GeoTerva

岩土工程课程讲义 · 挡土墙

悬臂式挡土墙

讲义：钢筋混凝土悬臂式挡土墙的外部稳定性（抗滑移、抗倾覆、地基承载力）以及立壁、墙趾板和墙踵板的截面内力；墙踵块体、土压力、水、地震、凸榫（抗滑键）和减载平台（卸荷板）；每个主题均配有工程算例。

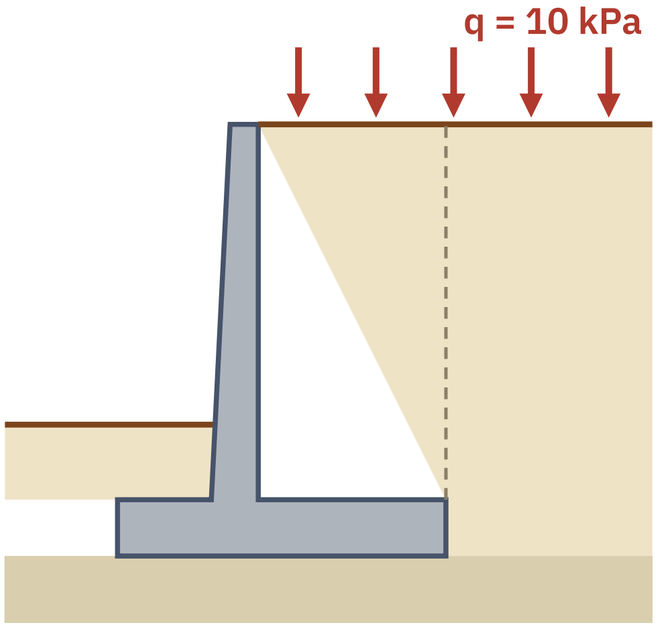
立壁 + 底板

抗滑移 · 抗倾覆 · 地基承载力

立壁、墙趾、墙踵截面内力

凸榫 · 减载平台

水与地震



本讲内容

悬臂式挡土墙：**立壁 + 底板**（墙趾L_t，墙踵L_h），由各组成部分求其重量和重心

墙踵上方的**土块**和基础后缘的**竖向压力面**；主动推力、超载及前部被动抗力

识读**抗滑移、抗倾覆、偏心距和地基承载力**验算以及地震工况（Mononobe–Okabe + 惯性力）

求出墙趾板和墙踵板在**基底反力**作用下、**立壁**在推力作用下的剪力和弯矩

理解**凸榫（抗滑键）**和**减载平台（卸荷板）**如何提高安全性，以及水和扬压力的影响

了解验算不满足的断面应**如何修改**（地震作用下的抗滑移与偏心距）

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

所有量均按墙体每1.00 m长度计。算例：立壁H = 4.0 m，底板厚0.60 m，B = 3.5 m，钢筋混凝土挡土墙(24 kN/m³)，q = 10 kPa。

立壁（墙身）、底板与墙趾结构

理论

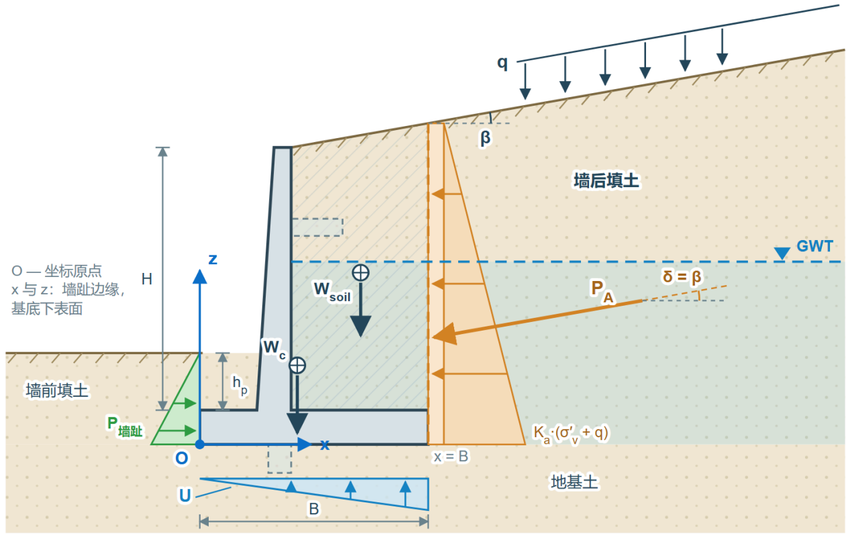
悬臂式挡土墙的抗滑移和抗倾覆还依靠**底板上方的土体重量**：起抗力作用的不仅有墙自身的重量，墙踵上方的土块亦然。模块：

$$B = L_t + t_b + L_h \qquad z_T = t_f + H$$

立壁：高度H；顶部厚度t_t，底部厚度t_b（墙背竖直，墙面倾斜）；**底板**：厚度t_f，墙趾L_t，墙踵L_h；混凝土24 kN/m³。

土体：无黏性填土($c' = 0$)，水平或倾斜的地表，超载q，地下水，以及前侧底板上高度为h_p的填土。

选项：凸榫（抗滑键）、减载平台（卸荷板）；**验算**：抗滑移、抗倾覆、偏心距、地基承载力；**截面内力**：立壁（墙身）、墙趾、墙踵、减载平台、凸榫。



底板+立壁矩形+立壁三角形

理论

墙体重量分为三个简单图形（面积和重心已知）；其对墙趾的力矩为抗力矩：

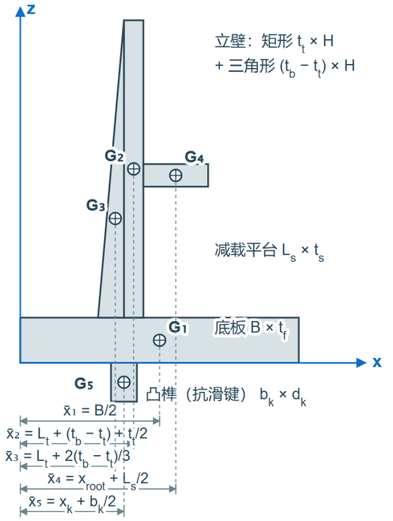
$$W_i = \gamma_c A_i \qquad W_c = \sum W_i \qquad \bar{x}_c = \frac{\sum W_i \bar{x}_i}{W_c} \qquad \bar{z}_c = \frac{\sum W_i \bar{z}_i}{W_c}$$

