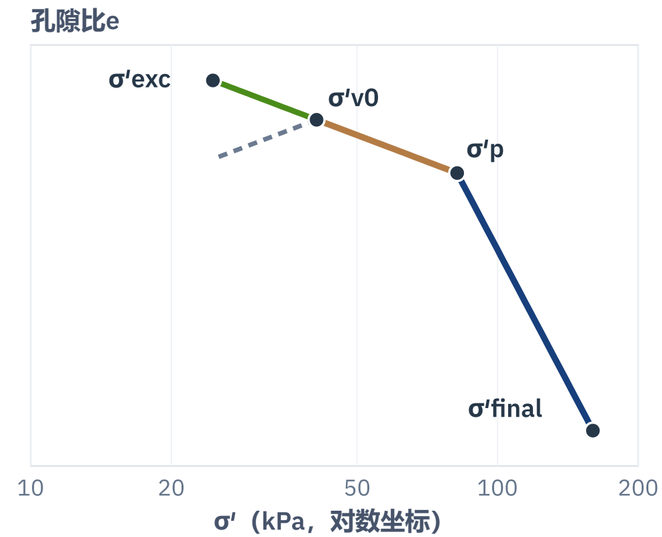
GeoTerva

岩土工程讲义 · 沉降

固结沉降

讲义：黏土层的一维固结沉降；应力路径、先期固结、开挖与隆起、Boussinesq应力、mv法与时间；每个主题均有工程算例。

应力路径 | $C_c \cdot C_r \cdot C_s$ | 开挖与隆起 | Boussinesq | m_v法 | 随时间变化的沉降



引言

本讲内容

- 追踪黏土的**应力路径**：$\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c)
- 确定初始应力(σ_{v0}, u_0, σ'_{v0})和**先期固结应力**($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$)
- 区分**开挖**引起的卸荷与膨胀效应，以及沉降是相对于**哪一基准**量测的
- 计算**Boussinesq**附加应力和**影响深度**
- 应用分层压缩的**四种状态**（再压缩、原始压缩）；并与**m_v**法比较
- 绘制**与时间有关的**固结(T_v, U, t_{50}, t_{90})以及成层土剖面的沉降–时间曲线

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

算例土层：厚6 m的黏土，地下水位位于地表(σ'_{v0} = 8.19 z)，e_0 = 1.0，C_c = 0.30，C_r = 0.06；4 × 6 m 基础，q = 150 kPa。沉降量以mm计。

本模块计算什么?

理论

剖面中的**每一土层均为黏土**；不能输入其他土类。模块计算黏土的**主固结**：施加荷载后，水缓慢排出，黏土沿应力路径被压缩。

瞬时沉降（弹性沉降）见于“弹性沉降”模块；两者之和见于“总沉降(2D)”模块。

该解答为**解析解**：采用Boussinesq应力增量、逐分层的应力路径和Terzaghi理论；孔隙水压力按静水压力考虑；不使用有限元。

超出范围：无黏性土层、次固结(C_α)、砂土的SPT/CPT沉降、岩石沉降、二维/三维固结、承载力、砂土液化。

符号规定

沉降取**正**，隆起取**负**。净变形$S_{net} = S_c + S_{heave}$。

并非一步由初始应力达到最终应力

理论

计算从不会由初始应力**一步**直接到达最终应力。开挖使有效应力降低，黏土沿卸荷直线(C_s)**回弹膨胀**。结构使其重新加载时，黏土先沿同一直线回到σ'_{v0}（隆起得以恢复）；随后沿C_r再压缩至σ'_p，若最终应力超过σ'_p，则沿原始压缩直线(C_c)压缩：

