GeoTerva

岩土工程课程讲义 · 挡土墙

重力式挡土墙

讲义：石砌或混凝土重力式挡土墙的外部稳定性；墙体及随墙一起运动的土体、主动与被动土压力、水、扬压力和地震；抗滑移、抗倾覆和地基承载力验算；每个主题均配有工程算例。

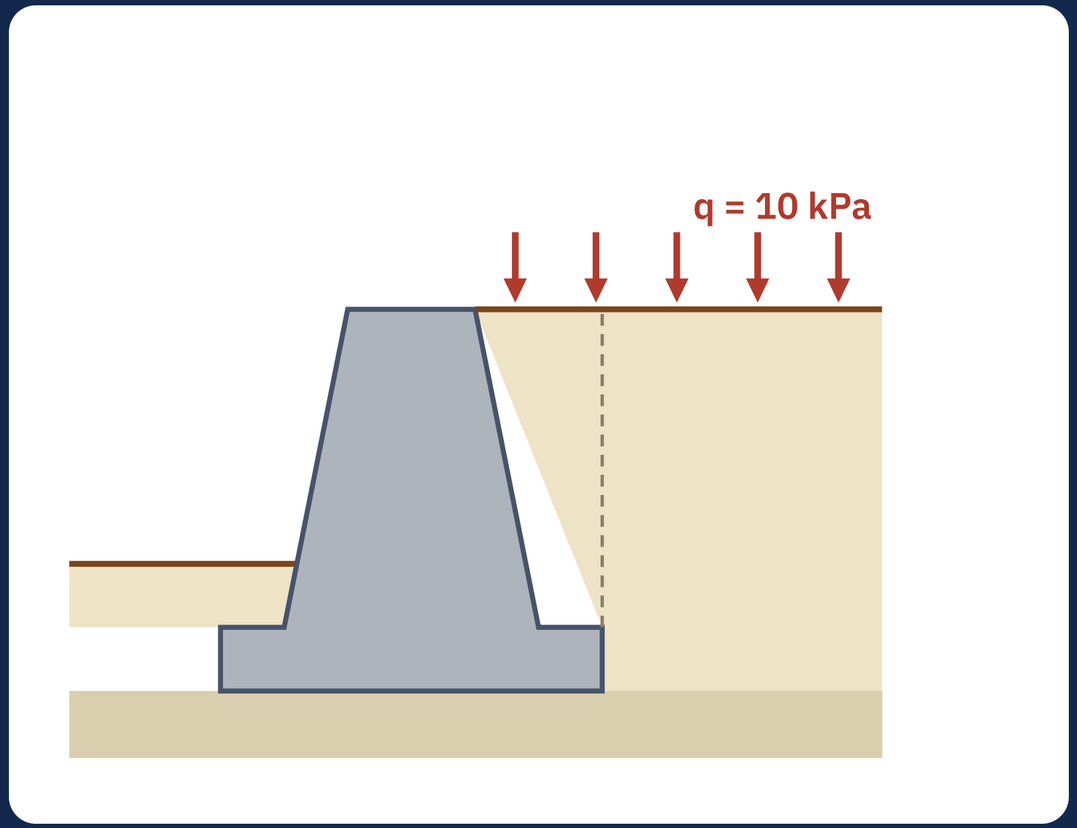
抗滑移 · 抗倾覆 · 地基承载力

Rankine · Coulomb · Mononobe–Okabe

水与扬压力

地震惯性力

受力明细汇总表



本讲内容

- 将重力式挡土墙分块，计算其**几何尺寸**和重量（面积、形心、力臂）
- 与墙一起运动的**土体块**，以及通过基础后缘的**竖向压力作用面**
- **主动**（竖直面上Rankine = Coulomb）、超载、**被动前部抗力**(K_{mob})和**水 + 扬压力**等作用力
- 利用**受力明细汇总表**和统一的符号规则($M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$)进行**抗滑移、抗倾覆和地基承载力**验算
- 地震时纳入**Mononobe–Okabe**推力、地震增量及墙体惯性力
- 解读结果：安全系数、偏心距、基底应力

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

所有量均按墙长1.00 m计(kN/m, kN·m/m)；压力单位为kPa。算例墙：H = 3 m的石砌墙(22 kN/m³)。

求解什么，如何绘制?

理论

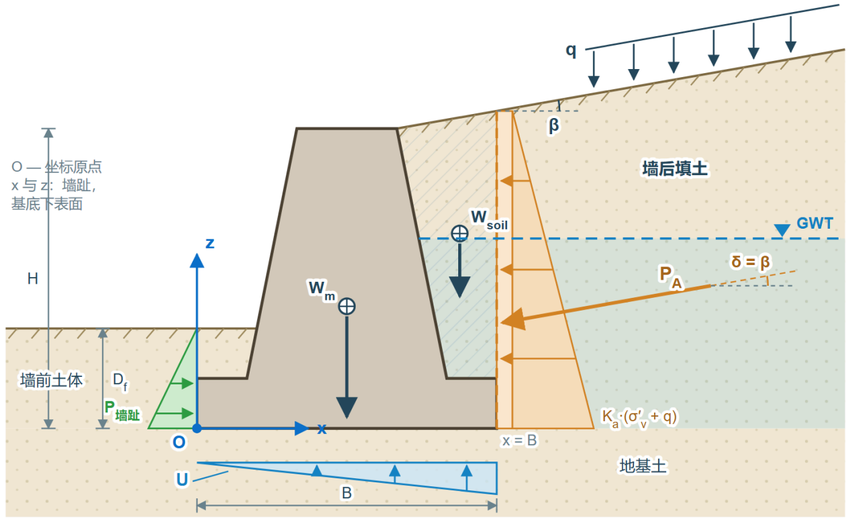
重力式挡土墙依靠**自身重量**抵抗滑移与倾覆。模块可分析墙身为倾斜梯形、两侧带台阶式基础的石砌或素混凝土挡土墙：

$$B = W_{bl} + W_{dl} + W_u + W_{dr} + W_{br}$$

墙体：H为总高度，W_u为顶宽，W_{dl}、W_{dr}为前、后墙面坡的水平偏移量，W_{bl}、W_{br}为前、后基础台阶的外伸宽度，H_{fl}、H_{fr}为前、后基础台阶的高度；重度：石材取22，混凝土取24 kN/m³。

土体：无黏性填土(c′ = 0)、倾斜表面β、地面超载q、地下水、墙前高度为D_f的土体和水。

三种理论：Rankine、Coulomb（静力）、Mononobe–Okabe（地震）。**验算**：抗滑移、抗倾覆、偏心距、地基承载力。



隔离体、受力汇总表、统一的符号规定

理论

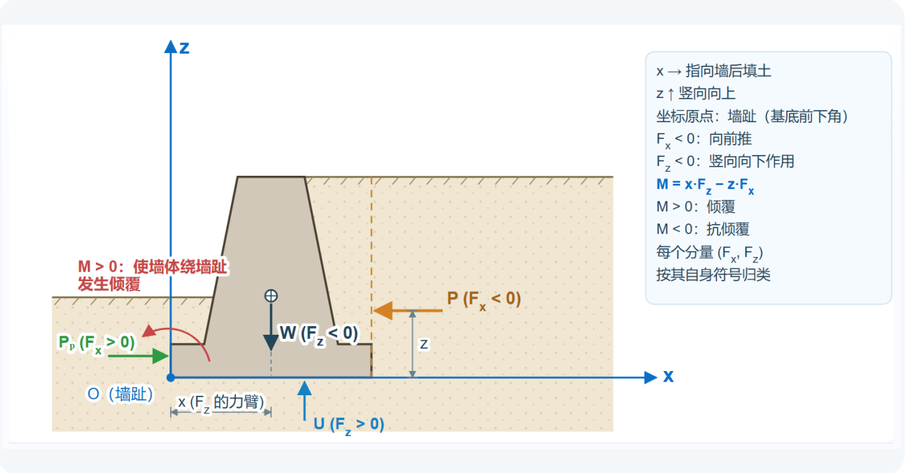
稳定性是一个**平衡**问题：首先需确定对哪一部分建立平衡，以及各力的符号如何规定。坐标原点O位于**墙趾**（前下角），x轴指向填土，z轴向上。一个力由其分量(F_x, F_z)及作用点表示；对O点的力矩：