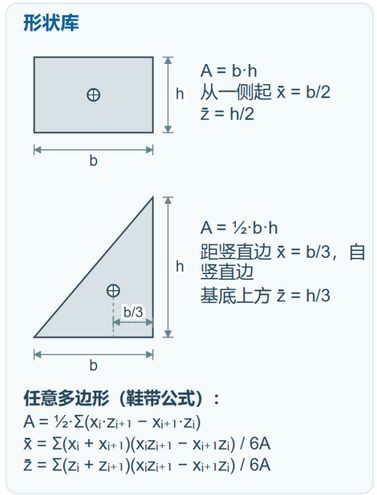
底板：A = B t_f，$\bar{x}$ = B/2，$\bar{z}$ = t_f/2。

立壁矩形（紧靠墙背）：A = t_tH，$\bar{x}$ = L_t + (t_b − t_t) + t_t/2，$\bar{z}$ = t_f + H/2。

立壁三角形（前侧斜面）：A = ½(t_b − t_t)H，$\bar{x}$ = L_t + 2(t_b − t_t)/3，$\bar{z}$ = t_f + H/3。

在受力明细汇总表中，墙体仅为一项：F_z = −W_c，作用于$\bar{x}_c$处；$\bar{z}_c$仅用于水平惯性力（地震）。





题目

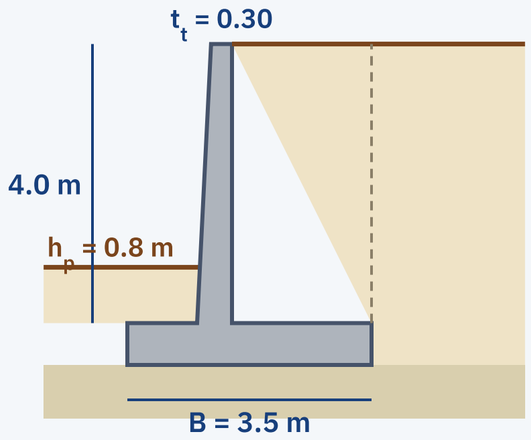
算例

求

三个部分的面积、重量和位置；W_C、$\bar{x}_C$、$\bar{z}_C$。

已知条件

剖面	$H = 4.0$ m; $t_t = 0.30$, $t_b = 0.50$ m; $L_t = 1.00$, $L_h = 2.00$ m; $t_f = 0.60$ m (B = 3.5 m)
材料	**钢筋混凝土：** $\gamma_c = 24$ kN/m^3



解答

解答

1 各分块（例如三角形：A = ½(0.50 − 0.30)(4.0) = 0.40；$\bar{x}$ = 1.00 + 2(0.20)/3 = 1.133；$\bar{z}$ = 0.60 + 4.0/3 = 1.933）

部分	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 24A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
底板	2.100	1.750	0.300	50.40	88.20	15.12
桩身矩形	1.200	1.350	2.600	28.80	38.88	74.88
桩身三角形	0.400	1.133	1.933	9.60	10.88	18.56
合计				**88.80**	**137.96**	**108.56**

2 形心

$$\bar{x}_c = \frac{137.96}{88.80} = \mathbf{1.554}\ \text{m} \qquad \bar{z}_c = \frac{108.56}{88.80} = \mathbf{1.223}\ \text{m}$$

墙体自重**W_c = 88.80 kN/m**，距墙趾$\bar{x}_c$ = 1.55 m，距底面$\bar{z}_c$ = 1.22 m；其力矩M = −137.96 kN·m/m（抗力矩）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

与墙一起移动的土体及压力平面

理论

底板墙踵上方的土体不能相对于底板滑动：墙体移动时，土体**随其一起**移动。破裂面不是从立壁背面开始，而是自**墙踵后缘**开始。隔离体 = 墙 + 墙踵土块；其外侧面为x = B处的**竖向压力作用面**（土对土：无墙面摩擦，土压力倾角δ = β）：

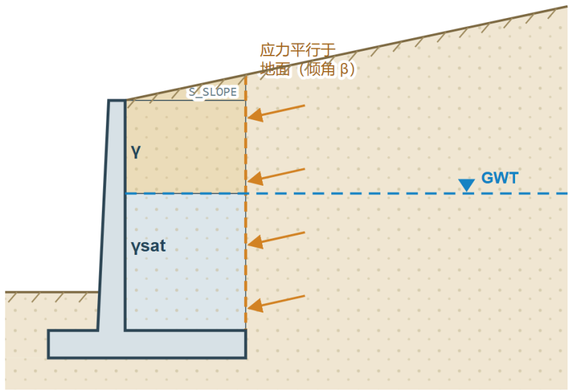
墙踵土块的重量$W_s = \gamma L_h H$（划分为湿润区和饱和区；由于采用总应力计算，水下取γ_{sat}，水的推力单独列项）。

墙趾处底板上方的填土(h_p)随底板一起运动：竖向荷载为W_{toe}。

墙踵上方的超载$Q_{heel} = qL_h$虽属有利作用，但因其可能不存在，故**不计入任何验算**；其侧向作用则始终计入。

压力作用面的高度$h = t_f + H$（含地表抬高）。

墙踵边缘处的竖直平面（所有方法）



题目

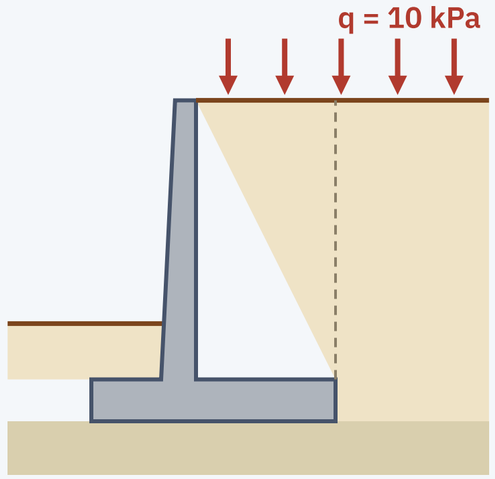
算例

已知条件

墙	**算例1中的剖面；前侧填土高度$h_p = 0.80$ m（底板以上）**
土	**干填土：$\gamma = 18$ kN/m^3，$\varphi' = 30°$；地表水平**
超载	$q = 10$ **kPa**

