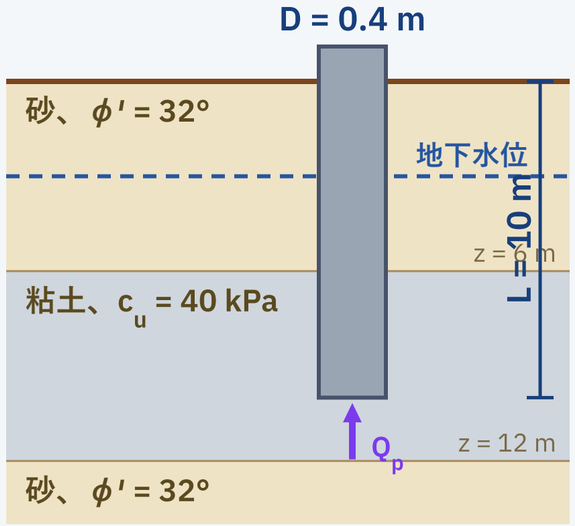
例題

与条件

砂1（0–6 m）	$\varphi' = 32^\circ$
粘土 (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**3層**）
地下水	**深さ3.0 mで**
杭	**同一の杭、ただし L = 10 m**
先端支持力算定法	**MeyerhofとVesic**
大気圧	$p_a = 100$ kPa

求めるもの

杭を10 mに短縮した場合、先端がどの層に位置するかを判定し、**先端支持力**を2つの方法で求めよ。



解答

解答

1 先端の層：L = 10 m、6–12 m間の粘土中 → 粘土の規則（砂および σ' はもはや計算に入らない）

$$c_u = 40 \text{ kPa} \qquad A_p = 0.1257 \text{ m}^2$$

2 Meyerhof：$N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360 \text{ kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2} \text{ kN}$$

3 Vesic：$I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$

$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$

$$q_p = 40(10.12) = 405 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9} \text{ kN}$$

先端が砂にある杭ではQ_p = **318 kN**であった。粘土中では**45 – 51 kN**で、約7分の1である。
同じ杭を2 m延長して先端を砂に到達させると、先端支持力は急激に増加する。

GeoTervaで解答を確認する ↗

K–δ：臨界深さは杭全体に属する

理論

砂層では、たて壁は水平有効応力に対する摩擦によって抵抗する。各砂層は**それぞれ独自の**Kと δ′の値をもつ：

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \;\; (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \;\; (z > L'),\;\; L' = 15D$$

L′は層ではなく**杭全体**に属する：L′以深では σ′の値はL′における値に保持される。

深部の砂層は、その境界がどこにあっても、**層を通じて一定**の単位周面摩擦を与える。

オプション：**Coyle–Castello**。層自身のK（図表から）、δ′ = 0.8 ϕ′および層の平均 σ′値；臨界深さはなく、平均値がその役割を果たす。

COYLE–CASTELLO（層ごと）

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

K–δ 法では δ′は多くの場合0.75 ϕ′〜0.8 ϕ′の範囲でとられる；本講義では **δ′ = 0.8 ϕ′ = 25.6°**および **K = 1.0**を用いる。

問題

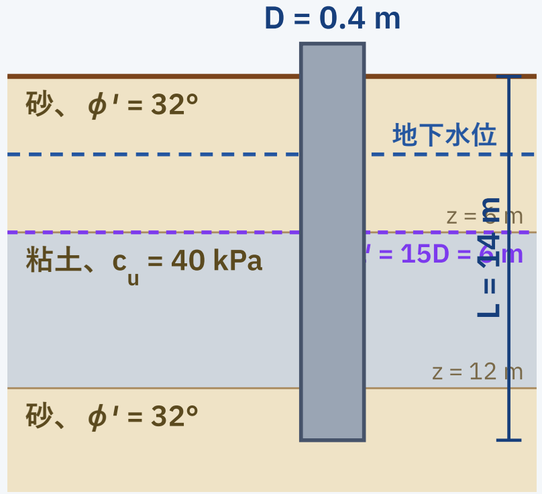
例題

与条件

砂1（0–6 m）	$\varphi' = 32^\circ$
粘土 (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**3層**）
地下水	**深さ3.0 mで**
杭	**打込み杭、D = 0.4 m、L = 14 m**
周面	$p = \pi D = 1.257$ m
砂層において	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$（**モジュールにこれらの値を入力する；モジュールはK = 0.66および δ′ = 24°で開く**）