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

σ'_p为过去所受的最大应力；**不因开挖而降低。**

加载–卸载循环在σ'_{v0}处**闭合**：仅将被移除的上覆土重新恢复的荷载，相对于初始状态不产生沉降；与C_s和C_r的取值无关。



示意图：虚线为卸载，绿线为再加载(C_s)，橙线为再压缩(C_r)，蓝线为初始压缩(C_c)。

各土条的中点处

理论

基底标高与计算深度z_{lim}之间的每一土层被划分为厚度至多为Δz的**分层**（在地下水位处截断）；各应力在分层中点处计算：

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

地下水位以上采用γ，以下采用γ_{sat}；γ_w = 9.81 kN/m³。

初始地应力是后续各阶段的**基准**。

土条越薄，结果越准确；手算时取单个土条即可得到近似结果。

地下水位位于地表

当γ_{sat} = 18时，γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³，σ'_{v0} = 8.19 z。后面的算例均采用该土层。

题目

算例

已知条件

土	$\gamma = 17$ kN/m^3（地下水位以上），$\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3（地下水位以下）
地下水位	**距地表1.5 m**
深度	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

求

求各深度处的σ_{v0}、u_0、σ'_{v0}值。

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**

地下水位以下，σ'_{v0}增长**较慢**（斜率γ' = 8.19 kN/m³）：z = 6 m时总应力为106.5，有效应力仅为62.4 kPa。

在GeoTerva中验算解答 ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$，或取室内试验值

理论

每个模型只使用**一种定义**：要么是超固结比OCR，要么是室内试验得到的σ'_p值：

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

OCR = 1：正常固结黏土；$\sigma'_p = \sigma'_{v0}$，超过初始应力的任何加载均为原始压缩。

若室内试验所得σ'_p小于σ'_{v0}，则提升至σ'_{v0}并给出警告：**欠固结黏土不在适用范围之内。**

σ'_p表示过去所受的最大应力，不会因开挖而减小。

OCR说明什么?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}。OCR较大，意味着存在一个较宽的再压缩区，黏土在荷载作用下首先在该区内以**较小的C_r**被压缩。

题目

算例

已知条件

土条	**中点**$z = 3$ m：$\sigma'_{v0} = 24.57$ kPa（**地下水位在地表，**$\gamma_{sat} = 18$**）**
工况	**(a)** $OCR = 3$ **· (b)室内试验**$\sigma'_p = 60$ kPa **· (c)室内试验**$\sigma'_p = 20$ kPa

求

各情况下的**σ′p**和**OCR**；解释其状态。

解答

解答

1 (a)已知OCR与(b)室内试验值

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

2 (c)室内试验值低于σ′v0

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

(a)和(b)为超固结黏土(σ′p > σ′v0)；对于(c)，模块给出警告，并将该黏土按**正常固结**处理(σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa)：欠固结黏土不在适用范围内。

在GeoTerva中验算解答 ↗

卸载与隆起

理论

卸除的荷载为坑底处的**初始有效上覆应力**（地下水位不变；水位以下卸除的重量按γ′计算）。卸载按基坑平面的Boussinesq影响系数I_{exc}分布（宽阔基坑取I_{exc} = 1）：

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

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

隆起**取负值**（沉降为+，隆起为−）。未给定C_s时，取$C_s = C_r$，并在报告中说明。

净压力$q_{net} = q_{gross} - q_{uplift}$仅在报告中列出；计算不是一步采用净压力完成的，而是按应力路径逐步进行。

NEDEN KABARMA?

开挖使有效应力降低，黏土发生膨胀。结构重新加载时，隆起得以恢复：这就是已膨胀土体的**再压缩**。

基础中心下的Δσ

理论

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

矩形B × L，在其中心下方：采用Newmark角点系数，$I_z = 4 \cdot I_{corner}$(m = B/2z′, n = L/2z′)：

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

（当$V < m^2n^2$时，反正切项增加π）。**条形荷载**（宽度B）在其中心线下方：$I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$，$\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$。z′ = 0处，$I_z = 1$。