求

墙踵块体的**重量和位置**；**墙前填土**；Q_{heel}；总竖向荷载N。



解答

解答

1 墙踵块体（L_h × H的矩形，位于立壁背后）

$$A_s = L_h H = 2.00(4.0) = 8.0\ \text{m}^2 \qquad W_s = 18(8.0) = \mathbf{144.0}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{x}_s = L_t + t_b + \frac{L_h}{2} = 2.50\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = t_f + \frac{H}{2} = 2.60\ \text{m}$$

2 墙前填土（梯形：底部L_t = 1.00，顶部$x_{toe}(h_p)$ = 1.04）与超载

$$A_{toe} = \frac{1}{2}(1.00 + 1.04)(0.80) = 0.816\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.816) = \mathbf{14.69}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0.510)$$

$$Q_{heel} = qL_h = 10(2.00) = \mathbf{20.0}\ \text{kN/m} \quad \text{（不参与任何验算）}$$

N = W_c + W_s + W_{toe} = 88.80 + 144.00 + 14.69 = **247.49 kN/m**；Q_{heel} = 20.00 kN/m是表中“未使用”的项。

在GeoTerva中验算解答 ↗

竖直平面内的推力、超载与组合被动土压力

理论

压力作用面位于高度h = t_f + H处。由于填土水平且δ = β = 0，故Rankine = Coulomb：

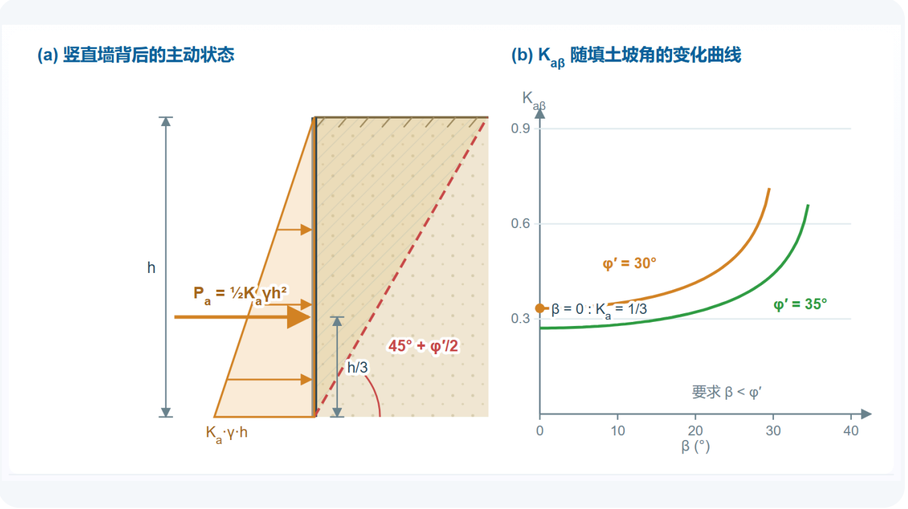
$$K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ (h/2)$$

填土表面倾斜时，作用于该平面上的应力平行于表面($K_{a\beta}$)，推力的竖向分量为抗力。前部抗力（仅在抗滑移验算中计入）：

$$K_{mob} = wK_p + (1-w)K_0 \qquad P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_p^2\ (D_p/3) \qquad D_p = t_f + h_p$$

w = 1/3为默认值；若前部土体可能被挖除，则取h_p = 0，或通过h_{ignore}折减其计入的抗力；**抗倾覆和地基承载力验算中不计入前部抗力。**

详细内容（Rankine/Coulomb等价性、K_{mob}、h_{ignore}）见重力式挡土墙讲义。



题目

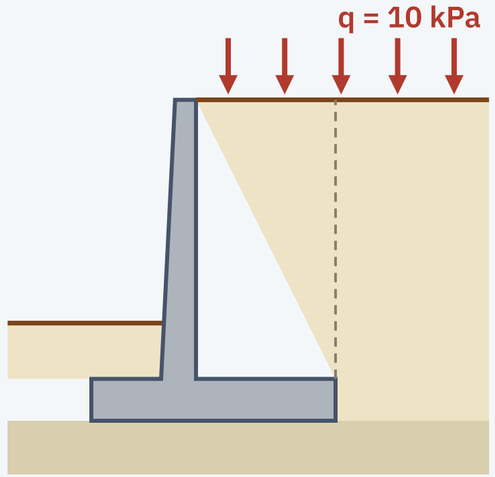
算例

求

P_A、P_Q、P_P以及对墙趾的倾覆力矩。

已知条件

	算例1–2中的挡土墙：h = t_f + H = 4.60 m；
墙与土体	$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$；**水平地表：** $q = 10$ **kPa**
墙前土体	$D_p = t_f + h_p = 1.40$ **m; w = 1/3**



解答

解答

1 K_a = 0.3333；各推力(h = 4.60 m)

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(21.16) = \mathbf{63.48}\ \text{kN/m}\quad (z = 1.533\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(4.6) = \mathbf{15.33}\ \text{kN/m}\quad (z = 2.30\ \text{m})$$

2 墙前抗力：K_{mob} = ⅓(3.00) + ⅔(0.50) = 1.333

$$P_P = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1.40)^2 = \mathbf{23.52}\ \text{kN/m}\quad (z = D_p/3 = 0.467\ \text{m})$$

3 水平推力与倾覆力矩（对墙趾取矩）

$$\Sigma H_{drive} = 63.48 + 15.33 = \mathbf{78.81}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 63.48(1.533) + 15.33(2.30) = 97.34 + 35.27 = \mathbf{132.60}\ \text{kN·m/m}$$

