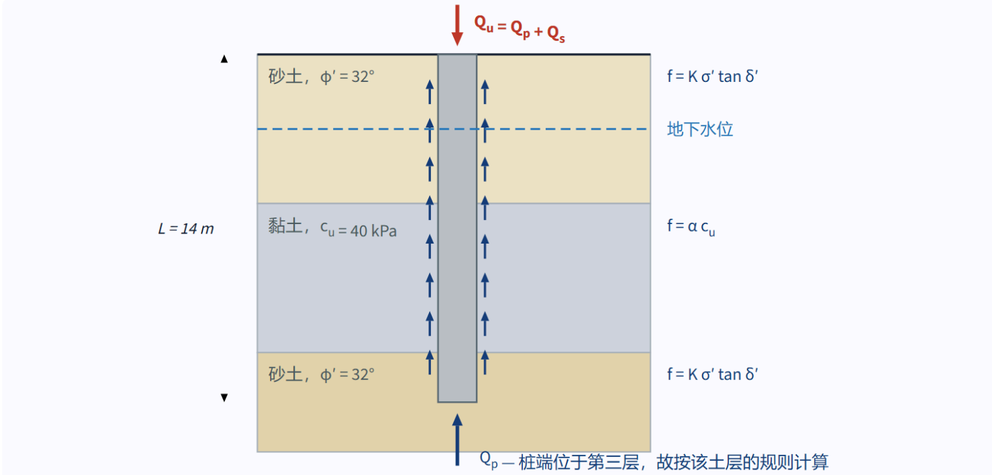
GeoTerva

岩土工程讲义 · 桩基工程

分层土中的桩承载力

讲义：桩穿越砂层与黏土层时的承载力。何种规则适用于何处，有效应力如何沿各土层累积；每个专题均附工程算例。

逐层计算 | 桩端：桩端所在土层 | 砂土+黏土规则 | 钻孔灌注桩 | 工程算例



本讲内容

逐层累积有效应力；了解黏土层即使其自身强度不会传到砂土中，也会通过自重对其下方的砂土产生影响

了解**桩端阻力**仅取决于桩端所在土层，并按该土层的规则计算

在**砂土层中**应用K–δ规则（临界深度$L' = 15D$针对整根桩），在**黏土层中**应用α、λ和β规则

沿各土层叠加桩侧阻力，并解释摩阻力在土层分界处的跳变和桩长的影响

理解**钻孔灌注桩**中的α*窗口，以及c_{ub}可能取自数个土层

讲授流程

每个主题按**三个步骤**讲解：

1 · **理论**：规则是什么，为什么如此？

2 · **题目**：已知条件与所求

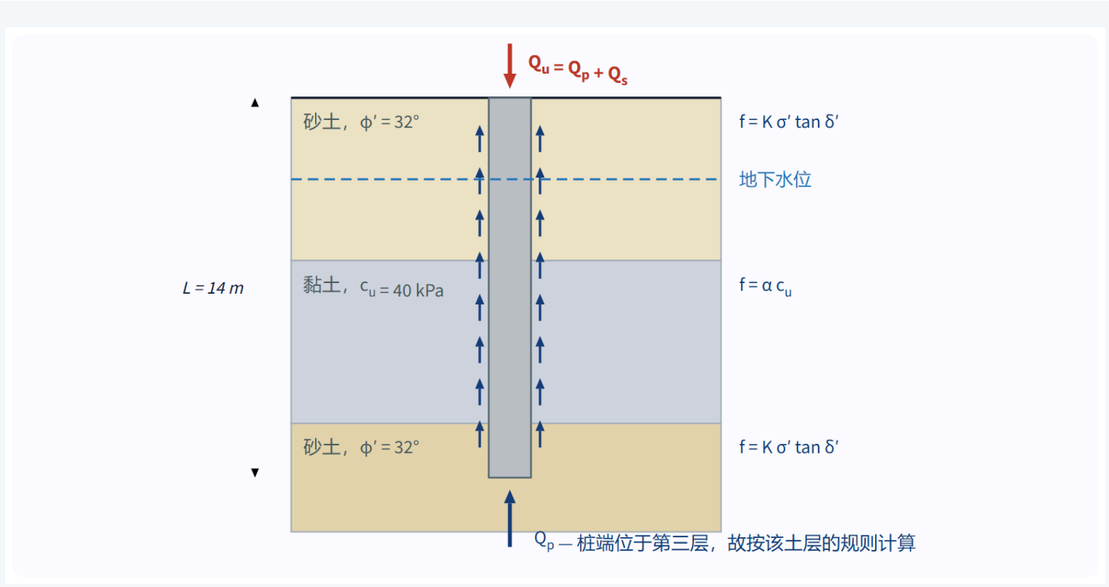
3 · **解答**：逐步计算，代入数值

多数算例采用同一根桩：桩长14 m、直径0.4 m，穿过砂土–黏土–砂土地层。

本讲建立在**砂土中的桩**和**黏土中的桩**两讲的基础上：规则已在那里学过，这里则考察哪一条适用于何处。

各土层按自身规律作出响应

理论



桩很少仅穿过单一土层。剖面由**若干土层**组成；每一层定义为砂土或黏土，并按**其自身材料的规则**计算。承载力仍由两部分组成，但不再由单一公式读出，而是**逐段累加得到**：