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

注

应力增量沿基础中心下方的竖线取值（分层与时间分析）；在色带区域中，对基础以外的点，则分解为角点矩形。

题目

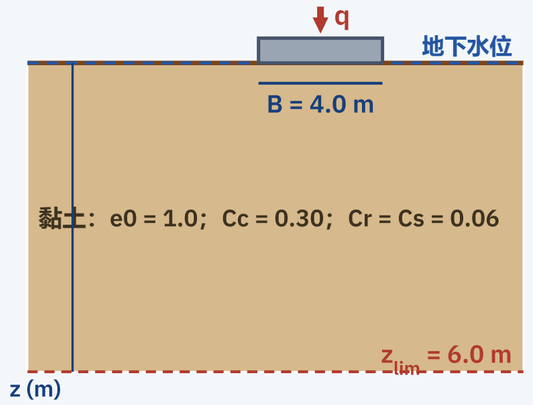
算例

已知条件

基础	**4 × 6 m矩形，$q = 150$ kPa，位于地表（$D_f = 0$）**
点	**分层中点z′ = 3 m，位于中心下方**
对比	**宽度B = 4 m的条形基础**

求

I_z和**Δσ**；条形荷载的数值相同。



解答 (1/2)

解答

1 矩形：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 矩形与条形

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

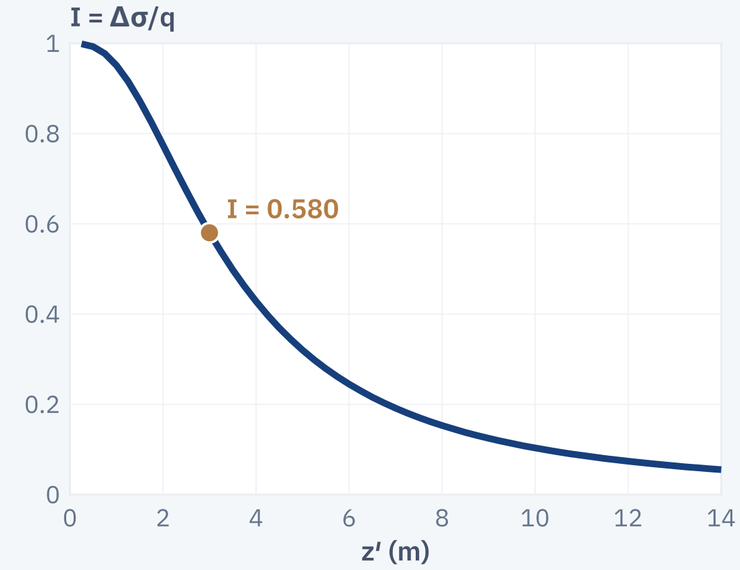
条形：$\alpha = 2\tan^{-1}\frac{4}{6} = 1.1760 \Rightarrow I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$

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

解答 (2/2)

解答

z′ (m)	I_z	Δσ (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



分层中点处Δσ = **87.0 kPa**（为q的58%）；较窄的条形荷载（相同B）为100.2 kPa：**长条形基础的影响深度更大。**即使在z′ = 10 m处，附加应力仍有10%。

在GeoTerva中验算解答 ↗

影响深度：$I(z') = p$

理论

附加应力随深度减小，但永不为零；对各分层压缩量求和需要一个下限：**计算深度z_{lim}**。在影响深度准则中，黏土压缩至中心点下方的Boussinesq附加应力降至作用压力的**p**倍为止（常用p = 10%）：

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

同一影响系数也控制平面形状相同的基坑的卸荷；因此无论按q_{gross}还是q_{net}读取，深度都是相同的。

若土层剖面终止于z_{lim}之上，则最后一层以相同性质延伸至z_{lim}；若终止于其下，则z_{lim}以下的土体不发生压缩。

另一种规则是**剖面底部**：假定存在坚硬底面。（$\Delta\sigma = 0.2\ \sigma'_{v0}$准则用于深处的小基础时会取到更深处；模块的规则仅取决于几何条件。）