求めるもの

砂層（0–6 mおよび12–14 m）の周面摩擦抵抗をK–δ法により求めよ。臨界深さL′ = 15Dとする。



解答 (1/2)

解答

1 臨界深さ（杭全長で単一）

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa}\ \text{（例題1）}$$

2 砂1（0–6 m）：層は完全にL′内にあり、キャップはない；平均 σ′ = 面積 / 層厚

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

3 単位摩擦抵抗と抵抗

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

解答 (2/2)

解答

4 砂2（12–14 m）：すべてL′以深 → σ′の値はL′における値に保持する

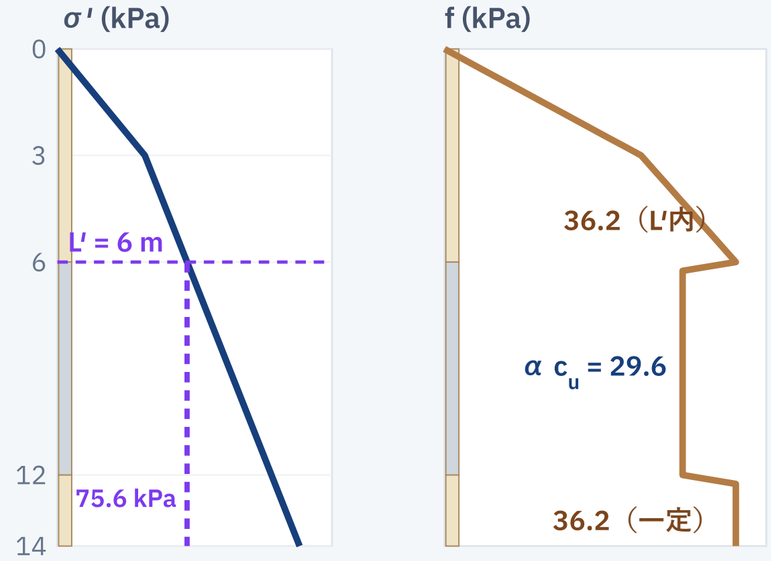
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2} \text{ kPa}$$

5 抵抗（厚さ 14 − 12 = 2 m）

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0} \text{ kN}$$

限界深さがなければ、この区間では σ̄′ = 132.9 kPa、f = 63.7 kPa、Q_{s3} = 160 kNとなった。**L′の上限**により砂の深部区間が**69 kN**減少する。



GeoTervaで解答を確認する ↗

粘土でも各層がそれぞれの方法を選ぶ

理論

粘土層では周面が**付着力**または**有効応力**によって抵抗する。粘土モジュールの3つの方法はいずれも層ごとに用いることができる：

$$\alpha:\ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda:\ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta:\ \beta_i = (1-\sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i},\quad f_i = \beta_i\bar{\sigma}'_i$$

α：層内では深さに**依存しない**；摩擦は層に沿って一定（一様）である。

λ* と *βは有効応力を再現する。上載する層に応じて**段差**が生じる。

率直な注意

VijayvergiyaとFochtは λ を**全埋込み長に対する単一の平均値**として表した。層状の土層構成で各粘土層に個別に適用すること（長さLにわたる λ、その層の平均 σ′とc_uの値）は、**本ソフトウェアに固有の拡張**である；モジュールはこのことを随所に明記している。