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

无新增理论：砂土规则属于砂土模块，黏土规则属于黏土模块。

新增内容为**计算框架**：桩身的哪一段适用哪条规则，以及有效应力如何由上覆各层逐层累积。

桩端阻力来自**单一土层**，桩侧阻力来自**各土层之和**。

应力连续，摩阻力呈阶梯状

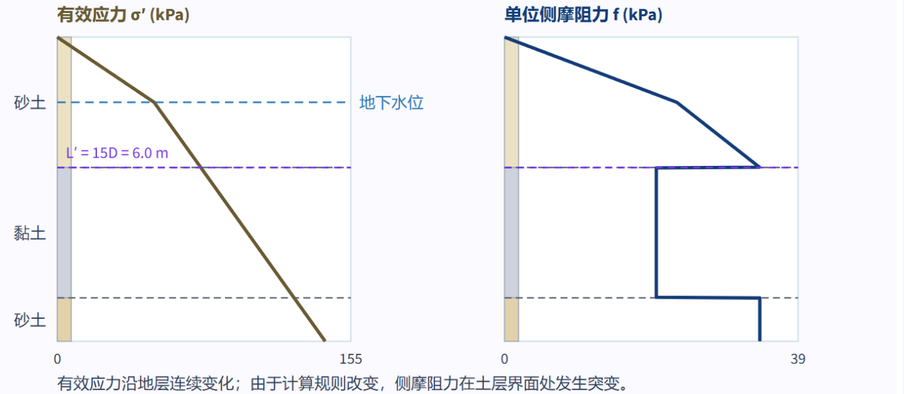
理论

有效竖向应力是联系各土层的纽带：**上方每一土层的自重**逐层累积；地下水位以上采用湿重度，以下采用浮重度。

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

黏土层不会把自身的强度赋予砂土；但它**通过自重**改变其下砂土所提供的阻力。

而摩阻力并不连续：在砂土–黏土分界处**规则本身发生变化**，单位摩阻力可能出现很大的突变。这一突变不是计算的误差，而是分层剖面的**特征标志**。



有效应力沿地层连续变化；由于计算规则改变，侧摩阻力在土层界面处发生突变。

题目

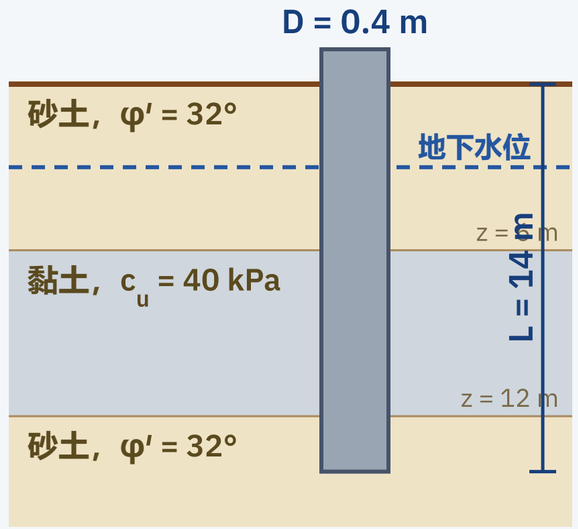
算例

已知条件

砂土1(0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
黏土(6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂土2(12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
重度	$\gamma = 17$, $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(三层)**
地下水	**在3.0 m深度处**
桩	**打入桩，D = 0.4 m，L = 14 m**
水的重度	$\gamma_w = 9.81$ kN/m^3

求

求3、6、12和14 m深度处的有效竖向应力（14 m = 桩端）。



解答 (1/2)

解答

1 至地下水位处(3 m)：整个土层为湿润状态，γ = 17

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

2 6 m（砂土–黏土分界面）：地下水位以下，$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

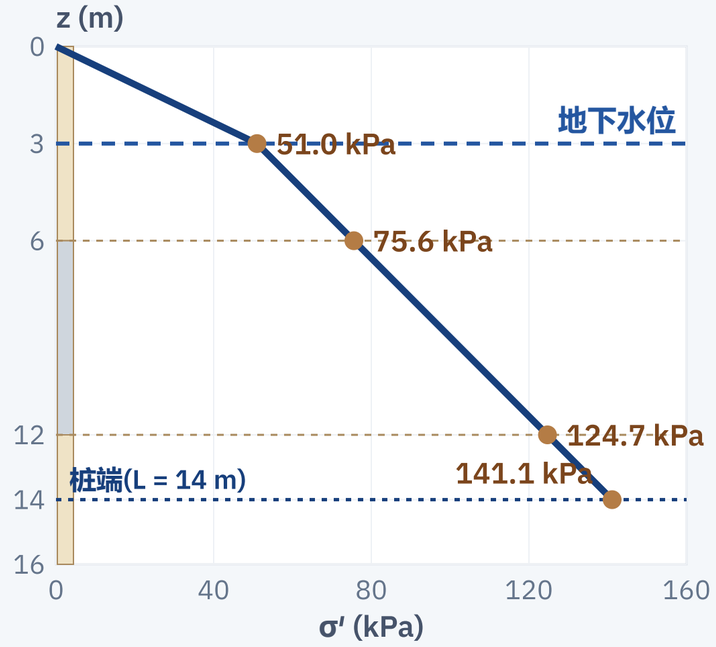
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m（黏土–砂土分界面）：黏土的γ_{sat}值也是18

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

4 14 m（桩端）

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



解答 (2/2)