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
条形	6.34 B	3.13 B

题目

算例

已知条件

基础	**(a) 4 × 6 m，p = 10%和20% · (b) 20 × 30 m 筏板基础，p = 10%和20%**
规则	**影响深度；$D_f = 0$**

求

各情形下的z'与z_{lim}；4 × 6 m时$I(z')$的验算。

解答

解答

1 验算：4 × 6 m，p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

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

基础	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筏板基础	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′**与基础尺寸成正比**：4 × 6 m基础的z_{lim} = 10.19 m，20 × 30 m筏板基础为**50.9 m**。计算筏板基础时考虑了黏土直至约51 m深度的压缩。

在GeoTerva中验算解答 ↗

再加载时的土条挤压

理论

对于该分层，$f = \Delta H/(1 + e_0)$；当$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$时，该分层的压缩量按最终应力所处的位置确定：

条件	再加载时的土条挤压
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{final} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{exc})$：隆起量的一部分得以恢复
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{final}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{final} < \sigma'_{exc}$	由C_s引起的附加膨胀（为负值）

若无开挖

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$且$S_b = 0$：按经典的再压缩和原始压缩，自初始应力起算。

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

题目

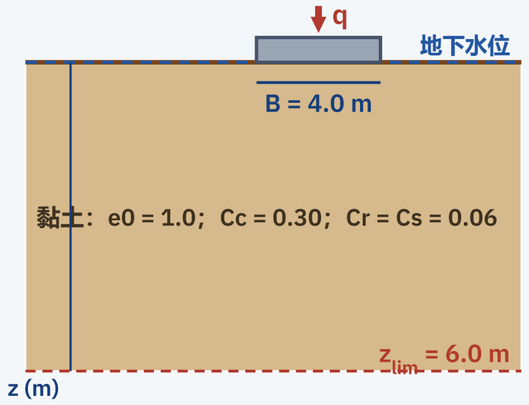
算例

已知条件

土	**单一黏土层，厚度6 m；** $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3**；地下水位位于地表；** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
基础	**4 × 6 m矩形，** $q = 150$ kPa**，位于地表（无开挖）**
土条	**单个土条，H = 6 m，中点** $z = 3$ m**：** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57$ kPa
超固结	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
附加应力	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04$ kPa **（算例3）** ⇒ $\sigma'_{final} = 111.61$ kPa

求

每层黏土的**压缩区段**和固结沉降S_c。



解答 (1/2)

解答

1 共用项：f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m；log($\sigma'_{final}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

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

2 (b) OCR = 6：σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{final} ⇒ 仅发生再压缩

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

同一黏土，同一荷载：正常固结黏土沉降**591.6 mm**，OCR = 6的黏土沉降**118.3 mm**；差异源于C_c/C_r = 5这一比值。

解答 (2/2)

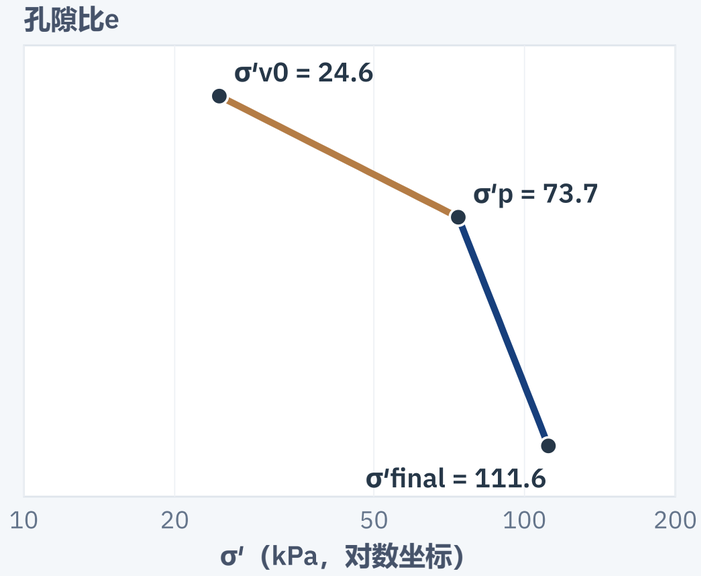
解答

3 (c) OCR = 3：$\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{final} = 111.61$ ⇒ 再压缩加原始压缩