ϕ'_RとOCRは**入力する**値であり、地盤から相関式で読み取るものではない（30°と1で開く）。

問題

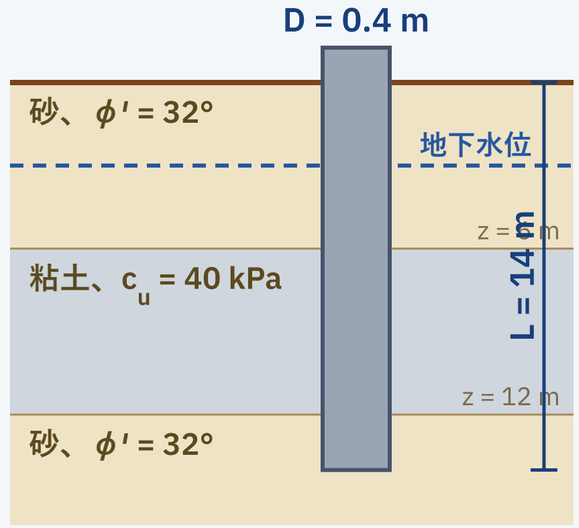
例題

与条件

砂1（0–6 m）	$\varphi' = 32^\circ$
粘土 (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**3層**）
地下水	**深さ3.0 mで**
杭	**打込み杭、D = 0.4 m、L = 14 m、p = 1.257 m**
粘土の平均 σ′	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1$ kPa（**例題1**）
β について	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
α について	$p_a = 100$ kPa、**α は表より**

求めるもの

粘土層（6–12 m）の周面摩擦抵抗を **α、λ、β** 法で求めよ。



解答 (1/2)

解答

1 α 法：$c_u/p_a = 0.4$に対する α を表から求める

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6 \text{ kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2} \text{ kN}$$

2 λ 法：λ は**杭長**に沿って表から求める（L = 14 m）（$\lambda_{10} = 0.245$；$\lambda_{15} = 0.200$）

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}_2' + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9} \text{ kN}$$

解答 (2/2)

解答

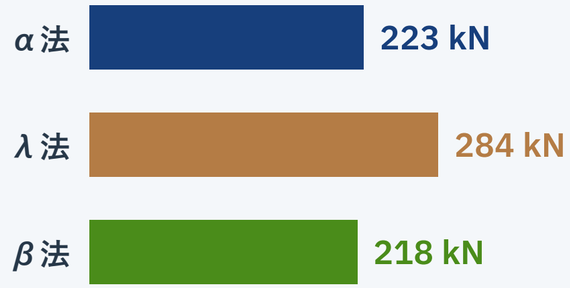
3 β 法：$\phi'_R = 30°$、OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

3つの方法は同じ粘土層に対して**223**、**284**、**218 kN**を与える：α と β は互いに近く、λ は約27%大きい。差は各方法が前提とする仮定に由来する；λ を層ごとに用いることはさらに拡張である。



GeoTervaで解答を確認する ↗

単一の積分：杭に沿って

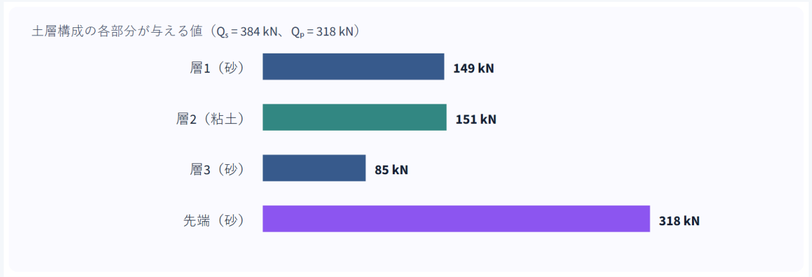
理論

周面摩擦抵抗は、摩擦を杭長に沿って積分したものに周長を乗じたものである。計算は数値的に行う。境界は**どこにでも**置くことができ、層の途中で終わる杭も特別な扱いを要しない。

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i \,\Delta z_i$$

このように見ると、層状地盤は問題ではなく**設計上の問い**に変わる：地盤構成の**どの部分**が杭を支持しているのか。

杭を次の境界を越えて延長した場合、または短縮した場合、支持力はどのように変化するか。



例題杭の各区間の寄与（Q_s = 475 kN、Q_p = 318 kN）。

問題

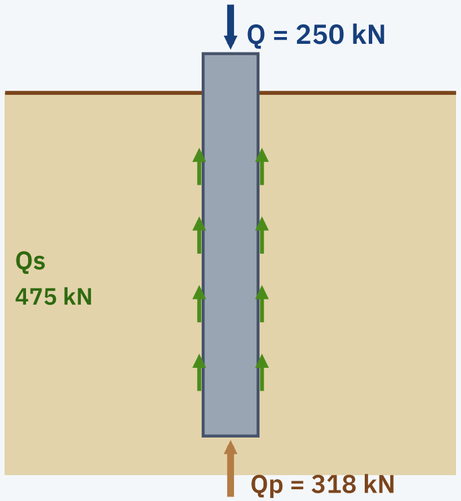
例題

与条件

先端支持力	**Q_p = 318.0 kN（例題2）**
砂1（0–6 m）	**Q_{s1} = 160.4 kN（例題4）**
粘土 (6–12 m)	**Q_{s2} = 223.2 kN（α 法、例題5）**
砂2 (12–14 m)	**Q_{s3} = 91.0 kN（例題4）**
安全率	**FS = 3**
杭に作用する使用荷重	**Q = 250 kN**