在GeoTerva中验算解答 ↗

由同一受力明细汇总表进行的四项验算

理论

$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

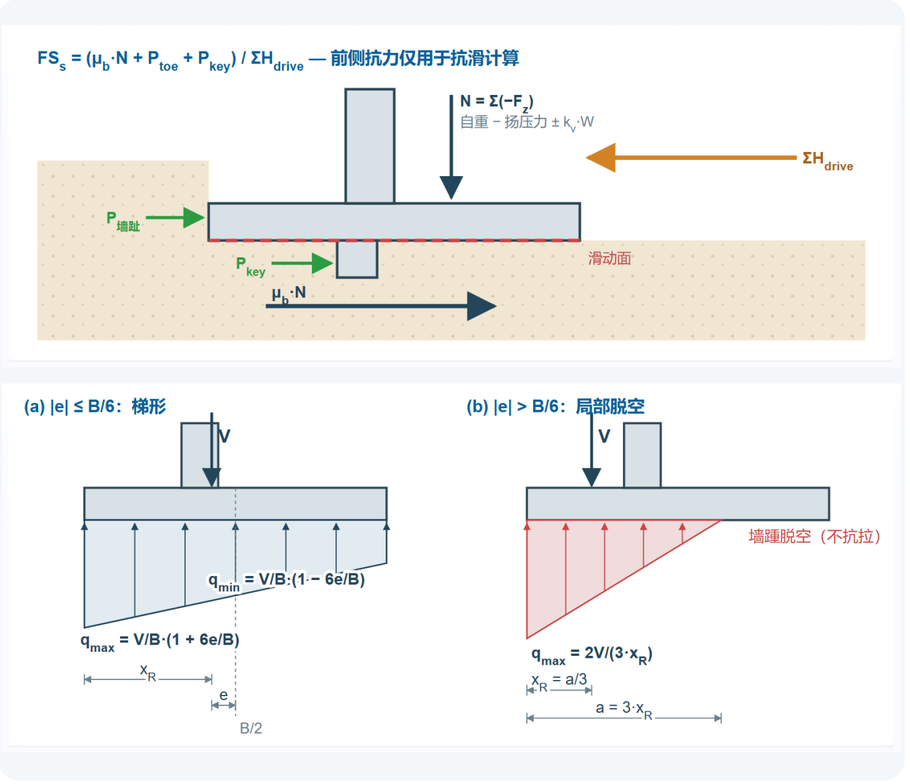
$$|e| \le \frac{B}{6}: \quad q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$

抗滑移：N为有效法向力（不含Q_{heel}，已扣除扬压力）；$\mu_b = \tan \delta_b$；无黏着力。

抗倾覆：绕墙趾（底板前下角）取矩；各项的$-zF_x$与xF_z分量按各自的符号计入；不计入前部抗力。

地基承载力：若合力作用于基底中间三分之一范围内($|e| \le B/6$)，则基底与土完全接触；否则土体不能承受拉力，仅长度$a = 3x_R$的范围保持接触。

要求：静力工况下$FS_s \ge 1.5$，$FS_o \ge 2.0$；地震工况下不小于1.1；$q_{max} \le q_{all}$。



题目

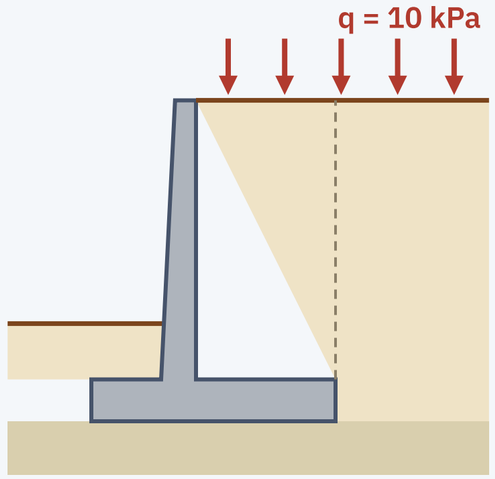
算例

已知条件

墙体与荷载	**算例1–3中的墙：** $B = 3.5$ m；$W_c = 88.8$, $W_s = 144.0$, $W_{toe} = 14.69$ kN/m；$P_A = 63.48$, $P_Q = 15.33$ kN/m
阻力	$\mu_b = 0.55$; $P_P = 23.52$ **kN/m**; $q_{all} = 200$ **kPa**
所需	$FS_s \geq 1.5$, $FS_o \geq 2.0$；**基底完全接触**

求

FS_s、FS_o、x_R、e、q_{max}、q_{min}及各项结果。



解答 (1/3)

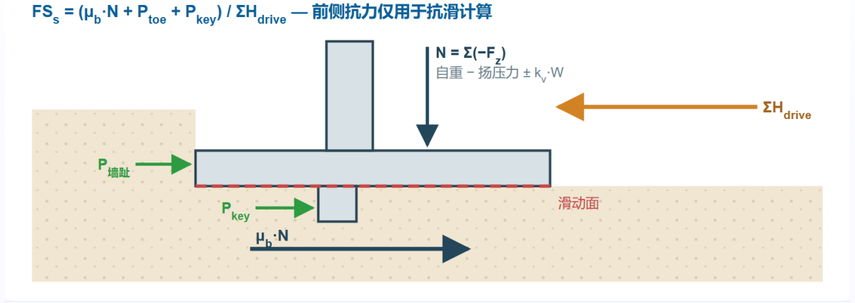
解答

1 基底摩擦力($N = W_C + W_S + W_{toe}$)

$$N = 88.8 + 144.0 + 14.69 = \mathbf{247.49}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(247.49) = 136.12\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{136.12 + 23.52}{78.81} = \mathbf{2.026}\ \geq 1.5\ \checkmark$$



解答 (2/3)

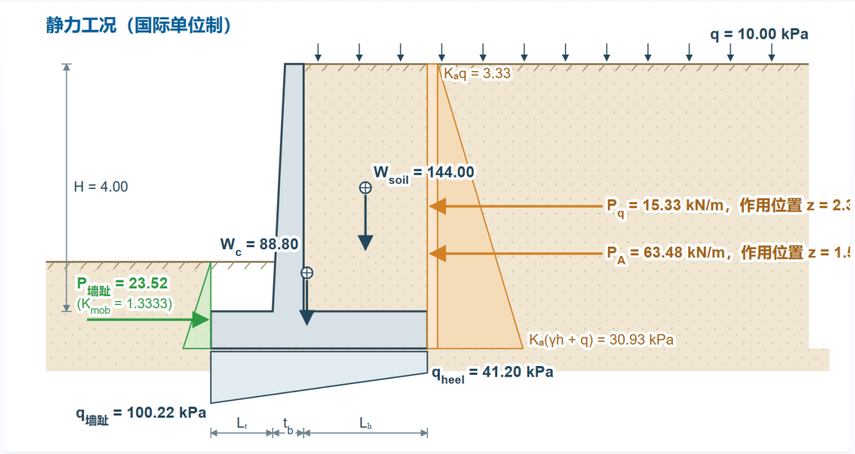
解答

2 倾覆力矩（推力）和抗力矩（墙体、墙踵块、墙前填土）

$$M_o = 97.34 + 35.27 = \mathbf{132.60}$$

$$M_r = 137.96 + 360.00 + 7.49 = \mathbf{505.45}\ \text{kN·m/m}$$

$$FS_o = \frac{505.45}{132.60} = \mathbf{3.812}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