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

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

OCR	σ'_p (kPa)	状态	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	原状	0	591.6	**591.6**
6	147.4	再压缩	118.3	0	**118.3**
3	73.7	再压缩 + 原始压缩	85.9	162.2	**248.0**



在GeoTerva中验算解答 ↗

是从原始地层算起，还是从隆起后的坑底算起？

理论

开挖之后施作基础：沉降取决于位移相对于**哪一基准**量测（开挖阶段中的*开挖后位移*选项）：

保留——自原始地基土起算（默认）：隆起另行显示；基础沉降为加载结束时的净变形：$S = S_c + S_{heave}$ = 超过σ'_{v0}的总压缩量。不大于被卸除上覆土层的荷载给出S = 0；若荷载更小，则土体仍高于原始标高（计入报告，沉降为0）。

加载前清零：开挖阶段的位移清零；沉降自已隆起的坑底起算：$S = S_c = S_b + S_r + S_v$。隆起部分的再压缩计入沉降：完全补偿的基础，其沉降量等于坑底的隆起量。若基坑在结构建成前一直敞开且隆起已经发展，这就是正确结果。

两种度量值始终都会输出；所作选择决定以哪一个作为基础沉降报告，并决定时间曲线和结果。

小结

保留：$S = S_c + S_{heave}$（较小）。清零：$S = S_c$（较大）。

题目

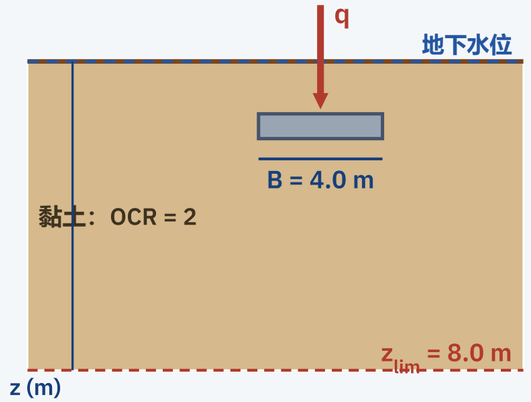
算例

已知条件

土	**黏土0–8 m，$\gamma_{sat} = 18$，地下水位在地表；** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$；$OCR = 2$
开挖	**宽基坑(I_{exc} = 1)，深度2 m；基础位于基坑底面**
基础	**4 × 6 m，$q_{gross} = 100$ kPa**
土条	**单一分层2–8 m，$H = 6$ m，$z = 5$ m，$f = 3$ m：** $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95$ kPa

求

σ'_{exc}、隆起、S_b、S_r、S_v、S_c；基础沉降（自原状土算起和重置后）。



解答 (1/3)

解答

1 开挖：卸除荷载、卸荷与隆起

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

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

2 加载：$I_z(z' = 3) = 0.5803$（算例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 压缩区段：$\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{final} = 82.60$

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

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

再加载时，首先恢复回弹量（S_b = 39.9 mm，即回弹的全部），然后是按C_r计算的54.2 mm再压缩，以及略超过σ'_p的3.3 mm原始压缩。

解答 (3/3)