$$M = x\,F_z - z\,F_x \qquad M > 0：\text{倾覆}，\quad M < 0：\text{粘结}$$

对于自重($F_z = -W, x > 0$)，$M = -xW < 0$：对墙起稳定作用。对于指向前方的推力($F_x < 0$)，$M = -zF_x > 0$：使墙倾覆。扬压力($F_z > 0$)使墙倾覆，墙前抗力($F_x > 0$)对墙起稳定作用。

任何力都不预先归入“抗力”一类；各分力按其自身符号计入（倾斜推力的竖向分力确实起抗力作用）。

隔离体：墙及随其一起运动的土体；**受力明细汇总表**中的每一项在三项验算中读取方式相同：不会出现某个力在一项验算中被遗漏、而在另一项验算中被计入的情况。



分块、重心及力臂

理论

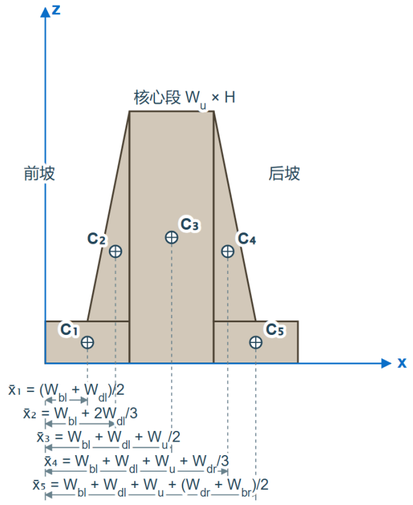
墙的自重及其对墙趾的力矩同为两项稳定性验算的基础。截面被划分为面积和形心已知的简单图形（墙趾、前坡面、中部、后坡面、墙踵）：

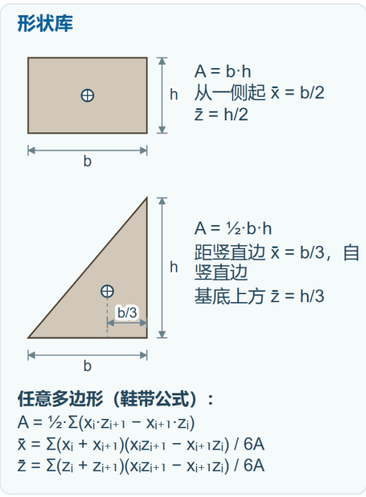
$$W_i = \gamma_m A_i \qquad W_m = \sum W_i \qquad \bar{x}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{x}_i}{W_m} \qquad \bar{z}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{z}_i}{W_m}$$

在受力明细汇总表中，墙体仅为一项：$F_z = -W_m$，作用于$\bar{x}_m$处；其力矩为$M = -W_m\bar{x}_m = -\Sigma M_i$。

高度$\bar{z}_m$仅在计算水平惯性力$k_h W_m$（地震）时需要。

模块还可将整个截面作为单一多边形进行计算；两种结果在10^{-9}范围内吻合。





题目

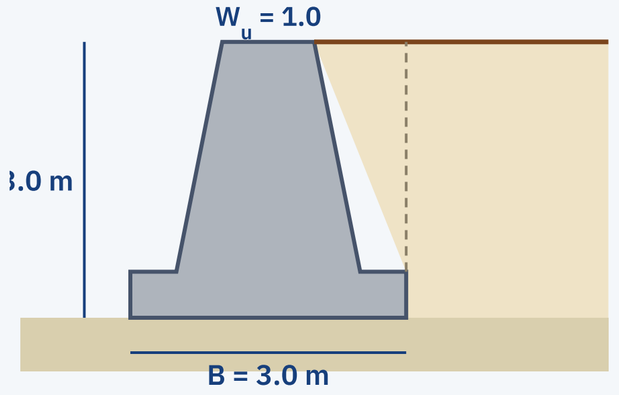
算例

求

五个部分的面积与重量；W_m、$\bar{x}_m$、$\bar{z}_m$。

已知条件

剖面	$H = 3.0$ m; $W_u = 1.0$ m; $W_{dl} = W_{dr} = 0.5$ m; $W_{bl} = W_{br} = 0.5$ m; $H_{fl} = H_{fr} = 0.5$ m (B = 3.0 m)
材料	**砌石挡土墙：** $\gamma_m = 22$ kN/m^3



解答

解答

1 分块（例如前侧斜面：$A = \frac{1}{2}(0.5)(3.0 - 0.5) = 0.625$；$\bar{x} = W_{bl} + 2W_{dl}/3 = 0.833$；$\bar{z} = H_{fl} + (H - H_{fl})/3 = 1.333$）

部分	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 22A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
墙趾	0.500	0.500	0.250	11.00	5.50	2.75
前坡	0.625	0.833	1.333	13.75	11.46	18.33
主体（核心）	3.000	1.500	1.500	66.00	99.00	99.00
后侧边坡	0.625	2.167	1.333	13.75	29.79	18.33
墙踵	0.500	2.500	0.250	11.00	27.50	2.75
合计	**5.250**			**115.50**	**173.25**	**141.17**

2 墙体重心

$$\bar{x}_m = \frac{173.25}{115.50} = \mathbf{1.500}\ \text{m} \qquad \bar{z}_m = \frac{141.17}{115.50} = \mathbf{1.222}\ \text{m}$$

墙体自重**W_m = 115.50 kN/m**，距墙趾$\bar{x}_m$ = 1.50 m，距底面$\bar{z}_m$ = 1.22 m；其力矩M = −173.25 kN·m/m（抗力矩）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

竖直压力面与土块

理论

土压力为什么作用在**底板后缘**，而不是墙的背坡面上？墙踵上方的土体不能相对于墙滑动：墙移动时，土体随之移动。填土中的破裂面不是从背坡面开始，而是自**墙踵后缘**开始。自洽的隔离体：墙 + 该土块；其外侧面上的**外部压力面**在x = B处为竖直面：