求めるもの

杭の**極限**支持力と**許容**支持力を求めよ。作用荷重は十分か。



解答

解答

1 周面抵抗：各区間の合計

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

2 極限支持力

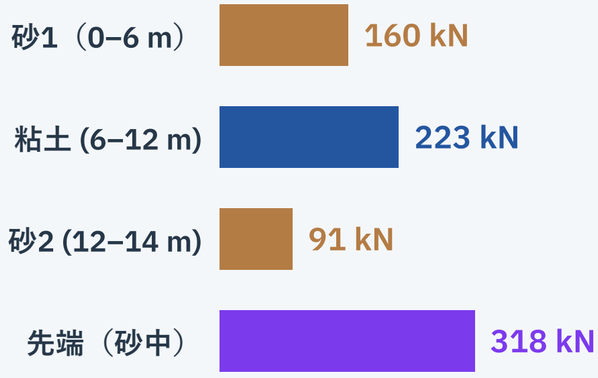
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 許容支持力と照査

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \le 264.2 \ \Rightarrow\ \text{十分}$$

利用率は0.95である。粘土層は周面のうちわずか43%を占めるにすぎないが、支持力の47%を負担している。臨界深さを超えると砂はσ'の増加が止まるのに対し、粘土はどの深さでも同じα c_uの値を与えるためである。



GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

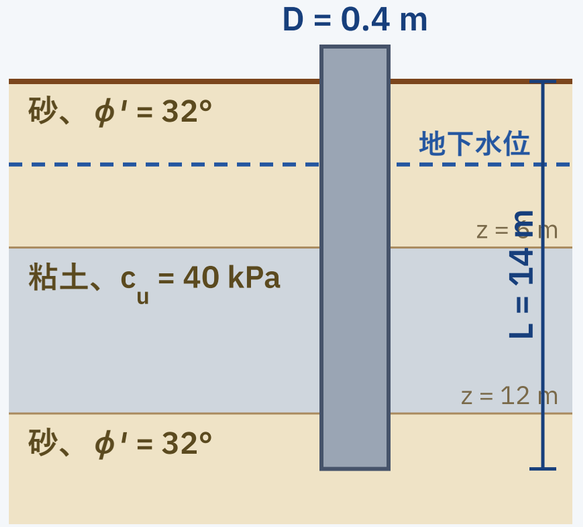
例題

与条件

砂1（0–6 m）	$\varphi' = 32^\circ$
粘土 (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（**3層**）
地下水	**深さ3.0 mで**
手法	**打込み杭、D = 0.4 m；Meyerhof、α、K–δ**
長さ	**L = 10, 12, 14および16 m**
既知量	**L = 14 mに対する例題2–6**

求めるもの

杭長が**10、12、16 m**になるとQ_uはどのように変化するか。変化の**理由**を説明せよ。



解答 (1/2)