解答 (3/3)

解答

3 合力位置与偏心距

$$\Sigma M = M_o - M_r = -372.85$$

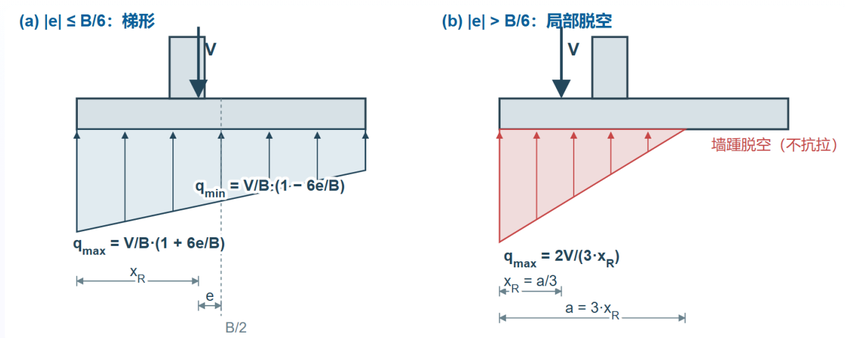
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{372.85}{247.49} = \mathbf{1.5065}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.2435}\ \text{m} \le \frac{B}{6} = 0.583\ \checkmark$$

4 基底应力（完全接触）

$$q_{max} = \frac{247.49}{3.5}\left(1 + \frac{6(0.2435)}{3.5}\right) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{41.20}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.03**，FS_o = **3.81**，e = 0.243 m，q_{max} = **100.2 kPa** ≤ 200，q_{min} = 41.2 kPa > 0：**静力工况下各项验算均满足。**

在GeoTerva中验算解答 ↗

Mononobe–Okabe推力及惯性力的叠加

理论

地震工况下，取**Mononobe–Okabe**土压力P_{AE}代替静力土压力$P_A + P_Q$；墙体、墙踵块体和墙前填土的惯性力k_hW也在各自重心处向前推动（若$k_v > 0$，则两个方向均需计算）。竖直墙背、水平填土时：

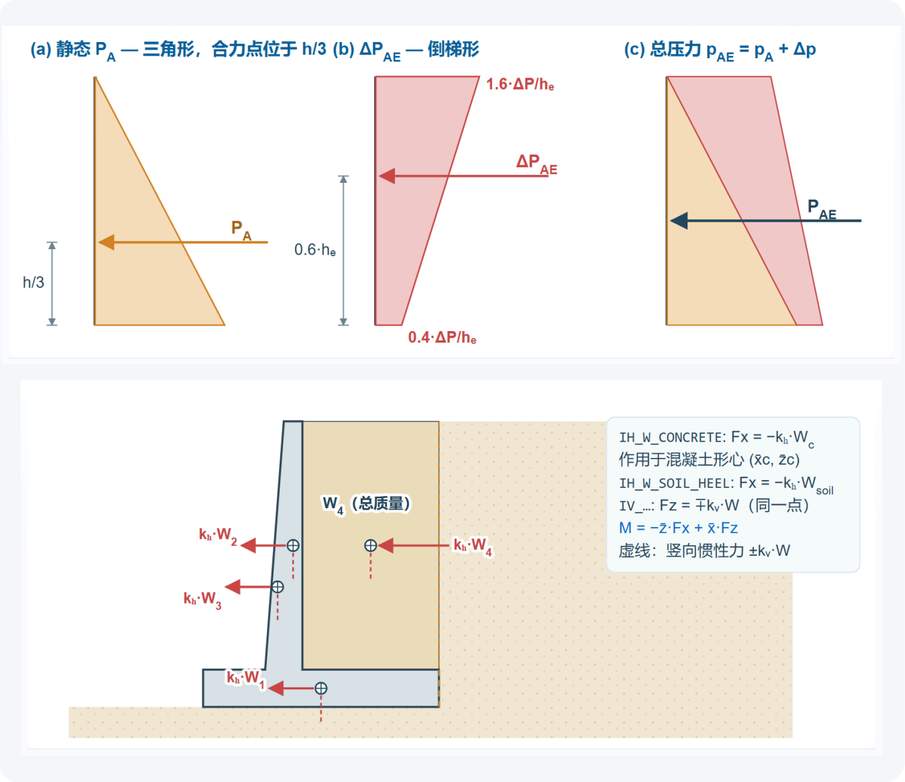
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'-\theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2}$$

$$P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE} \qquad \Delta P_{AE} = P_{AE} - (P_A + P_Q)\ (0.6h)$$

ΔP_{AE}按倒梯形分布（顶部$1.6\Delta P/h$，底部$0.4\Delta P/h$）；静力部分保持其形状。有水时，加上动水压力$(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$。

计入的墙前被动抗力乘以$\eta_{p,E}$；**默认值为0**（抗滑移安全性仅来自底面摩擦）。

若合力作用点落在底面中间三分之一范围之外，则出现**部分接触**（$q_{max} = 2V/(3x_R)$）。



题目

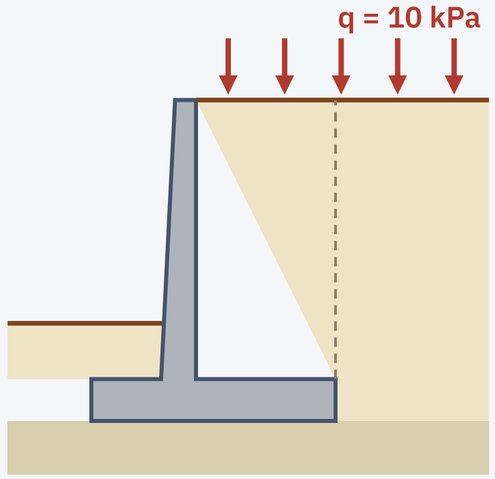
算例

已知条件

墙与土体	**算例1–4中的挡土墙（静力FS_s = 2.03；FS_o = 3.81）**
地震	$k_h = 0.15$，$k_v = 0$；$\eta_{p,E} = 0$；**所需** $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$；**基底应完全接触(|e| ≤ B/6)**