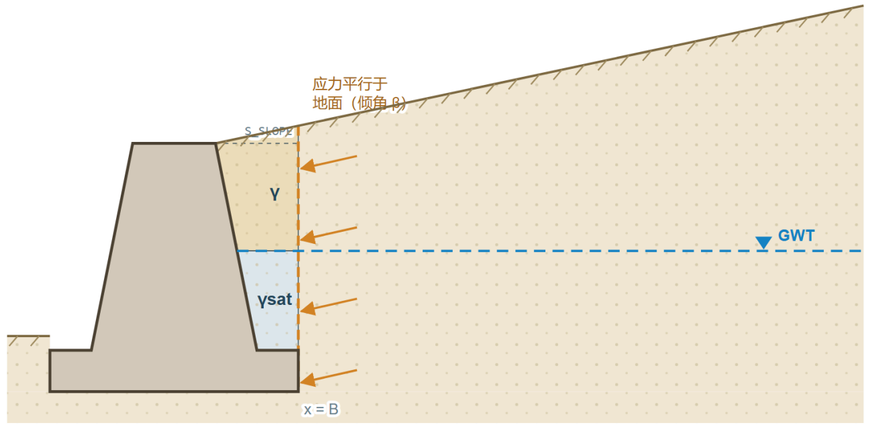
该平面自底板后缘上方的地表向下延伸至底板以下；在倾斜填土中，还包括地表的抬升部分。该平面与墙背之间的全部物体均按**重量**计入；该平面处是土对土：不计墙与土之间的摩擦，推力按δ = β作用。

前部墙趾上方的填土也随墙体一起移动：竖向荷载W_{toe}；输入$D_f = 0$即表示前部土体可以计入。

超载位于墙踵上方的竖向部分（Q_{heel}）属有利荷载，但因其被视为可能存在、也可能不存在的荷载，故**不参与任何验算**；其侧向作用则始终计入。

计算采用总应力：水下土体按γ_{sat}计重，水本身作为单独的力（U_{rear}、浮力）加入；γ′与浮力不同时采用。

穿过基础后缘的垂直平面（适用于所有方法）



题目

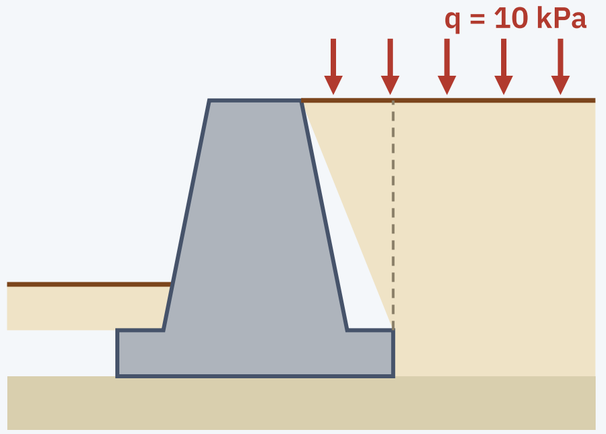
算例

已知条件

墙	**算例1中的断面；墙前地面高度**$D_f = 1.0$ **m**
土	**干填土：**$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$**；地表水平**
超载	$q = 10$ **kPa（地表处）**

求

与墙体一起移动的**土块**的重量与位置；**前部填土**；为何Q_{heel}不进入验算？



解答 (1/2)

解答

1 墙踵上方的矩形 + 后侧边坡旁的三角形（计算至x = B = 3.0的平面）

$$A_r = W_{br}(H - H_{fr}) = 0.5(2.5) = 1.250\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.75,\ \bar{z} = 1.75)$$

$$A_t = \tfrac{1}{2} W_{dr}(H - H_{fr}) = 0.625\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.333,\ \bar{z} = 2.167)$$

$$W_s = \gamma(A_r + A_t) = 18(1.875) = \mathbf{33.75}\ \text{kN/m}$$

2 位置

$$\bar{x}_s = \frac{1.250(2.75) + 0.625(2.333)}{1.875} = \mathbf{2.611}\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = \mathbf{1.889}\ \text{m}$$

解答 (2/2)

解答

3 墙前填土（位于墙趾以上，D_f = 1.0 m）及超载

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(0.5 + 0.60)(0.5) = 0.275\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.275) = \mathbf{4.95}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0.276)$$

$$Q_{heel} = q(B - x_{BT}) = 10(3 - 2) = \mathbf{10.0}\ \text{kN/m} \quad \text{（不参与任何验算）}$$

总竖向荷载N = W_m + W_s + W_{toe} = 115.50 + 33.75 + 4.95 = **154.20 kN/m**。Q_{heel} = 10.00 kN/m是表中“未采用”的一项。

在GeoTerva中验算解答 ↗

Rankine与Coulomb，竖直面上

理论

若填土表面倾角为β，则在Rankine半无限边坡解中，竖直面上的应力**平行于填土表面**：$\sigma'_a = K_{a\beta}\sigma'_v$：

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'}\ (\beta = 0)$$

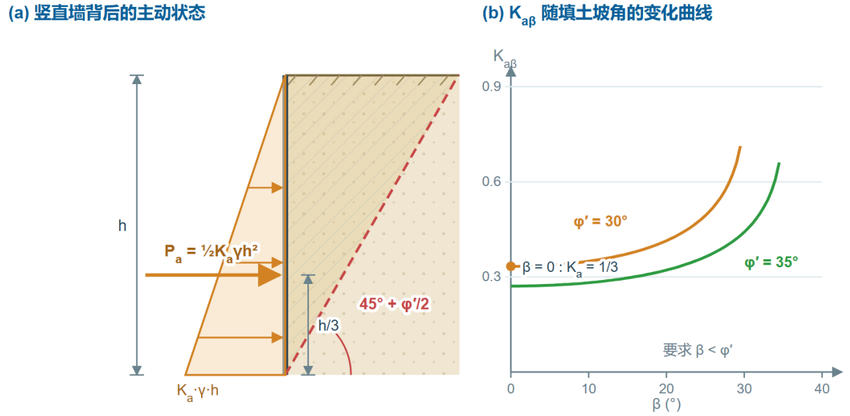
$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ \ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ \ (h/2)$$

平方根要求β < φ′；若β ≥ φ′，则边坡本身不稳定，计算被阻止。

Coulomb：对竖直面(α = 90°)且δ = β，K_a与Rankine $K_{a\beta}$**对任意β均完全相等**；两种方法在该平面上给出相同的压力。h为该平面的高度（含地表的抬高）。

水平分量P cos β，竖向分量P sin β（在上升坡面上向下作用：抗滑）。

地面超载计算两次（有q和无q）；P_Q为差值。



题目

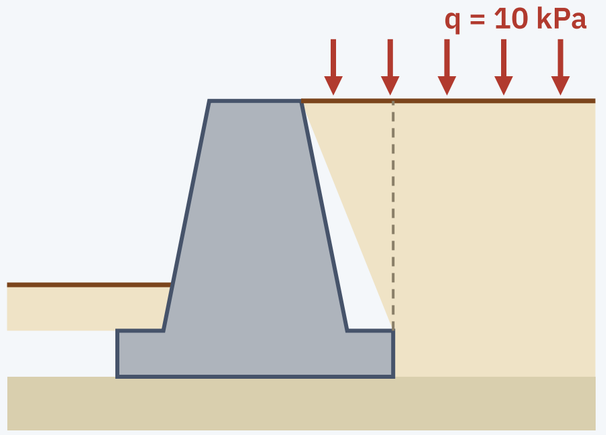
算例

已知条件

墙与土体	**算例2中的挡土墙与填土：** $h = H = 3.0$ **m；** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$**；水平地表**
超载	$q = 10$ **kPa**

求

K_a、土体推力P_A、超载推力P_Q及其力矩。



解答

解答

1 $K_a = (1 - \sin30°)/(1 + \sin30°) = 0.3333$；推力（竖直面上，水平向）

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(9) = \mathbf{27.00}\ \text{kN/m}\quad (z = 1.00\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(3) = \mathbf{10.00}\ \text{kN/m}\quad (z = 1.50\ \text{m})$$