解答

5 各分段内σ′图形的面积（梯形）；它们将在桩侧阻力计算中用于得到平均应力

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

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

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

σ′**沿各土层连续**：砂土–黏土分界面处无突变；斜率仅在地下水位处及γ′变化处改变。这三块面积在算例4和5中将作为平均值σ̄′使用。

在GeoTerva中验算解答 ↗

桩端仅取决于其所在土层

理论

桩端阻力只与**单一土层**有关：即桩端所在的土层。按该土层的材料计算；其上各土层仅通过σ′起作用（**砂土桩端**），而对**黏土桩端则完全不起作用**。

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

黏土：$$Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*,\quad N_c^* = 9 \text{ (Meyerhof)}$$

桩端恰好落在**某一分界面**上的桩，视为支承于该界面**以下**的土层。

Coyle–Castello是一个适用于**砂土**的经验关系；对黏土中的桩端无意义，即使选用，黏土规则仍然有效。



桩端在砂土中时，σ′和N^*_q起决定作用；桩端在黏土中时，仅取决于该土层的c_u值。

题目

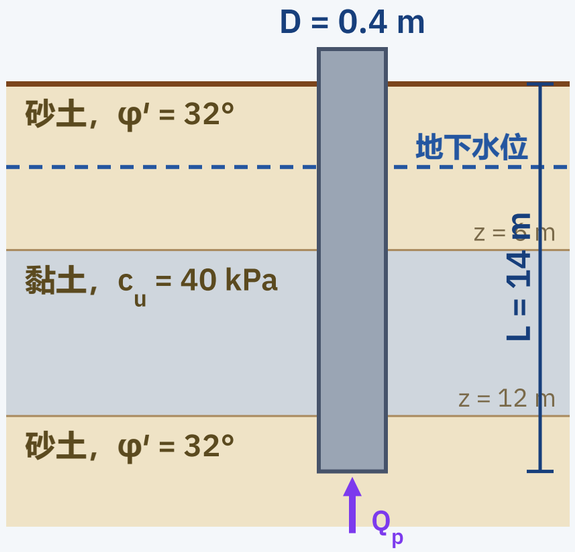
算例

已知条件

砂土1(0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
黏土(6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂土2(12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
重度	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(三层)**
地下水	**在3.0 m深度处**
桩	**打入桩，圆形截面，D = 0.4 m，L = 14 m**
桩端法	**Meyerhof**
大气压力	$p_a = 100$ kPa
桩端有效应力	$q' = \sigma'(14) = 141.1$ kPa **(算例1)**

求

确定桩端所在的土层，并求**桩端阻力**Q_p。



解答 (1/2)

解答

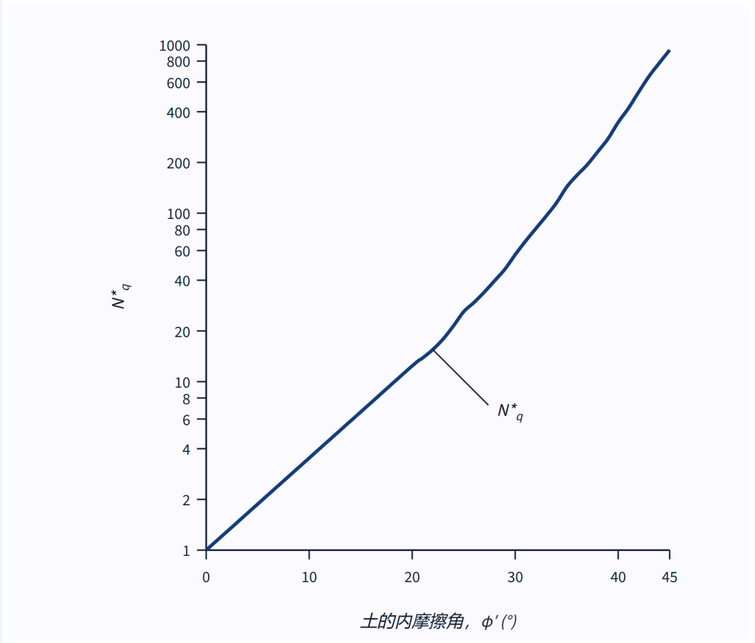
1 桩端所在土层：L = 14 m，位于12–16 m之间的砂土中 → 砂土规则（上部黏土与桩端无关）

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

2 N^*_q由Meyerhof图表按φ′ = 32°查得；然后将两个值并列

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

图表中的N^*_q值（见旁侧）为81；$q'N^*_q$ = 11,428 kPa，远大于极限值q_l = 2,531 kPa：**由极限值控制。**



解答 (2/2)

解答

3 单位桩端阻力：取两者中的较小值

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

4 桩端面积与桩端阻力

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

桩端阻力**318.0 kN**。由于桩端位于砂土中，适用砂土规则；由于限值已起作用，σ′的取值在本算例中不改变结果。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