求

K_{AE}、P_{AE}、$\bar{z}$、惯性力；FS_s、FS_o、e、q_{max}以及各项验算的结果。



解答 (1/4)

解答

1 地震角与地震系数

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

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

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

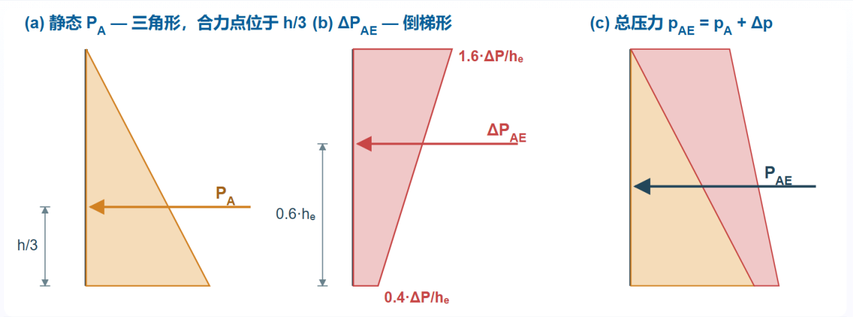
2 动推力（静力P_A + P_Q = 78.81 kN/m）及其作用位置

$$P_{AE} = (190.44 + 46.0)(0.4329) = \mathbf{102.36}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 102.36 - 78.81 = 23.55\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

$$\bar{z}_{AE} = [63.48(1.533) + 15.33(2.30) + 23.55(2.76)]/102.36$$

$$= \mathbf{1.930}\ \text{m}$$



解答 (2/4)

解答

3 惯性力$k_h W$和抗滑移（不计墙前被动抗力）

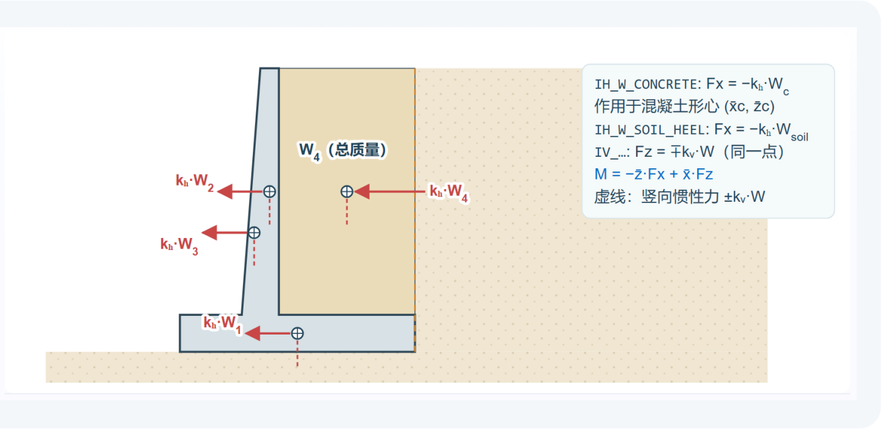
$$IH_c = 0.15(88.8) = 13.32 \quad (z = 1.223\ \text{m})$$

$$IH_s = 0.15(144.0) = 21.60 \quad (z = 2.60\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(14.69) = 2.20\ \text{kN/m}$$

$$\Sigma H_{drive} = 102.36 + 13.32 + 21.60 + 2.20 = 139.49$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{136.12}{139.49} = \mathbf{0.976} \ < 1.1 \quad ✗$$



解答 (3/4)

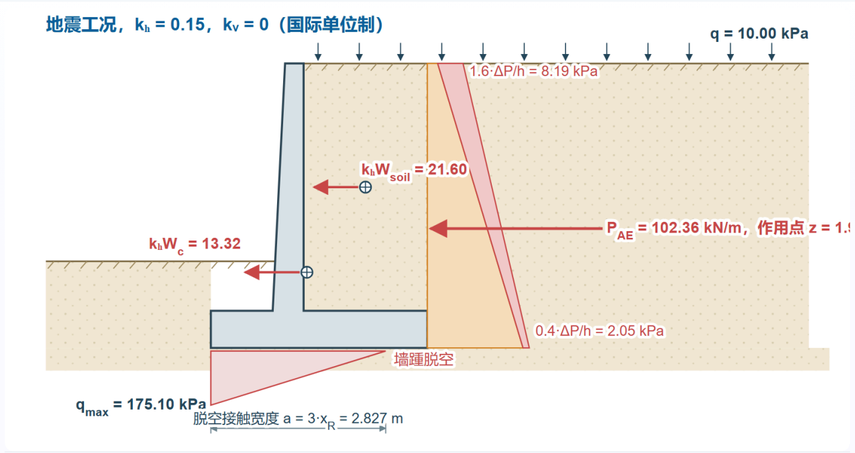
解答

4 抗倾覆（力臂：$\bar{z}_{AE}$ = 1.930；z_c = 1.223；2.60；1.003 m）

$$M_{o,E} = 197.60 + 16.28 + 56.16 + 2.21 = 272.26$$

$$FS_{o,E} = \frac{505.45}{272.26} = \mathbf{1.857} \;\geq 1.1 \;\checkmark$$

$$x_R = \frac{505.45 - 272.26}{247.5} = 0.942 \text{ m}$$



解答 (4/4)

解答

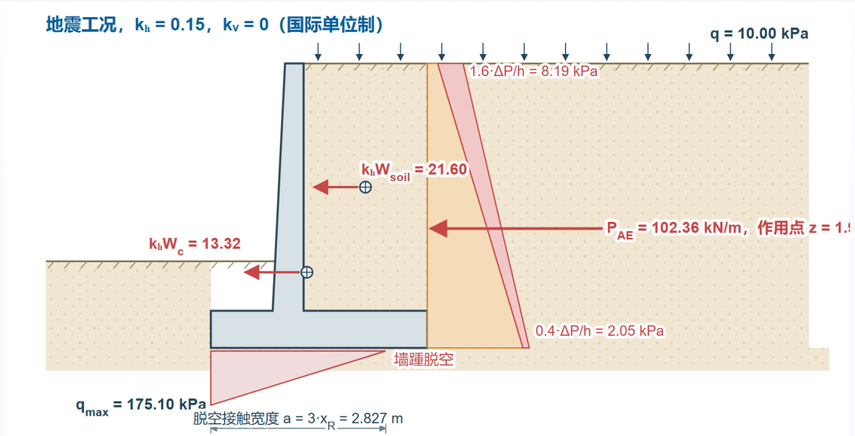
5 偏心距与部分接触

$$e = \frac{B}{2} - x_R = 1.750 - 0.942 = \mathbf{0.808}\ \text{m} > \frac{B}{6} = 0.583 \quad ✗$$

$$a = 3x_R = 2.827\ \text{m} \quad \text{(仅此长度接触)}$$

$$q_{max} = \frac{2V}{a} = \frac{2(247.5)}{2.827} = \mathbf{175.1}\ \text{kPa} \qquad q_{min} = 0$$