2 总水平推力与倾覆力矩（以墙趾为矩心）

$$\Sigma H_{drive} = 27.0 + 10.0 = \mathbf{37.0}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 27.0(1.00) + 10.0(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

土体推力27.00，超载推力10.00 kN/m：合计**37.00 kN/m**，对墙趾的力矩为**42.00 kN·m/m**。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

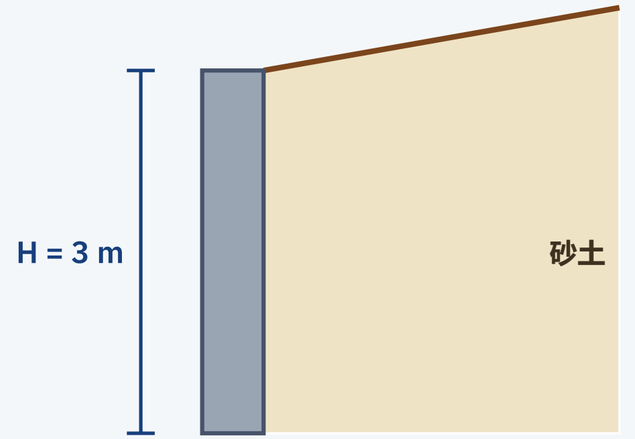
算例

已知条件

墙与土体	**算例2中的挡土墙；填土相同，但地表上升** $\beta = 10^\circ$ **（沿远离墙体方向）**
超载	$q = 10$ **kPa**

求

$K_{a\beta}$、推力分量；结果相对于水平填土的变化（抗滑移、抗倾覆、偏心距）。



解答 (1/2)

解答

1 系数$K_{a\beta}$ (cos β = 0.9848, √(cos²β − cos²φ′) = 0.4689)

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - r}{\cos\beta + r} = 0.9848\,\frac{0.5159}{1.4537} = \mathbf{0.3495}\ \text{(水平方向 } 0.3333\text{)}$$

2 推力（h为平面的高度，即H加地表的升高值；计算引擎）

$$P_A:\ F_x = 31.25,\ F_z = 5.51\ \text{kN/m}\ \text{(水平和竖向)}$$

$$P_Q:\ F_x = 10.93,\ F_z = 1.93\ \text{kN/m}$$

解答 (2/2)

解答

3 验算（计算引擎）

$$\Sigma F_z = -N = -163.23 \text{ kN/m} \quad (\text{土体块 } 35.34)$$

$$FS_s = 2.412 \qquad FS_o = 5.734 \qquad e = 0.037 \text{ m} \qquad q_{max} = 58.4 \text{ kPa}$$

抬高边坡会增大推力（$K_{a\beta}$ 0.333 → 0.350），但**推力的竖向分量**和更重的土块起稳定作用：抗滑移FS 2.62 → 2.41，抗倾覆FS 6.26 → 5.73；偏心距0.068 → 0.037 m。

在GeoTerva中验算解答 ↗

静止土压力与被动土压力之间的组合系数

理论

墙前土体(c′ = 0)由Rankine被动土压力系数与Jaky静止土压力系数的**混合**来表征；这是因为完全被动抗力所需的位移量，是正常使用的墙所不允许的：

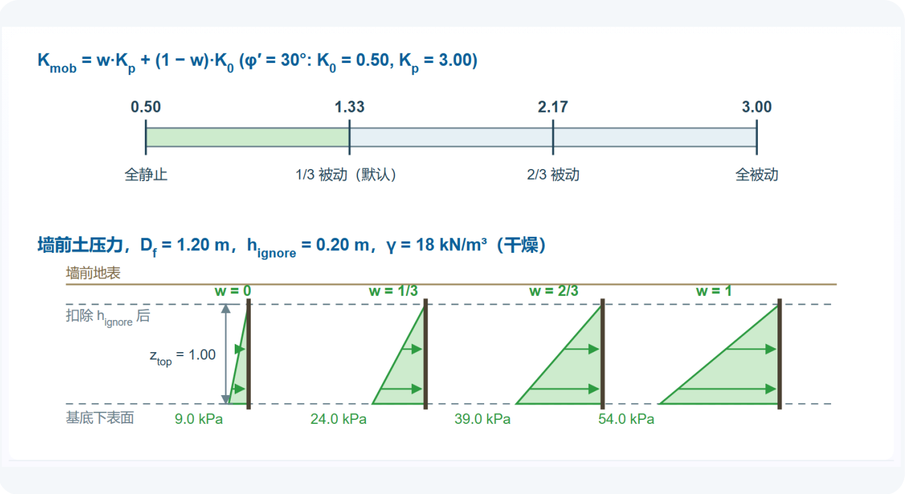
$$K_{mob} = w\,K_p + (1 - w)\,K_0 \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

$$p(z) = K_{mob}\,\sigma'_v(z) \qquad P_P = \tfrac{1}{2} K_{mob} \gamma D_f^2 \;\; (D_f/3)$$

w = 0为完全静止状态，1/3（默认值），2/3，1为完全被动状态。前侧土体顶部h_{ignore}厚度（可能被开挖、可能软化）不予计入。

前方抗力仅在**抗滑移验算中**计入（静力工况下全额计入，地震工况下按$\eta_{p,E}$计入）；**抗倾覆和承载力验算中一律不**使用。

前侧水(h_{wf})的推力指向墙后，使净推力减小。



题目

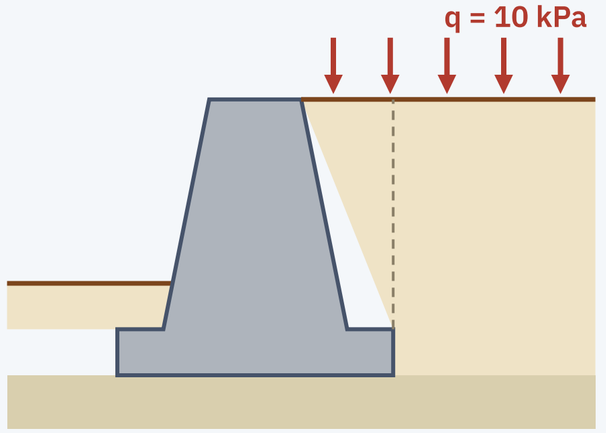
算例

求

K_{mob}、P_P及抗滑移安全系数FS_S（针对算例2中的墙）。

已知条件

墙前土体	$D_f = 1.0$ m; $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$; $h_{ignore} = 0$
工况	**完全静止状态、1/3、2/3、完全被动状态；以及完全不计墙前被动抗力时**



解答

解答

1 K_{mob}与推力（默认w = 1/3）

$$K_{mob} = \frac{1}{3}(3.000) + \frac{2}{3}(0.500) = \mathbf{1.333}$$

$$P_P = \frac{1}{2}K_{mob}\gamma D_f^2 = \frac{1}{2}(1.333)(18)(1)^2 = \mathbf{12.0}\ \text{kN/m}\quad (z = D_f/3 = 0.333\ \text{m})$$

2 四种情形($FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive} = (84.81 + P_P)/37.0$)

状态	w	K_{mob}	P_P (kN/m)	FS_s
完全静止状态	0	0.500	4.50	2.414
1/3被动土压力 + 2/3静止土压力（默认）	1/3	1.333	12.00	2.616
2/3被动土压力 + 1/3静止土压力	2/3	2.167	19.50	2.819
完全被动	1	3.000	27.00	3.022
墙前抗力不计入	–	–	0	2.292