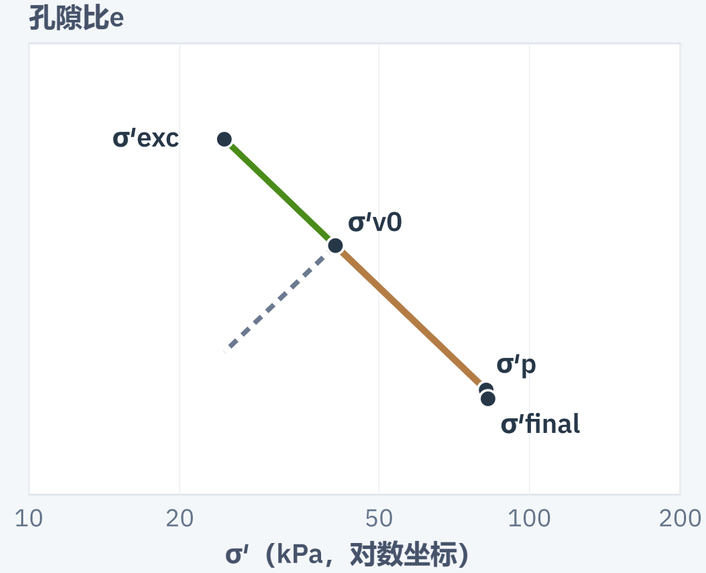
解答

4 基础沉降

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

变为零：$S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$

自原始地面起算的沉降为**57.5 mm**；自隆起后的坑底起算的沉降为**97.4 mm**。差值等于隆起量(39.9 mm)：基准的选取使结果改变69%。



在GeoTerva中验算解答 ↗

线性路径：$\Delta H = m_v\,\Delta\sigma'\,H$

理论

这是一条独立的、**线性**的计算路径：同一个m_v既用于卸载也用于再加载；不涉及C_c, C_r, C_s和e_0：

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

$$\text{隆起} = -m_v\,(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\,H \qquad S_c = m_v\,\left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right)H$$

S_c中直至σ'_{v0}的部分为所恢复的回弹量(S_b)。

由于呈线性，其循环回线自行闭合。

m_v的单位为1/kPa（体积压缩系数）；应根据应力范围选取。

与e – log σ′的差异

m_v法不考虑应力水平（无σ'_p）：每一应力增量产生相同的压缩量。

题目

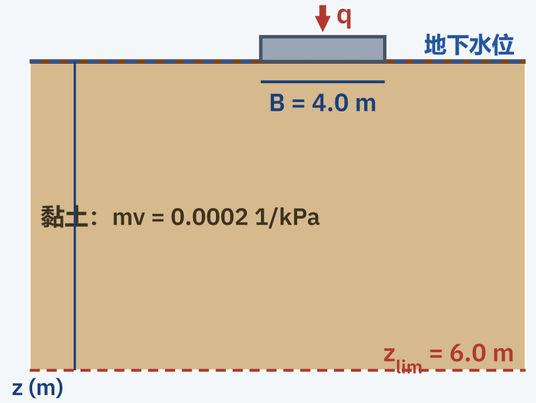
算例

已知条件

土	**6 m厚黏土，$m_v = 0.0002$ 1/kPa，地下水位在地表**
工况(a)	**无支撑：4×6 m，$q = 150$ kPa，$\Delta\sigma = 87.04$ kPa（算例3）**
工况(b)	**算例6中的基坑和基础（开挖2 m，$q = 100$ kPa，2–8 m土条）**

求

各工况的S_c；对(b)工况，求隆起量、S_b和净沉降。



解答

解答

1 (a)无开挖

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

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

$$\text{隆起} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

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

净沉降（相对于原始地面）S = S_c + 隆起 = **50.0 mm**；仅超出σ'_{v0}的41.65 kPa增量产生沉降。在线性路径下，e – log σ′法没有σ'_p的影响。