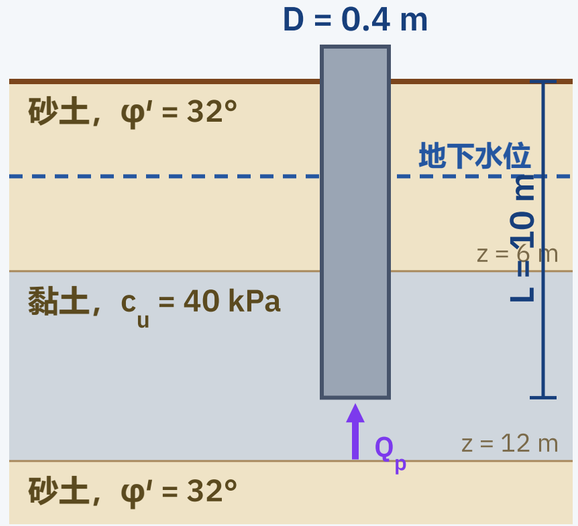
算例

已知条件

砂土1(0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
黏土(6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂土2(12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
重度	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **（三层）**
地下水	**在3.0 m深度处**
桩	**同一根桩，但L = 10 m**
桩端阻力计算方法	**Meyerhof与Vesic**
大气压力	$p_a = 100$ kPa

求

若将桩缩短至10 m，确定桩端所在土层，并用两种方法求**桩端阻力**。



解答

解答

1 桩端所在土层：L = 10 m，位于6–12 m之间的黏土中 → 黏土规则（砂土和σ′不再参与计算）

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

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

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

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

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

桩端位于砂土中的桩，Q_p为**318 kN**；桩端留在黏土中时仅为**45 – 51 kN**：约为七分之一。将同一根桩加长2 m使桩端进入砂土，则桩端阻力骤增。

在GeoTerva中验算解答 ↗

K–δ：临界深度适用于整根桩

理论

砂土层中，桩身依靠对水平有效应力的摩擦产生阻力。每一砂土层取**各自的**K和δ′值：

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

L′属于**整根桩**，而不是某一土层：L′以下σ′保持L′处的值。

深处的砂土层，无论其界面在何处，均提供**沿土层恒定不变**的单位摩阻力。

可选方法：**Coyle–Castello**。采用该层自身的K（取自图表）、δ′ = 0.8φ′以及该层的平均σ′值；不设临界深度，由平均值代替其作用。

COYLE–CASTELLO（逐层）

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

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

K–δ法中，δ′通常取0.75φ′ ~ 0.8φ′；本讲义取**δ′ = 0.8φ′ = 25.6°**和**K = 1.0**。

题目

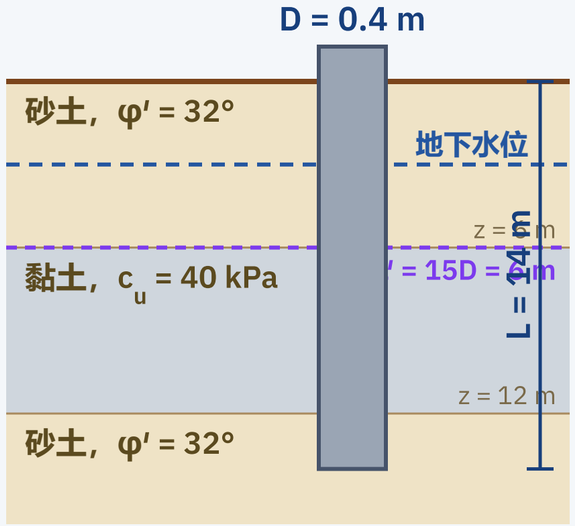
算例

已知条件

砂土1(0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
黏土(6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂土2(12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
重度	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **（三层）**
地下水	**在3.0 m深度处**
桩	**打入桩，D = 0.4 m，L = 14 m**
周长	$p = \pi D = 1.257$ m
砂土层中	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **（在模块中输入这些值；模块打开时的初始值为K = 0.66和δ′ = 24°）**

求

用K–δ法求**砂层**（0–6 m和12–14 m）的桩侧阻力。临界深度L′ = 15D。



解答 (1/2)

解答

1 临界深度（整根桩取单一值）

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

2 砂土1（0–6 m）：该层完全位于L′范围内，无需封顶；平均σ′ = 面积/厚度

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

3 单位摩阻力与阻力

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

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

解答 (2/2)

解答

4 砂土2(12–14 m)：全部位于L′以下 → σ′保持为其在L′处的值

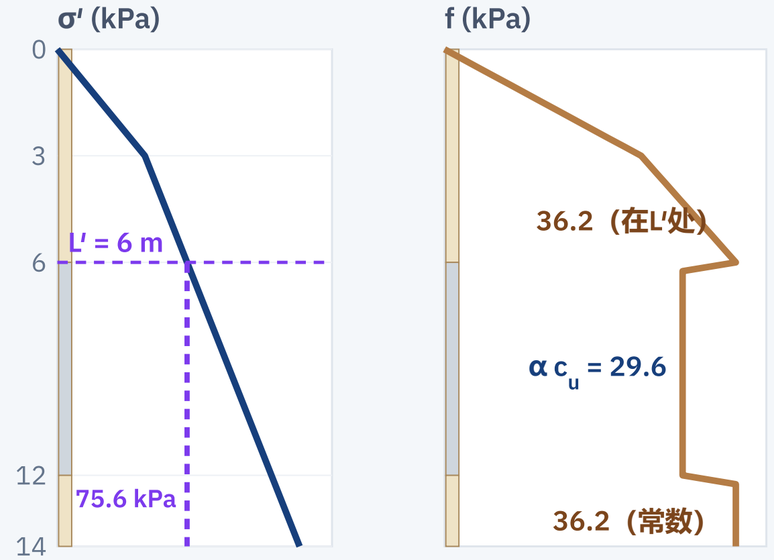
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