解答

1 L = 10 m：先端は粘土中（例題3）、粘土区間は6–10 mのみ

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \text{kN}$$

2 L = 12 m：先端はちょうど境界上 → **下の砂に支持される**；砂2はまだ周面に含まれない

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \text{kN}$$

3 L = 16 m：砂2は4 mの厚さで杭周面に含まれる（σ'は上限あり：f一定）

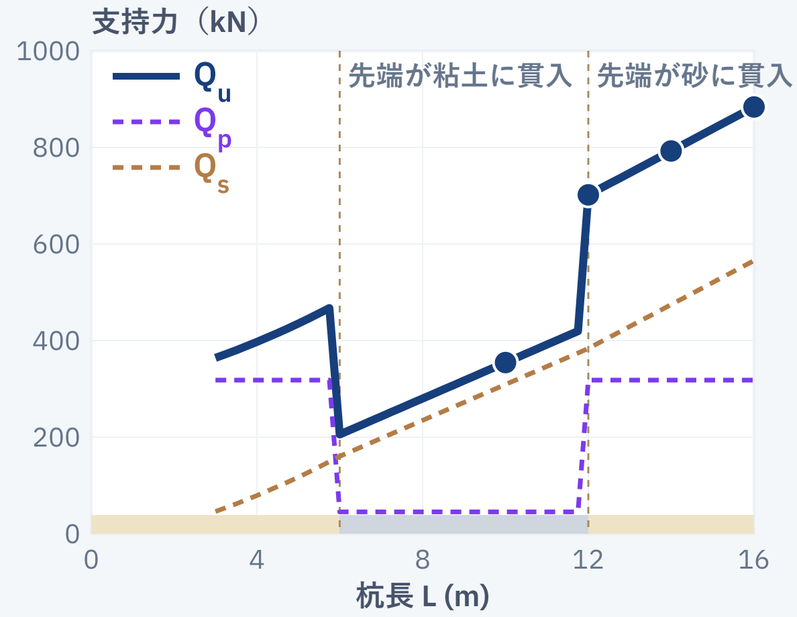
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \text{kN}$$

解答 (2/2)

解答

L (m)	先端層	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	粘土	45	309	**354**	118
12	砂	318	384	**702**	234
14	砂	318	475	**793**	264
16	砂	318	566	**884**	295

10 m → 12 m：支持力は**347 kN**増加する（98%）：このうち273 kNは**先端が砂に貫入すること**による。12 m以降は1 mごとに≈ 45 kNしか増えない。成層した土層構成では、杭長を決めるのは**先端がどの層で終わるか**である。



GeoTervaで解答を確認する ↗

場所打ち杭の規則は複合土層構成でも適用される

理論

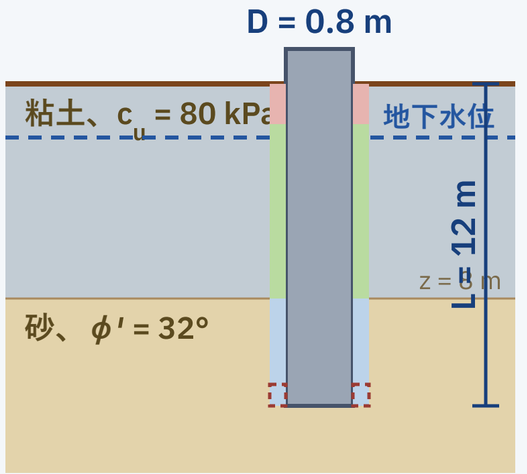
孔を掘り、コンクリートを打設する。地盤は押しのけられず、粘土は孔壁で軟化し、先端下には掘削土が堆積することがある。複合土層構成では、手順の各半分を**該当する箇所**に適用する。

粘土層（α）：$\alpha^* = 0.55$（$c_u/p_a \le 1.5$）。**上部1.5 mおよび下部1D**では$\alpha^* = 0$。この適用範囲は**αのみ**に属し、λおよびβには移さない。

砂層は独自のK–δまたはCoyle–Castelloの規則を保持する。打込み時に地盤が押し退けられないため、K は**$K_0 = 1 - \sin\phi'$**程度である。

底面が粘土中にある場合、Reese–O'Neill：$q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$。$c_{ub}$は底面下の**$2D_b$**にわたる平均$c_u$であり、領域が複数の層にまたがる場合は層厚で重み付けする。