计入前部抗力的量使FS_s在2.29与3.02之间变化（默认**2.62**）；若墙前土体可能被挖除，则该计入量取零：D_f和h_{ignore}须审慎选取。

在GeoTerva中验算解答 ↗

由同一受力明细汇总表得出三项验算

理论

抗滑移：基底靠摩擦力保持稳定；所需剪力$\Sigma H_{drive} - \Sigma P_{resist}$，可用剪力$\mu_b N$（无附着；N为有效法向力，含扬压力影响）。抗力累加于分母中：

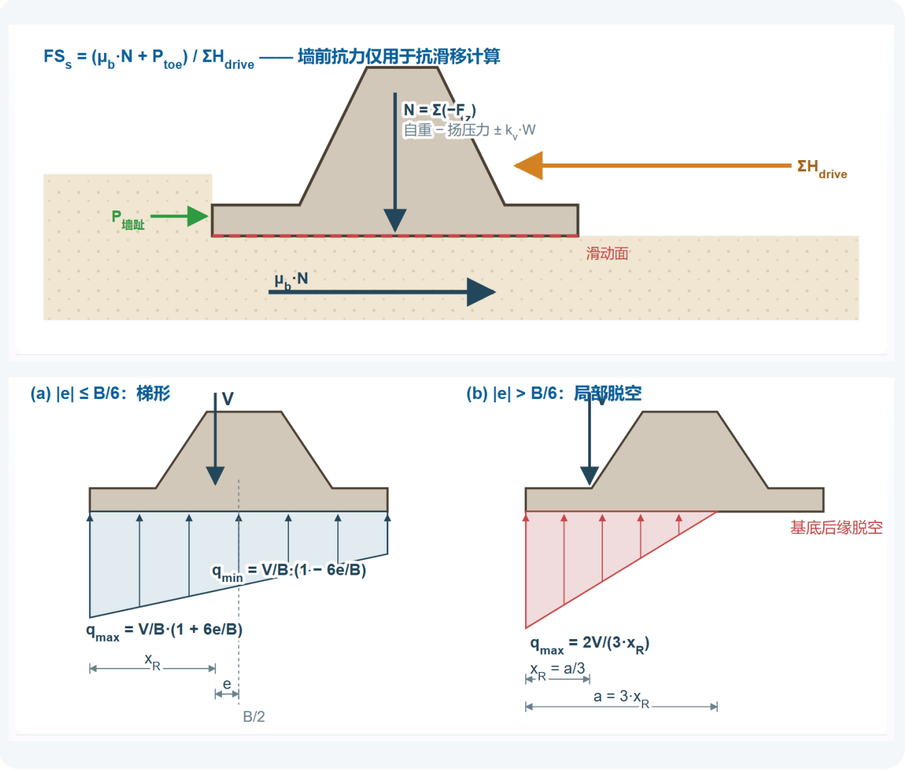
$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad \mu_b = \tan\delta_b$$

倾覆以墙趾为转动点：每一分项的$-zF_x$与xF_z部分按各自的符号计入$\Sigma M_{overturning}$或$\Sigma M_{resisting}$；墙前抗力不计入：

$$FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

地基承载力：当|e| ≤ B/6时，基底全部与地基接触；否则土不能承受拉力，仅部分基底接触：

$$q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}:\ q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$



题目

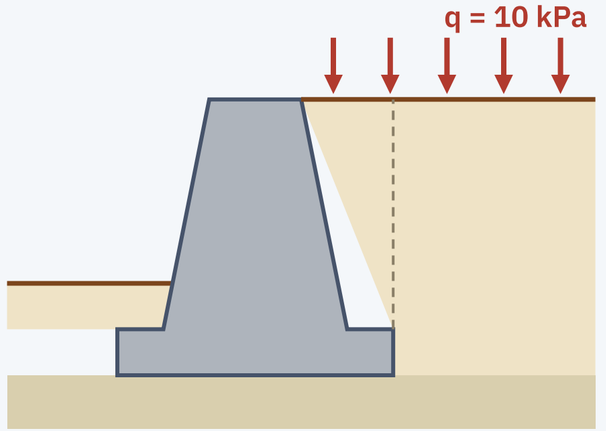
算例

已知条件

墙体与荷载	**算例1–5中的墙：** $B = 3.0$ m；$W_m = 115.5$，$W_s = 33.75$，$W_{toe} = 4.95$ kN/m；$P_A = 27.0$，$P_Q = 10.0$ kN/m
阻力	$\mu_b = 0.55$；**墙前抗力** $P_P = 12.0$ **kN/m (w = 1/3)**；$q_{all} = 200$ **kPa**
所需	$FS_s \geq 1.5$，$FS_o \geq 2.0$；**基底必须完全接触**

求

FS_s、FS_o、x_R、e、q_{max}、q_{min}以及各项验算的结果。



解答 (1/3)

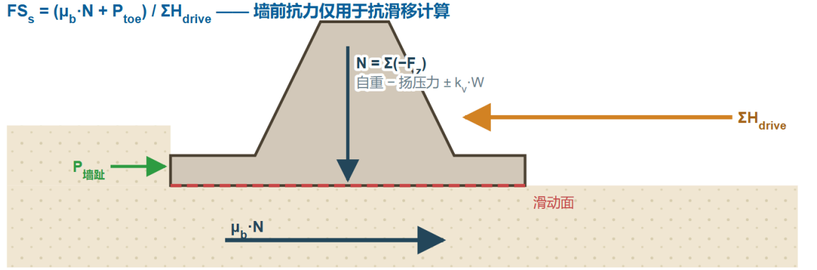
解答

1 基底摩擦：$N = W_m + W_s + W_{toe}$（不含Q_{heel}）

$$N = 115.50 + 33.75 + 4.95 = \mathbf{154.20}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(154.20) = 84.81\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{84.81 + 12.0}{37.0} = \mathbf{2.616} \ \geq 1.5\ \checkmark$$



解答 (2/3)

解答

2 倾覆力矩（对墙趾取矩；仅计推力）

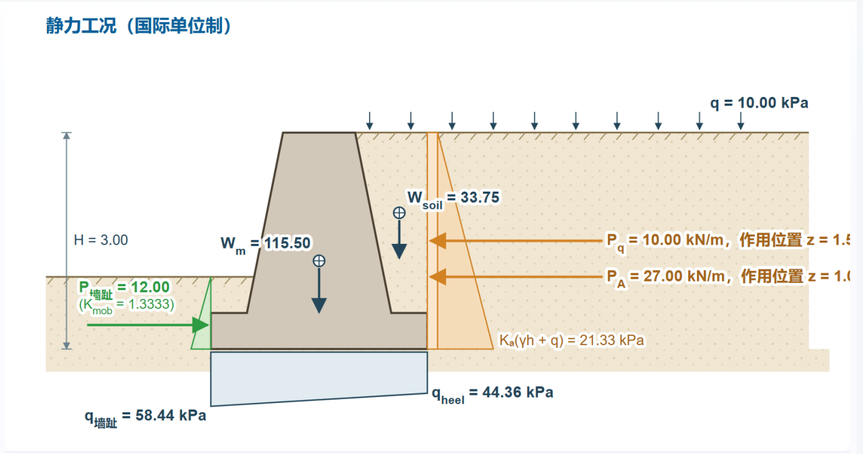
$$M_o = P_A(1.00) + P_Q(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