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

5 阻力（厚度14 − 12 = 2 m）

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

若没有临界深度，该段将得到σ′ = 132.9 kPa、f = 63.7 kPa和Q_{s3} = 160 kN。**L′上限**使砂土深部这一段减少了**69 kN**。



在GeoTerva中验算解答 ↗

黏土中同样由每一土层选用各自的方法

理论

在黏土层中，桩身依靠**黏着力**或**有效应力**提供抗力；黏土模块中的三种方法均可按土层分别采用：

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

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

α：在土层内**与深度无关**；摩阻力沿土层为常数（均匀分布）。

λ和β还原有效应力；随上覆土层的不同而形成**台阶**。

坦率说明

Vijayvergiya和Focht将λ表示为**整个入土长度上的单一平均值**。在分层剖面中将其分别应用于每一黏土层（长度L上的λ，取该土层的平均σ′和c_u值），是该方法**本软件特有的扩展**；模块在各处均对此作了说明。

φ'_R和OCR为**输入**量，不通过相关关系由土层读取（初始值取30°和1）。

题目

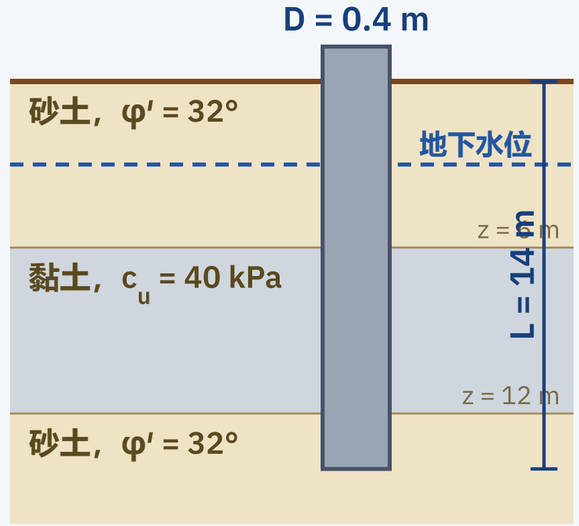
算例

已知条件

砂土1(0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
黏土(6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂土2(12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
重度	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **（三层）**
地下水	**在3.0 m深度处**
桩	**打入桩，D = 0.4 m，L = 14 m，p = 1.257 m**
黏土平均σ′	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1$ kPa **（算例1）**
对β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
对α	$p_a = 100$ kPa，**α由表查得**

求

用**α、λ和β**方法求黏土层（6–12 m）的桩侧阻力。



解答 (1/2)

解答

1 α法：按$c_u/p_a = 0.4$由表查得α

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

2 λ法：λ按**桩长**(L = 14 m)由表查取($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

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

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

解答 (2/2)

解答

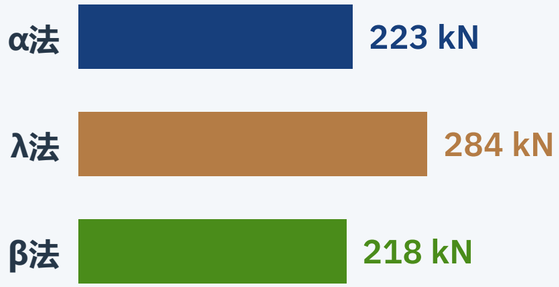
3 β法：$\varphi'_R = 30°$，OCR = 1

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

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

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

三种方法对同一黏土层给出的结果分别为**223**、**284**和**218 kN**：α与β的结果接近，λ约高27%。差异源于各方法所依据的假定；按土层逐层使用λ则另属一种扩展。



在GeoTerva中验算解答 ↗

单一积分：沿桩长

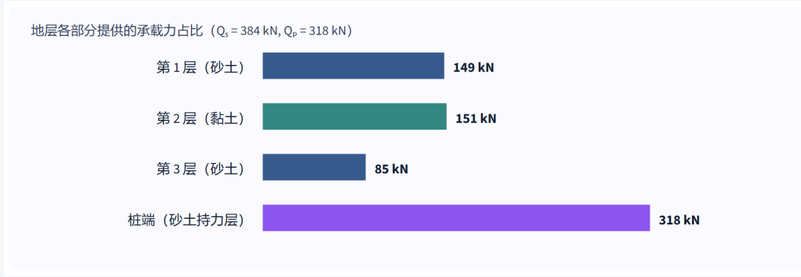
理论

桩侧阻力等于桩侧摩阻力沿桩长的积分乘以桩周长。计算采用数值方法；分界面**可位于任何位置**，桩端终止于土层中部时也无需作特殊处理：

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

这样来看，土层分层不再是问题，而是转化为一个**设计问题**：剖面的**哪一段**在支承着桩？

若将桩延长至下一分界面以下或缩短，承载力如何变化？



算例桩各段的贡献(Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN)。

题目

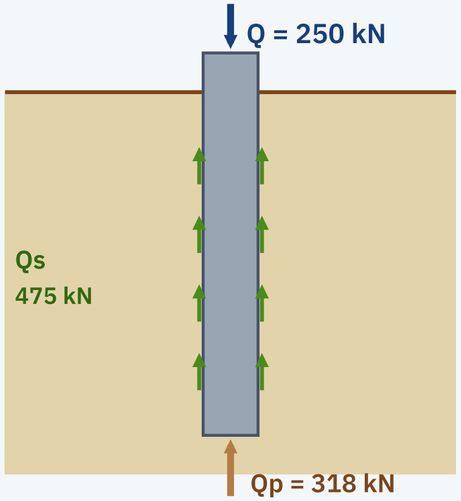
算例

已知条件

桩端阻力	Q_p = 318.0 kN（算例2）
砂土1(0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN（算例4）
黏土(6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN（α法，算例5）
砂土2(12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN（算例4）
安全系数	FS = 3
作用于桩的工作荷载	Q = 250 kN

求

求桩的**极限承载力**和**容许承载力**；工作荷载是否满足要求?