この領域は**完全に粘土**でなければならない：砂に及ぶ場合、モジュールは停止し、MeyerhofまたはVesicの選択を要求する。



赤：$\alpha^* = 0$（上部1.5 m）。緑：$\alpha^* = 0.55$。青：砂におけるK–δ。赤破線：下部1D、砂ではウィンドウなし。

問題

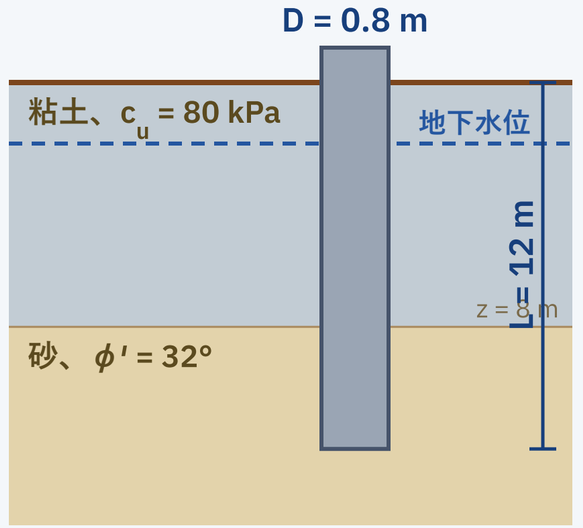
例題

与条件

杭	**場所打ち（削孔）杭、円形断面、D = 0.8 m、L = 12 m**
粘土（0–8 m）	$c_u = 80$ kPa, $\gamma = \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3
砂 (8–20 m)	$\varphi' = 32^\circ$, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3
地下水	**深さ2.0 mにおいて**
砂の場合	$K = K_0 = 0.47$, $\delta' = 0.75\varphi' = 24^\circ$
先端	**Meyerhof；FS = 3**

求めるもの

場所打ち杭の**先端支持力**、**周面摩擦抵抗**および**許容支持力**を求める。



解答 (1/3)

解答

1 粘土層：α*と範囲（上部1.5 mと下部1D = 0.8 mを除く：1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m）

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \le 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \text{m}$$

2 単位摩擦抵抗と抵抗

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \text{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \text{kN}$$

解答 (2/3)

解答

3 砂層（8–12 m）：独自のK–δ則；L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m、すなわち層内にキャップはない

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 単位摩擦抵抗と抵抗

$$f = K \tan\delta' \, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

αのウィンドウの**下端1D**部分（11.2 – 12 m）は砂層に落ちる；ウィンドウはαに属するため、砂はこの0.8 mにわたっても摩擦を維持する。

解答 (3/3)

解答

5 先端が砂中 → 砂の規則（Meyerhof）；掘削による追加の低減はなく、入力したϕ'を用いる

$$q' = \sigma'(12) = 121.9 \text{ kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_p = 2{,}531 \text{ kPa}$$

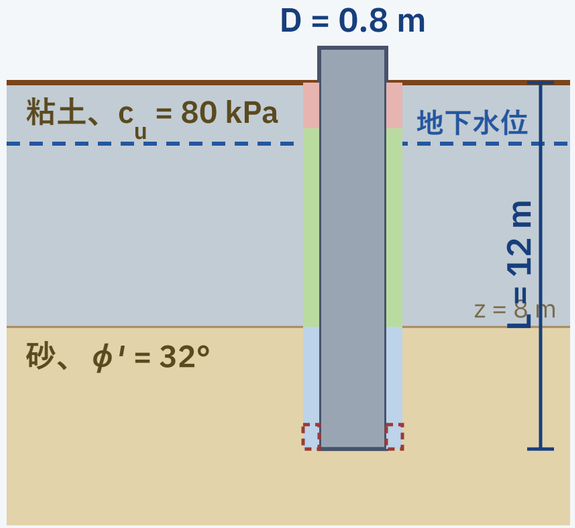
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272} \text{ kN}$$

6 全支持力と許容支持力

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6} \text{ kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736} \text{ kN}$$



GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

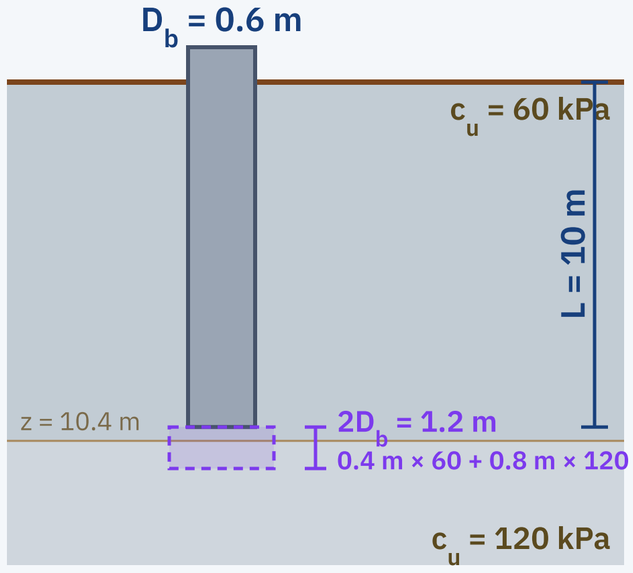
例題

与条件

杭	**場所打ち杭、$D_b = D = 0.6$ m、$L = 10$ m**
粘土1（0–10.4 m）	$c_u = 60$ kPa
粘土2（10.4–20 m）	$c_u = 120$ kPa
底面	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