3 抗力矩：墙+土块+墙前填土

$$M_r = W_m\bar{x}_m + W_s\bar{x}_s + W_{toe}\bar{x}_{toe}$$

$$= 173.25 + 88.13 + 1.36 = \mathbf{262.74}$$

$$FS_o = \frac{262.74}{42.0} = \mathbf{6.256}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



解答 (3/3)

解答

4 合力位置与偏心距

$$\Sigma M = M_o - M_r = 42.00 - 262.74 = -220.74$$

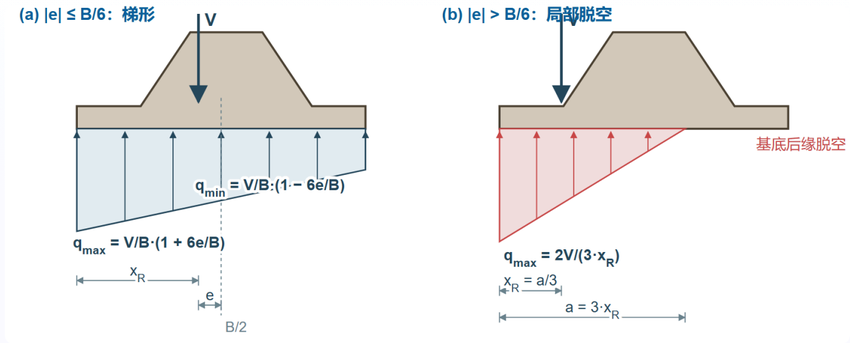
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{220.74}{154.2} = \mathbf{1.4315}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.0685}\ \text{m} \le \frac{B}{6} = 0.500\ \checkmark$$

5 基底应力（完全接触）

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.0685)}{3}\right) = \mathbf{58.44}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{44.36}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.62**，FS_o = **6.26**，e = 0.068 m，q_{max} = **58.4 kPa** ≤ 200，q_{min} = 44.4 kPa > 0：**静力工况下各项验算均满足。**

在GeoTerva中验算解答 ↗

两侧为静水，基底为线性分布的扬压力

理论

水压力是各向同性的，垂直作用于其接触的每个表面。隔离体的三个边界被水包围：后侧压力面、墙的前面和底板底面。每一项在受力汇总表中单独列项：

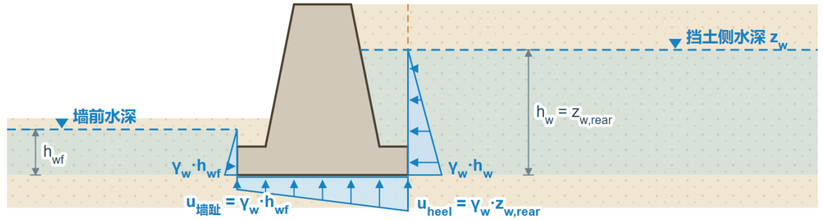
$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \ \ (h_w/3) \qquad U_{front} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_{wf}^2 \ \ (h_{wf}/3,\ \text{向后})$$

基底下的孔隙水压力自墙趾处的水头至墙踵处的水头呈**线性**变化（直线水头损失）：

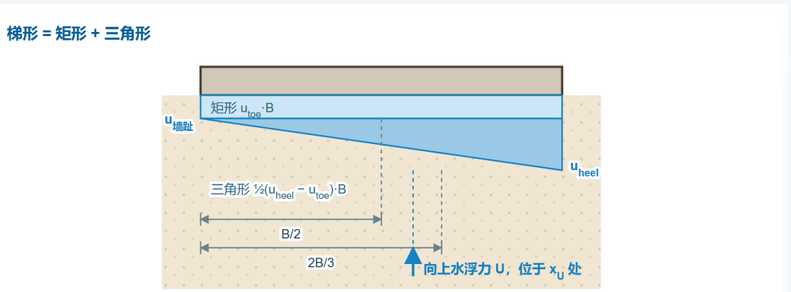
$$U = \frac{B\,(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B\,(u_{toe} + 2u_{heel})}{3\,(u_{toe} + u_{heel})}$$

扬压力向上作用(F_z = +U)：使N减小，从而减小基底摩擦力，并增加倾覆力矩$U \cdot x_U$。

$h_W = H - z_W$（z_W：地下水位距墙顶的深度）；墙前水头高度h_{wf}朝墙后方向作用，使净推力减小。若两侧水位不同，还须另行考虑水力稳定性（渗流）。



$U = B \cdot (u_{toe} + u_{heel})/2$，作用于 $x = B \cdot (u_{toe} + 2u_{heel}) / (3(u_{toe} + u_{heel}))$



题目

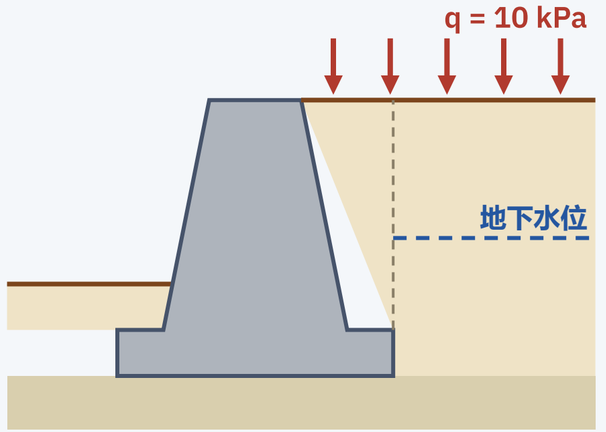
算例

已知条件

墙与土体	**算例1–5中的挡土墙与填土($\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$, $q = 10$ kPa)；静力工况**
水	**填土中地下水位位于墙顶以下1.5 m($h_w = 1.5$ m)；墙前无水；基底下为线性分布的扬压力**

求

土体推力和水的变化；**扬压力**和**N**；FS_s、FS_o、e、q_{max}。



解答 (1/2)

解答

1 土体推力（上部取γ，下部取γ′ = 20 − 9.81 = 10.19）和水推力

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma d_1^2 + K_a\gamma d_1 d_2 + \tfrac{1}{2}K_a\gamma' d_2^2$$

$$= 6.75 + 13.50 + 3.82 = \mathbf{24.07}\ \text{kN/m}\ \ (z = 1.061\ \text{m})$$

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}(9.81)(1.5)^2 = \mathbf{11.04}\ \text{kN/m}\ \ (z = 0.50\ \text{m}) \qquad P_Q = 10.0$$

2 扬压力（墙趾处u = 0，墙踵处u = 9.81·1.5 = 14.72 kPa；三角形分布）

$$U = \tfrac{1}{2}(14.72)(3.0) = \mathbf{22.07}\ \text{kN/m}\ \ \text{（向上）}\ \ \text{at}\ x_U = \tfrac{2B}{3} = 2.00\ \text{m}$$

解答 (2/2)

解答

3 有效法向力与摩擦力（土块按γ_{sat}计：W_s = 34.95）

$$N = W_m + W_s + W_{toe} - U = 115.50 + 34.95 + 4.95 - 22.07 = \mathbf{133.33}\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{0.55(133.33) + 12.0}{24.07 + 10.0 + 11.04} = \frac{85.33}{45.11} = \mathbf{1.892}$$