解答

解答

1 桩侧摩阻力：各段之和

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

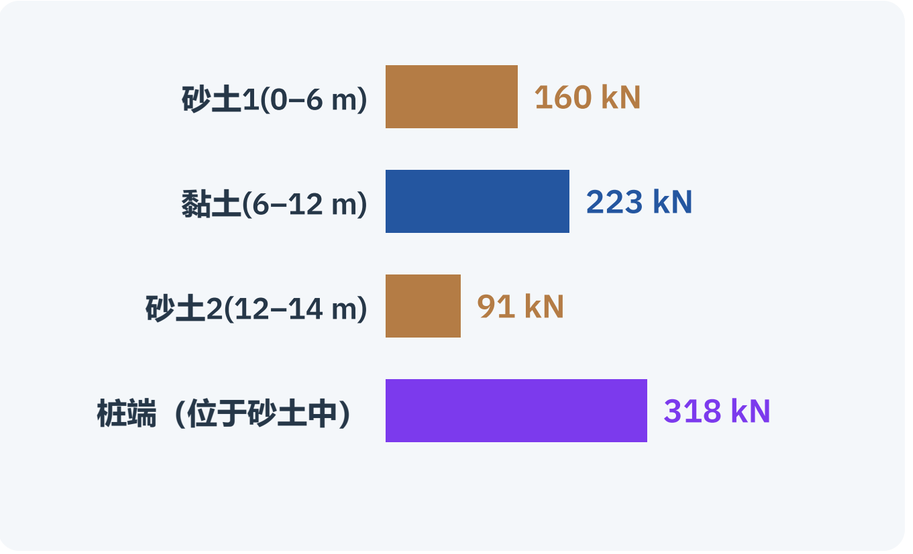
2 极限承载力

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

3 容许承载力与验算

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

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



利用率为0.95。黏土层仅占桩长的43%，却提供了桩侧摩阻力的47%：超过临界深度后，砂土的σ′不再增长，而黏土在每个深度处都给出相同的α c_u值。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

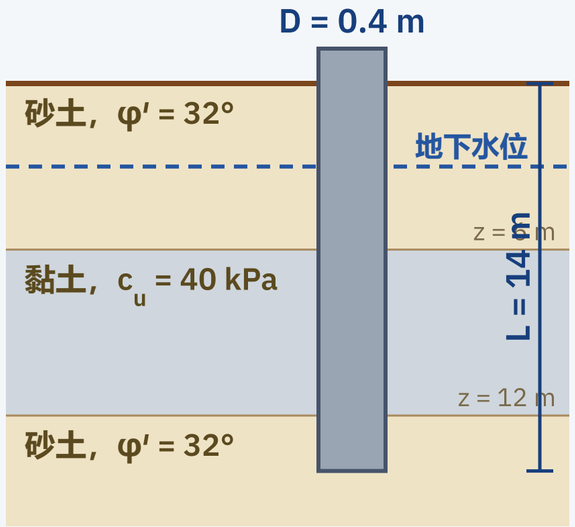
算例

已知条件

砂土1(0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
黏土(6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
砂土2(12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
重度	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(三层)**
地下水	**在3.0 m深度处**
方法	**打入桩，D = 0.4 m；Meyerhof、α、K–δ**
长度	**L = 10, 12, 14和16 m**
已知量	**L = 14 m时的算例2–6**

求

桩长为**10、12和16 m**时，Q_u如何变化？说明变化的**原因**。



解答 (1/2)

解答

1. L = 10 m：桩端位于黏土中（算例3）；黏土段仅为6–10 m

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

2. L = 12 m：桩端恰位于分界面 → **支承于下部砂土**；砂土2尚未进入桩身范围

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

3. L = 16 m：砂土2以4 m厚度计入桩身（σ′已封顶：f为常数）

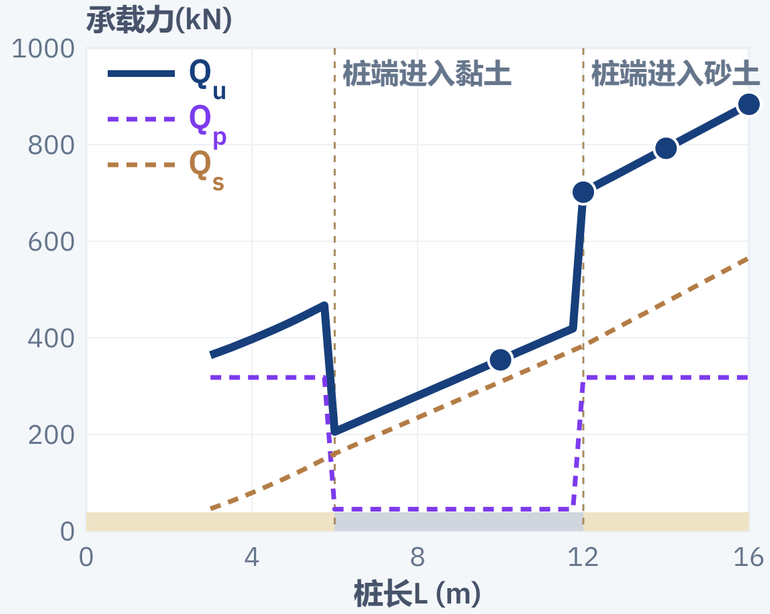
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \text{kN}$$