求めるもの

底面下の**$2D_b$**領域における**c_{ub}**、および**q_p**と**Q_p**の値を求めよ。



解答

解答

1 ゾーン10 → 10 + 2D_b = 11.2 m；境界10.4 mでは：厚さで重み付けした平均

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \text{kPa}$$

2 3つの値のうち最小のもの

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\,\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\,;\quad 9c_{ub} = 900\,;\quad 40p_a = 4\,000\ \Rightarrow\ q_p = \mathbf{900}\ \text{kPa}$$

3 基礎底面積と先端支持力

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \text{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \text{kN}$$

先端のc_u = 60 kPaのみを用いたならQ_p = 152.7 kNとなった：下の硬い粘土は**67%**多く与える。

GeoTervaで解答を確認する ↗

単一の安全率だが、不確実性が大きい

理論

極限支持力は2つの成分の和である；許容支持力はこの和の**全体に単一の安全率**を適用して求める：

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

単杭の場合、通常**FS = 2.5 – 4**である。

上側の限界：土層構成が**わずかなボーリング**で判明している場合。成層した土層構成はまさにこの状況である：ボーリング間では**層境界が最も不確実**であり、上の例は境界のわずか1 mが支持力をどれほど変動させるかを示した。

2つの課題は別々の計算を要する

成層地盤において、支持力計算とは別に：

軟弱層が沈下し、**負の周面摩擦力**として杭に作用する

先端下方の圧縮性層が支配する**沈下**

層および施工法に応じた規則

理論

層	周面（Q_s）	先端（Q_p）：先端の層
砂	K–δ（$L' = 15D$、杭全長に単一値）またはCoyle–Castello（$K\ \sigma^{-\prime}$ $\tan 0.8\phi'$）	$q'N^*_q \le q_l$（Meyerhof）、Vesic、Coyle–Castello
粘土	α ・ λ（層ごと：延長）・ β	$9c_u$（Meyerhof）・$N^*_c(I_{rr})$（Vesic）
場所打ち杭、粘土	$\alpha^* = 0.55$；上部1.5 mおよび下端1D = 0	Reese–O'Neill：$c_{ub} = 2D_b$の平均
場所打ち杭、砂	$K \approx K_0 = 1 - \sin\phi'$；ウィンドウは適用しない	$q'N^*_q$（入力したϕ'）

各行は該当する層に対する個別の選択であり、**同じ杭**で砂と粘土の両方の則を用いる。

まとめ

ポイントのまとめ

有効応力は**層を通して累積**し連続であるが、単位摩擦は**境界で不連続に変化する**

先端は、先端が存在する層の規則のみで計算する。境界に一致する先端は**下側**の層に属する。

砂：$f = K\,\sigma'\tan\delta'$、**$L' = 15D$は杭全体に適用** · **粘土**：$\alpha$, λ（層ごとに1つの延長）、β

周面は層の総和である：$Q_s = p\,\Sigma\, f_i\,\Delta z_i$；長さを決めるのは先端がどの層で終わるかである。

場所打ち杭：α*の入力欄は粘土/αの場合のみ；先端が粘土にあればc_{ub}は$2D_b$にわたる（複数層の場合がある）

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$、$FS = 2.5 – 4$；大規模工事では**載荷試験**

参考文献

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — 表2の α 値。

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Offshore Technology Conference Paper 1718, Houston.

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — 場所打ち杭に対するドリルドシャフト用の α 。

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — 粘土中の場所打ち杭の先端支持力の式。

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning；これらの方法を、本ページが従う形でまとめている。

注記

本スライドの図はGeoTervaの理論ページから引用した；数値例はすべてモジュール自身の計算規則とライブラリで生成したものであり、モジュールも同じ値を与える。

GeoTerva

オンライン地盤工学計算

理論から実務へ

この発表資料の例題杭をGeoTervaで手順ごとに計算する。数値は同一である。

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