4 抗倾覆与基底

$$M_o = 25.54 + 15.00 + 5.52 + 44.14 = 90.20\ \ (P_A,\ P_Q,\ U_{rear},\ \text{上浮}) \qquad M_r = 265.98$$

$$FS_o = \frac{265.98}{90.20} = \mathbf{2.949} \qquad x_R = \frac{175.78}{133.33} = 1.318\ \text{m} \quad e = 0.182\ \text{m}$$

$$q_{max} = \mathbf{60.58} \qquad q_{min} = \mathbf{28.30}\ \text{kPa}$$

水使FS_s由2.62降至**1.89**，FS_o由6.26降至**2.95**，q_{min}由44.4降至28.3 kPa（扬压力使N减小22.1 kN/m，并增加44.1 kN·m/m的倾覆力矩）；各项验算仍然满足。

在GeoTerva中验算解答 ↗

Mononobe–Okabe推力与墙身惯性力

理论

拟静力法中，每一质量上作用有水平力$k_h mg$和竖向力$\pm k_v mg$；控制方向是惯性力向前（与土压力同向）推动。重力与惯性力共同作用，相当于旋转了θ角的重力场；Coulomb楔体在计入惯性力后求解（Mononobe–Okabe）。竖直墙背、水平填土(δ = β = 0)时：

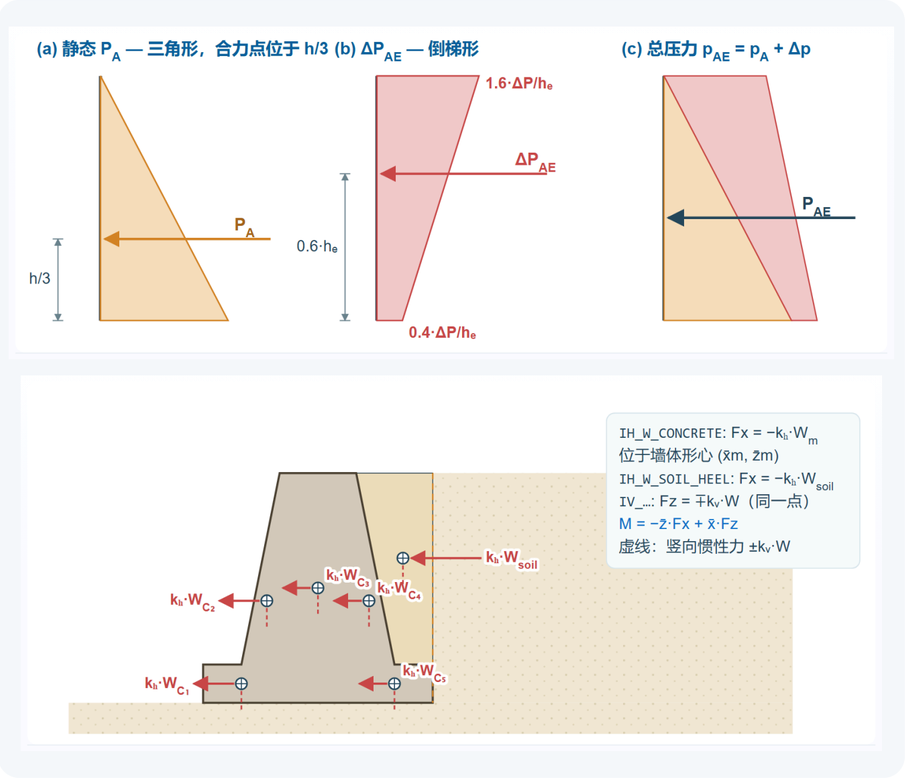
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'-\theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE}$$

若$\varphi' - \theta < 0$，则任何土楔均无法保持平衡：“无解”，各项验算视为不满足。

分布：P_{AE}仅给出大小，不给出作用位置。$\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_{A,static}$按倒梯形分布（顶部为1.6ΔP/h，底部为0.4ΔP/h；合力位于**0.6h**处）；静力部分保持其静力分布形状。

惯性力：墙体、土体块和墙前填土在各自重心处受到向前的$k_h W$作用力；若$k_v > 0$，则按$(1 \pm k_v)$分别计算两种情形，以最小FS为准。另外附加水的动水压力$(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$（作用点位于$0.4h_w$处）。

墙前被动抗力在地震时乘以$\eta_{p,E}$；默认取**0**（不考虑）。



题目

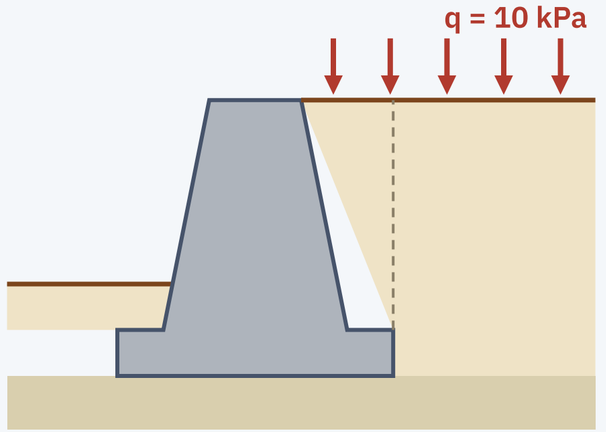
算例

求

θ，K_{AE}，P_{AE}，ΔP_{AE}，$\bar{z}$；惯性力；FS_s，FS_o，e，q_{max}。

已知条件

墙与土体	**算例1–6中的墙和填土（静力FS_s = 2.62；FS_o = 6.26）**
地震	$k_h = 0.15$，$k_v = 0$；**计入的墙前抗力**$\eta_{p,E} = 0$；**所需**$FS_s,\ FS_o \geq 1.1$



解答 (1/3)

解答

1 地震角与地震系数

$$\theta = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ$$

$$\sqrt{\sin 30^\circ \sin(30^\circ - 8.53^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.4302$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(21.47^\circ)}{\cos^2 8.53^\circ\,(1+0.4302)^2} = \mathbf{0.4329}$$

2 动推力和地震增量（静力P_A + P_Q = 37.0 kN/m）

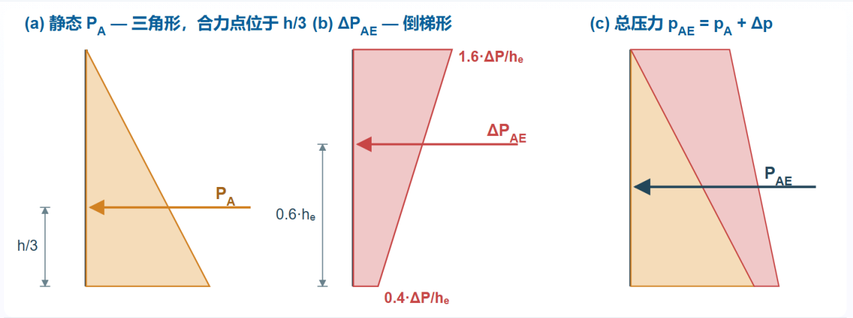
$$P_{AE} = (81+30)(0.4329) = \mathbf{48.06}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 48.06 - 37.0 = \mathbf{11.06}\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

3 作用高度

$$\bar{z}_{AE} = [27.0(1.00) + 10.0(1.50) + 11.06(1.80)]/48.06$$

$$= 61.90/48.06 = \mathbf{1.288}\ \text{m}$$



解答 (2/3)