地震作用下，**抗滑移(FS_s = 0.98 < 1.1)**和**偏心距(e = 0.81 m > B/6)**均不满足要求；抗倾覆(FS_o = 1.86)及q_{max} = 175.1 kPa满足要求。截面**须修改**（算例6）。



在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

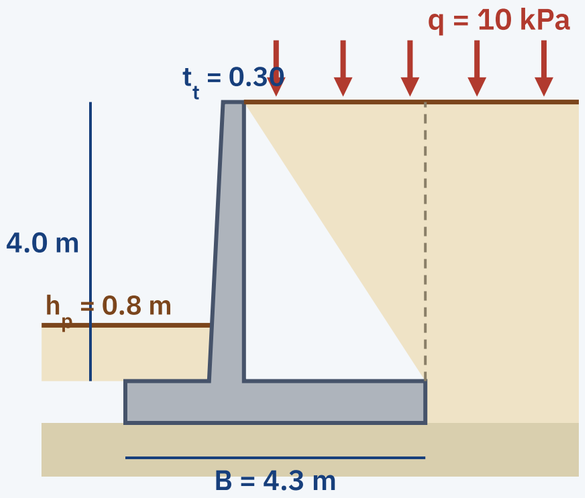
算例

求

采用新截面时的静力和地震工况FS_s、FS_o、e、q_{max}；截面是否满足要求？

已知条件

问题	**算例5中，地震工况下FS_s = 0.98 < 1.1，且e = 0.81 m > B/6 = 0.58 m**
建议修改	**墙趾和墙踵加长：$L_t = 1.20$ m，$L_h = 2.60$ m（B = 4.30 m）；其余尺寸及土层不变**



解答

解答

1 加载相同，采用新的几何尺寸（模块：B = 4.30 m，W_c = 100.3 kN/m，N = 305.1 kN/m）

	现状(B = 3.5 m)	修订后(B = 4.3 m)	所需
静力FS_s	2.026	2.427	≥ 1.5
静力FS_o	3.812	5.753	≥ 2.0
静力e (m) / q_{max} (kPa)	0.243 / 100.2	0.084 / 79.3	|e| ≤ B/6
地震FS_s	0.976 ✗	1.133 ✓	≥ 1.1
地震FS_o	1.857	2.630	≥ 1.1
地震e (m) / 接触	0.808 / 部分 ✗	0.600 / 完全 ✓ (B/6 = 0.717)	|e| ≤ B/6
地震作用下的q_{max} (kPa)	175.1	130.4	≤ 200

加长墙趾和墙踵使N由247增至305 kN/m，摩阻力随之增大：地震工况下**FS_s = 1.13 ≥ 1.1**，合力作用点落入底板中间三分之一范围内(e = 0.60 ≤ B/6 = 0.717)：**所有验算均满足要求**。其他方案：凸榫+$\eta_{p,E}$（算例9），或加宽墙踵。

在GeoTerva中验算解答 ↗

立壁、墙趾和墙踵：危险截面

理论

外部稳定性得到满足后，确定各构件的**截面内力**。**立壁**是受墙背土压力作用、根部（位于底板上方）固结的悬臂梁：

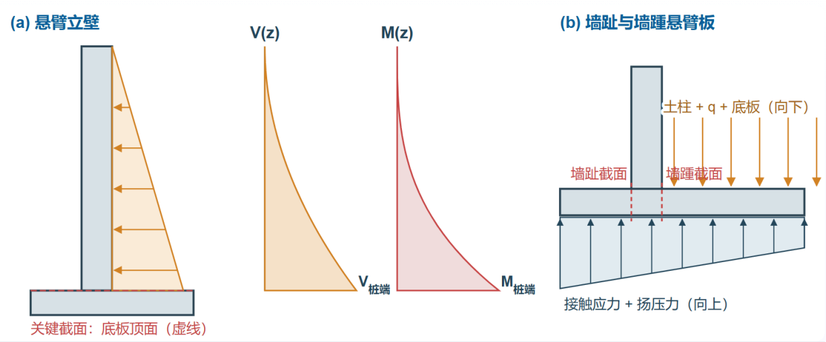
$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) \qquad M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right)$$

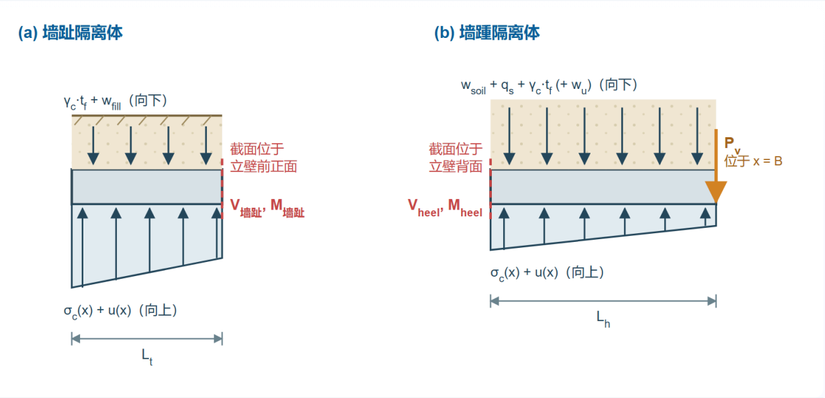
地震工况下：$V_E = V + \Delta P_{AE,st} + k_h W_{body}$，$M_E = M + \Delta P_{AE,st}(0.6H) + k_h W_{body}\bar{z}$（$\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH) - V_{st}$）。**墙趾和墙踵**是在立壁侧面处固接的板；荷载 = 基底应力 − 板及其上土体的重量：

$$V_{toe} = L_t\frac{q_0 + q_L}{2} - w_{toe}L_t \qquad M_{toe} = \frac{L_t^2(2q_0 + q_L)}{6} - \frac{w_{toe}L_t^2}{2}$$

$$V_{heel} = w_h L_h - L_h\frac{q_a + q_b}{2} \qquad M_{heel} = \frac{w_h L_h^2}{2} - \frac{L_h^2(q_a + 2q_b)}{6}$$