在GeoTerva中验算解答 ↗

Terzaghi：T_v、U与t

理论

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

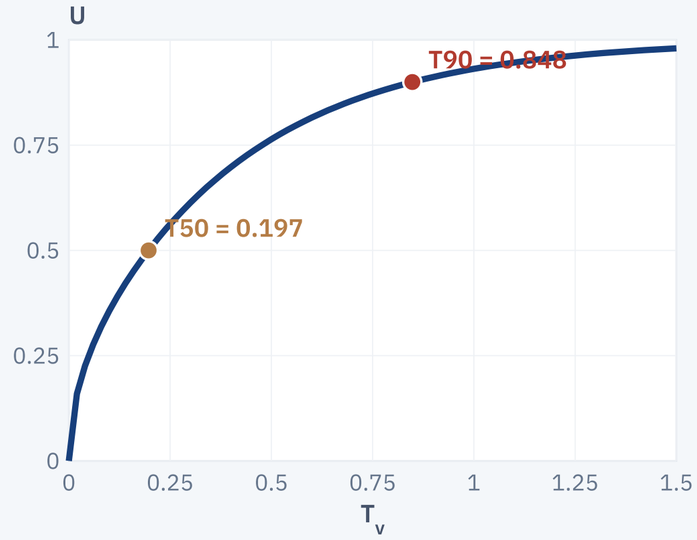
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H（单向排水）或H/2（双向排水）；H为基础底面标高以下的土层厚度（对于延伸至剖面以外的最后一层，计至z_{lim}）。

$T_{v,50}$ = 0.197；$T_{v,90}$ = 0.848。T_v < 0.05时，采用早期解U = 2√(T_v/π)。

C_v和H_{dr}不同的各土层固结速率不同：剖面的固结曲线为**各土层曲线之和**；剖面自身的t_{50}和t_{90}值由该总和曲线读取。

该曲线对应加载沉降S_c；假定隆起在加载前已经完成。



题目

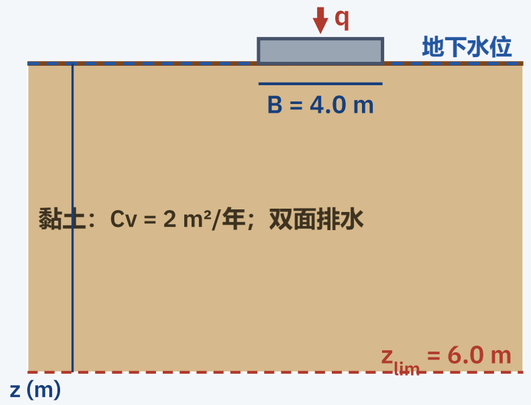
算例

已知条件

黏土	**6 m，正常固结（算例5a）：** $S_c = 591.6$ **mm**
固结	$C_v = 2\ \mathrm{m}^2/$**年；顶部和底部排水（双向）**
时间	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8年**

求

H_{dr}、t_{50}、t_{90}及S(t)；单面排水时的t_{90}。



解答 (1/2)

解答

1 排水距离与特征时间

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

2 单向排水(H_{dr} = 6 m)

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

双面排水时排水距离减半，所需时间降至**四分之一**：t_{90} = 3.82年，单面排水为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年内仅完成沉降的53%，4年内完成91% (S_c = 592 mm)；8年时U = 0.990。T_v较小时(< 0.05)，采用$U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

基础	**4 × 6 m，q = 150 kPa，作用于地表；地下水位在地表（γ_{sat} = 18）**
A层(0–4 m)	**软土，NC：$e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$；$C_v = 1$；双面排水**
B层(4–8 m)	**硬塑，$OCR = 2$：$e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$；$C_v = 3$；单向排水**
计算	**剖面底部(8 m)；每层作为一个土条(A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

求

各土层的S_c值、t_{50}和t_{90}；整体的S(t)曲线。

解答 (1/3)

解答

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 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 ⇒ Δσ = 36.74; σ'_{final} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

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

总固结沉降为**627.0 mm**：软弱的NC上层占总量的97%；坚硬、超固结的下层仅21.6 mm。

解答 (2/3)

解答

3 排水距离与所需时间(t = 0.197 H_{dr}^2/C_v; 0.848 H_{dr}^2/C_v)