解答

4 惯性力$k_h W$（作用于各重心处，指向前方）

$$IH_m = 0.15(115.50) = 17.325 \ \ (z = 1.222\ \text{m})$$

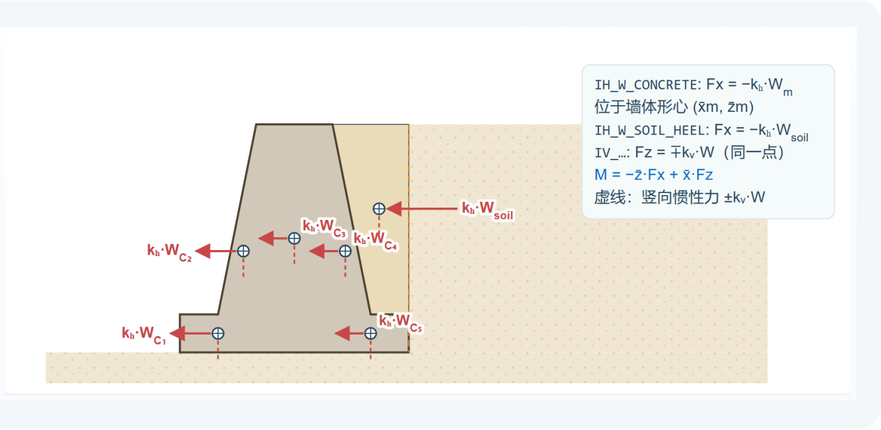
$$IH_s = 0.15(33.75) = 5.062 \ \ (z = 1.889\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(4.95) = 0.743 \ \ (z = 0.758\ \text{m})$$

5 抗滑移（不计墙前抗力）

$$\Sigma H_{drive} = 48.06 + 17.32 + 5.06 + 0.74 = 71.19$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{84.81}{71.19} = \mathbf{1.191} \ \geq 1.1 \ \checkmark$$



解答 (3/3)

解答

6 抗倾覆与合力位置

$$M_{o,E} = P_{AE}\bar{z} + \Sigma IH\, z = 61.90 + 21.18 + 9.56 + 0.56 = 93.20$$

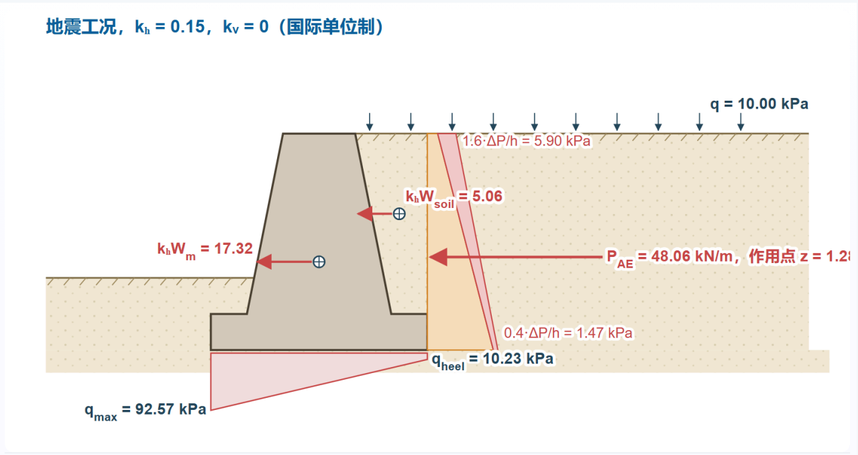
$$FS_{o,E} = \frac{262.74}{93.20} = \mathbf{2.819} \;\geq 1.1$$

$$x_R = \frac{262.74 - 93.20}{154.2} = 1.099 \text{ m} \qquad e = \mathbf{0.401} \text{ m}$$

7 基底压力（|e| = 0.401 m ≤ B/6 = 0.50 m：全接触）

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.401)}{3}\right) = \mathbf{92.57} \text{ kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{10.23} \text{ kPa}$$



地震作用下FS_s = **1.19**，FS_o = **2.82**，e = **0.401 m**，q_{max} = **92.6 kPa**；地震使FS_s由2.62降至1.19，使e由0.068增至0.401 m：**抗滑移**和**偏心距**为控制性验算。

在GeoTerva中验算解答 ↗

验算结束之处

理论

这些验算将墙及其基础视为**单一刚性块体**：即墙的**外部稳定性**。石砌或素混凝土重力式墙也可能在其**内部**发生破坏（尤其是高大或细长截面、干砌石墙、砂浆强度较低以及地震情况下）；这些验算依据本模块给出的作用效应进行。

无黏性填土($c' = 0$)；本模块不含双土层或分层填土。填土表面为水平面或单一坡度。

基底摩擦$\mu_b = \tan \delta_b$（砌体/混凝土一般取$2/3\varphi'–\varphi'$）；不采用黏着力。墙前被动抗力全部计入抗滑摩擦部分，不用于抗倾覆和地基承载力计算。

计算按墙长1.00 m进行；条形和点状地面超载的侧向压力按Boussinesq解（刚性墙）叠加。

其他影响（水力稳定性、渗流、整体稳定性、沉降）不在本模块范围之内。

小结

要点回顾

隔离体：墙及随其一起运动的土体；压力作用于**底板后缘的竖直平面上**($\delta = \beta$)；统一符号规定：$M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$，倾覆为正

重量：$W_i = \gamma_m A_i$，$\bar{x} = \Sigma W_i \bar{x}_i / \Sigma W_i$；土块与墙前填土也随墙一起运动；墙踵上方的超载($Q_{heel}$)不参与任何验算

主动：$P_A = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2$ $(h/3)$，$P_Q = K_a q h$ $(h/2)$；对倾斜填土取$K_a\beta$（竖直面上Rankine = Coulomb）；**被动**：$K_{mob} = wK_p + (1 - w)K_0$，仅用于抗滑移验算

抗滑移$FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive}$；**抗倾覆**$FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$（墙趾）；**地基承载力**：$x_R = -\Sigma M/V$，$e = B/2 - x_R$，$q = V/B(1 \pm 6e/B)$，若$|e| > B/6$，则$q_{max} = 2V/(3x_R)$

水：重量按γ_{sat}计算，U_{rear}另列一项；扬压力在墙趾处为u_{toe}、墙踵处为u_{heel}，呈线性分布：使N减小，并增加倾覆力矩

地震：$\theta = \tan^{-1} k_h/(1 - k_v)$；$P_{AE} = (\frac{1}{2}\gamma h^2 + qh)K_{AE}$；$\Delta P_{AE}$作用于0.6h处；$k_h W$为惯性力；墙前被动土压力的计入系数$\eta_{p,E}$（默认0）

参考文献

本模块采用的三种理论以及手册中所遵循的封闭解公式表达（Ka, Kp, KAE）来源。未衍生自这些文献的内容均为本模块的基本假定，并在正文中予以明确说明。

Coulomb C.A. (1776) Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7, Paris.

Das B.M. (2016) Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

Mononobe N., Matsuo H. (1929) On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo, 9:177–185.

Okabe S. (1926) General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers 12(1).

Rankine W.J.M. (1857) On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 147:9–27.

注

全部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。模块页面中的分步算例也是这面墙（H = 3 m的石砌挡土墙，q = 10 kPa，k_h = 0.15）。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

在GeoTerva中输入自己挡土墙的截面、填土、超载、水和地震系数；模块同时给出受力明细汇总表、三项验算以及基底应力。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。

如需在课堂教学中使用：info@geoterva.com