解答 (2/2)

解答

L (m)	桩端土层	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	黏土	45	309	**354**	118
12	砂土	318	384	**702**	234
14	砂土	318	475	**793**	264
16	砂土	318	566	**884**	295

10 m → 12 m：承载力增加**347 kN**(98%)：其中273 kN来自**桩端进入砂土**。12 m以后每米仅增加≈ 45 kN。在分层剖面中，决定桩长的是**桩端最终落在哪一层**。



在GeoTerva中验算解答 ↗

钻孔灌注桩的规则在混合地层剖面中同样适用

理论

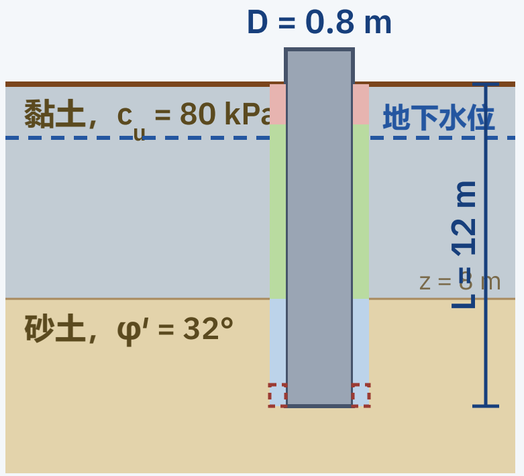
成孔后浇筑混凝土：土体不被挤出，黏土在孔壁处软化，孔底可能积聚沉渣。在混合地层剖面中，该计算程序的两个部分**分别用于各自所属的土层**：

黏土层(α)：$\alpha^* = 0.55\ (c_u/p_a \le 1.5)$；在**顶部1.5 m和底部1D**范围内$\alpha^* = 0$。该窗口**仅适用于α**，不延续到λ和β。

砂土层仍采用各自的K–δ或Coyle–Castello规则；由于钻孔时土体不被挤开，K约为**$K_0 = 1 - \sin\varphi'$**。

若**桩端**位于黏土中，按Reese–O'Neill方法：$q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$。$c_{ub}$为桩端以下**$2D_b$**范围内的平均$c_u$；若该范围跨越多个土层，则按厚度加权平均。

该区段必须**全部为黏土**：若延伸至砂土，模块将停止计算，并要求选用Meyerhof法或Vesic法。



红色：$\alpha^* = 0$（上部1.5 m）。绿色：$\alpha^* = 0.55$。蓝色：砂土中的K–δ。红色虚线：底部1D，砂土中无此区段。

题目

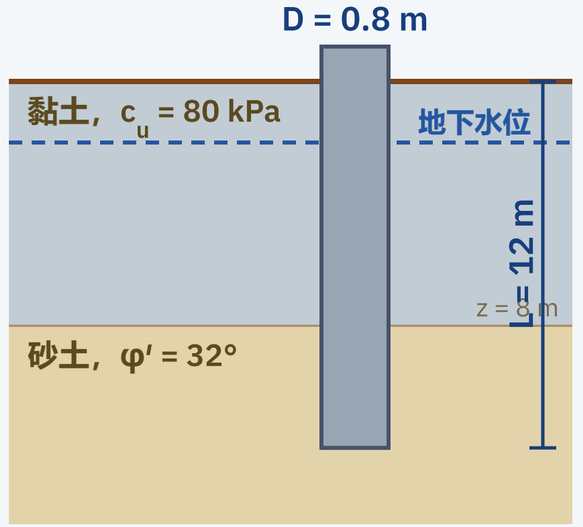
算例

已知条件

桩	**钻孔灌注桩，圆形截面，D = 0.8 m，L = 12 m**
黏土(0–8 m)	$c_u = 80$ kPa, $\gamma = \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3
砂土(8–20 m)	$\varphi' = 32°$, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3
地下水	**在2.0 m深度处**
对于砂土	$K = K_0 = 0.47$, $\delta' = 0.75\varphi' = 24°$
桩端	**Meyerhof；FS = 3**

求

求钻孔灌注桩的**桩端阻力**、**桩侧阻力**和**容许承载力**。



解答 (1/3)

解答

1 黏土层：α*与窗口（舍去顶部1.5 m和底部1D = 0.8 m：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 单位摩阻力与阻力

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

解答 (2/3)

解答

3 砂土层(8–12 m)：采用其自身的K–δ规则；L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m，即该土层内不设上限

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

4 单位摩阻力与阻力

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

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

α窗口的**下部1D**段(11.2 – 12 m)落在砂土层内；由于该窗口属于α，砂土在这0.8 m范围内同样保持其摩阻力。

解答 (3/3)