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

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

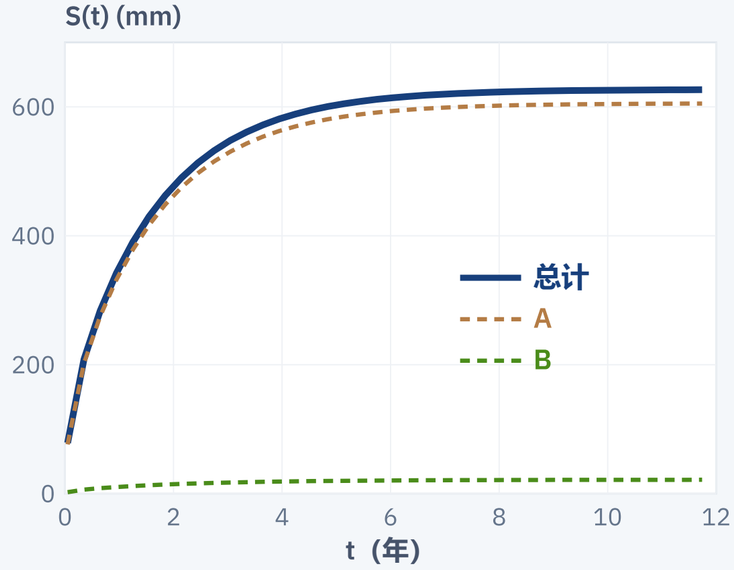
体系的曲线是和式S(t) = $U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$；其特征时间由该和读取：**$t_{50}$ = 0.794年，t_{90} = 3.43年**（接近占主导的A层）。

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

沉降在1年内完成56%，5年内完成96%；约10年后结束(627 mm)。曲线由**软弱的A层**控制。



在GeoTerva中验算解答 ↗

解读结果时应注意的要点

理论

基底标高 = 坑底（无开挖时为地表）；**静水**孔隙水压力；地下水位不受开挖影响。

应力增量取**基础中心下方的竖直线**上的值（各分层及时间分析）；色块区域在每一点上遵循同一应力路径。

e_0为每一阶段的初始孔隙比；**不存在次固结(C_α)**。

沉降为正，隆起为负；标题栏中的切换开关可反转符号，改为向上为正的显示方式（计算引擎仍保持经典约定）。

色带：沉降、回弹和变形等随深度迅速衰减的区域，采用$1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$各级着色；等宽色带会把下部区域压缩为单一颜色。

小结

要点回顾

应力路径：$\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}\,(C_s) \rightarrow \sigma'_{p}\,(C_r) \rightarrow \sigma'_{final}\,(C_c)$；$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$，不因开挖而减小

分层压缩$f = \Delta H/(1 + e_0)$：NC：$C_c\, f\, \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$；OC且$\sigma'_{final} \le \sigma'_p$：$C_r\, f\, \log(\ldots)$；$\sigma'_{final} > \sigma'_p$：$C_r + C_c$两部分

开挖：$q_{unload} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$，隆起量 $= -C_s\, f\, \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$；$S = S_c + S_{heave}$（原状地基）或$S_c$（重新归零）

Boussinesq：$\Delta\sigma = q\, I_z(z')$；矩形中心点为$4\, I_{corner}$，条形基础为$(\alpha + \sin\alpha)/\pi$；**$z_{lim}$**：$I(z') = p$（正方形2.09 B，L = 1.5 B时为2.55 B，条形6.34 B）

m_v法：$\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$，为线性；隆起量为$-m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\, H$

时间：$T_v = C_v\, t/H_{dr}^2$；$T_{v,50} = 0.197$，$T_{v,90} = 0.848$；$H_{dr} = H$（单面排水）或H/2（双面排水）；$S(t) = \Sigma\, U_i\, S_{c,i}$

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

所有数值算例均由模块自身的计算引擎生成，模块给出相同的数值（算例分层：dz = 土层厚度）。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

在GeoTerva中逐步计算本课件中的算例；在模块中可自由输入土层数量和开挖情况。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。