解答

5 桩端位于砂土中 → 按砂土规则(Meyerhof)；成孔不另作折减，采用输入的φ′

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

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

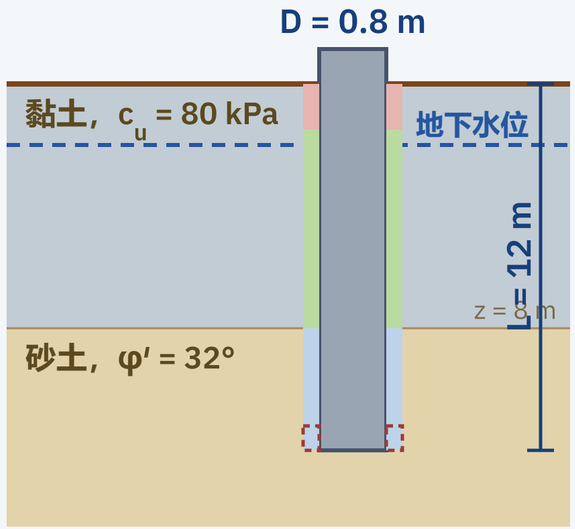
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272} \text{ kN}$$

6 总承载力与容许承载力

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

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

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



在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

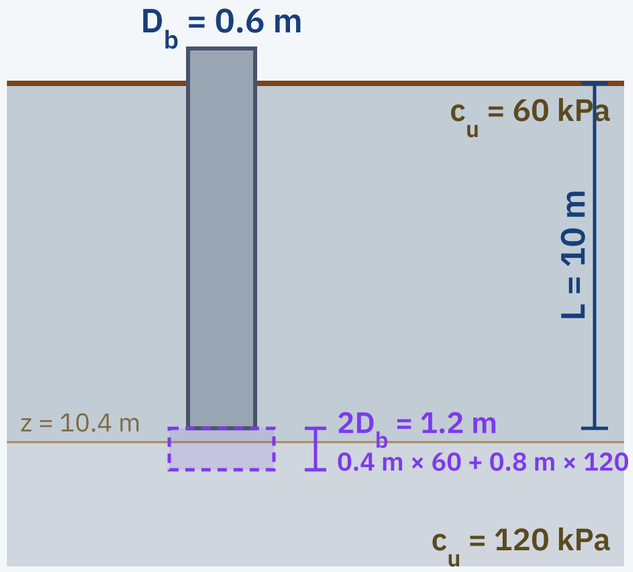
算例

已知条件

桩	**钻孔灌注桩，$D_b = D = 0.6$ m，$L = 10$ m**
黏土1(0–10.4 m)	$c_u = 60$ kPa
黏土2(10.4–20 m)	$c_u = 120$ kPa
底面	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

求

求桩端以下$2D_b$范围内的c_{ub}，以及q_p和Q_p的值。



解答

解答

1 区域10 → 10 + 2D_b = 11.2 m；分界面位于10.4 m处：按厚度加权平均

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

2 三个值中的最小值

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

3 桩底面积与桩端阻力

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

若仅取桩端处的c_u = 60 kPa，则得Q_p = 152.7 kN；下方的硬黏土使桩端阻力多出**67%**。

在GeoTerva中验算解答 ↗

单一安全系数，但不确定性很大

理论

极限承载力等于两个分量之和；容许承载力由**对该总和整体采用单一安全系数**求得：

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

单桩通常取**FS = 2.5 – 4**。

上限端：当剖面由**少量钻孔**确定时。分层剖面恰是这种情形：钻孔之间**界面位置最不确定**，上例已显示，界面仅变动一米会使承载力改变多少。

两个问题须分别计算

在成层剖面中，与承载力计算分开处理：

- 软土层沉降并以**负摩阻力**的形式悬挂于桩上
- 由桩端以下可压缩土层控制的**沉降**

按土层与成桩方式确定的规则

理论

土层	桩身(Q_s)	桩端(Q_p)：桩端所在土层
砂土	K–δ（L′ = 15D，全桩采用同一值）或Coyle–Castello (K σ′ tan0.8φ′)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
黏土	α · λ（按土层：扩展） · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
钻孔灌注桩，黏土	α* = 0.55；顶部1.5 m及底部1D范围内取0	Reese–O'Neill：$2D_b$范围内c_{ub}的平均值
钻孔灌注桩，砂土	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$；不应用窗口	$q'N^*_q$（输入的φ′）

每一行是对相应土层的单独选择；**同一根桩**中可同时使用砂土规则和黏土规则。

小结

要点回顾

有效应力**沿各土层逐层累积**且连续；而单位摩阻力则在**界面处发生突变**

桩端仅按桩端所在土层的规则计算；桩端恰落在分界面上时，视为位于**下层**土中

砂土：$f = K\sigma'\tan\delta'$，且**$L' = 15D$适用于整根桩** · **黏土**：α、λ（每层一个延伸段）、β

桩侧阻力为各土层阻力之和：$Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$；决定桩长的是桩端终止于哪一土层

钻孔灌注桩：α*窗口仅用于黏土/α法；若桩端位于黏土中，则c_{ub}沿$2D_b$范围取值（可能跨越数层）

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$，$FS = 2.5 – 4$；大型工程采用**静载试验**

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 的 α 值。

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 — 钻孔灌注桩的 α 法侧阻系数。

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — 黏土中钻孔桩端阻力基本公式。

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, which brings these methods together in the form this page follows.

注

本演示文稿中的图形取自GeoTerva理论页面；所有数值算例均由模块自身的计算规则和计算库生成，模块给出相同的数值。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

在GeoTerva中逐步计算本讲义中的算例桩：数值相同。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。