$w_{toe} = \gamma_c t_f + \gamma h_p$；$w_h = \gamma H + q + \gamma_c t_f$；$q_0$、$q_L$、$q_a$、$q_b$为各控制截面处的基底应力（线性分布）。





题目

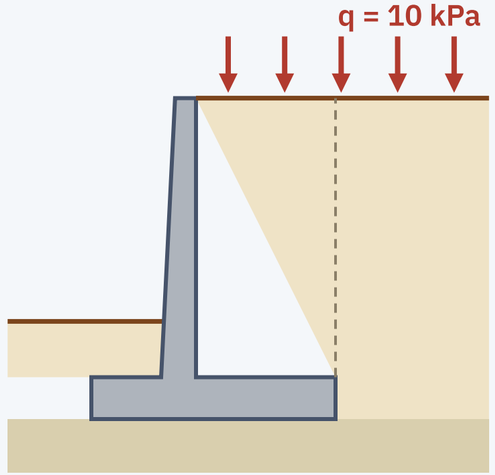
算例

求

立壁底部的V和M：静力工况和地震工况。

已知条件

墙与土体	**算例1–5中的墙：** $H = 4.0$ m；$\gamma = 18$ kN/m^3，$\varphi' = 30°$；$q = 10$ **kPa**；**立壁：** $t_t = 0.30$，$t_b = 0.50$ m
地震	$k_h = 0.15$ $(K_{AE} = 0.4329)$



解答 (1/2)

解答

1 静力（墙身底部，H = 4.0 m）

$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) = 0.3333(144 + 40) = \mathbf{61.33}\ \text{kN/m}$$

$$M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right) = 0.3333(192 + 80) = \mathbf{90.67}\ \text{kN·m/m}$$

解答 (2/2)

解答

2 地震：地震增量与墙身惯性力

$$\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(184) - V_{st} = 79.66 - 61.33 = 18.33 \text{ kN/m} \quad (0.6H = 2.40 \text{ m})$$

$$k_h W_{st} = 0.15(24)(1.2 + 0.4) = 5.76 \text{ kN/m}; \quad M_i = 10.56 \text{ kN·m/m}$$

3 总地震作用

$$V_E = 61.33 + 18.33 + 5.76 = \mathbf{85.42} \text{ kN/m}$$

$$M_E = 90.67 + 18.33(2.40) + 10.56 = \mathbf{145.21} \text{ kN·m/m}$$

立壁底部静力工况下**V = 61.33 kN/m**，**M = 90.67 kN·m/m**；地震工况下**V_E = 85.42**，**M_E = 145.21**（弯矩增大60%）。钢筋混凝土设计按这些作用效应进行。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

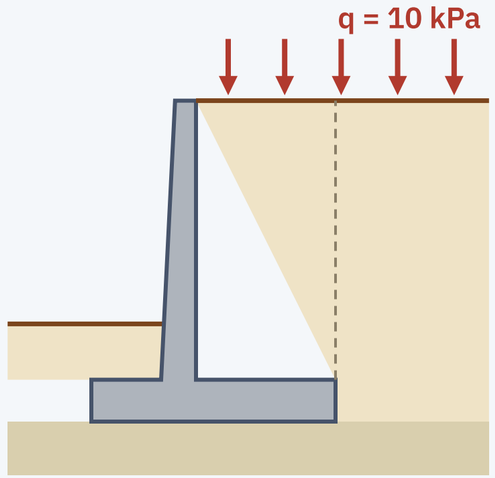
算例

求

墙趾板和墙踵板在立壁壁面处的V和M值（静力工况）；地震工况下的数值。

已知条件

基底应力（算例4）	$q_{max} = 100.22$（墙趾），$q_{min} = 41.20$ kPa（墙踵端）；$B = 3.5$ m
板荷载	$L_t = 1.00$，$L_h = 2.00$ m，$t_b = 0.50$ m，$t_f = 0.60$ m；$\gamma_c = 24$；墙前填土$h_p = 0.8$ m



解答 (1/2)

解答

1 控制截面处的基底应力（线性分布）：墙趾处为q_0，立壁面处为q_L和q_a，墙踵端为q_b

$$q_0 = 100.22 \qquad q_L = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t}{B} = 83.36$$

$$q_a = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t + t_b}{B} = 74.93 \qquad q_b = 41.20 \text{ kPa}$$

2 墙趾(w_{toe} = 24(0.60) + 18(0.80) = 28.8 kPa)

$$V_{toe} = 1.00\frac{100.22 + 83.36}{2} - 28.8(1.00) = \mathbf{62.99} \text{ kN/m}$$

$$M_{toe} = \frac{1^2(2\cdot 100.22 + 83.36)}{6} - \frac{28.8(1)^2}{2} = \mathbf{32.90} \text{ kN·m/m}$$

解答 (2/2)

解答

3 墙踵（w_h = 18(4.0) + 10 + 24(0.60) = 96.4 kPa；荷载向下，基底应力向上）

$$V_{heel} = 96.4(2.00) - 2.00\frac{74.93+41.20}{2} = \mathbf{76.67}\ \text{kN/m}$$

$$M_{heel} = \frac{96.4(2)^2}{2} - \frac{2^2(74.93+2\cdot 41.20)}{6} = \mathbf{87.92}\ \text{kN·m/m}$$

墙趾：**V = 62.99，M = 32.90**；墙踵：**V = 76.67，M = 87.92**（墙趾向上弯曲，墙踵向下弯曲）。地震情况下（部分接触，模块结果）：墙趾V = 115.33，M = 62.83；墙踵V = 138.28，M = 168.69：**墙踵弯矩增大为1.9倍。**

在GeoTerva中验算解答 ↗

简化凸榫法

理论

若底板摩擦力不足，则在底板之下、原状土中浇筑**凸榫**；凸榫前侧面将其前方土体的被动抗力加到滑动面上。该方法有意保持简单：榫面取**已发挥的**压力$K_{mob}\sigma'_v$，在抗滑移验算中全额计入；而凸榫的**截面内力**则由**总的全被动**压力图确定：

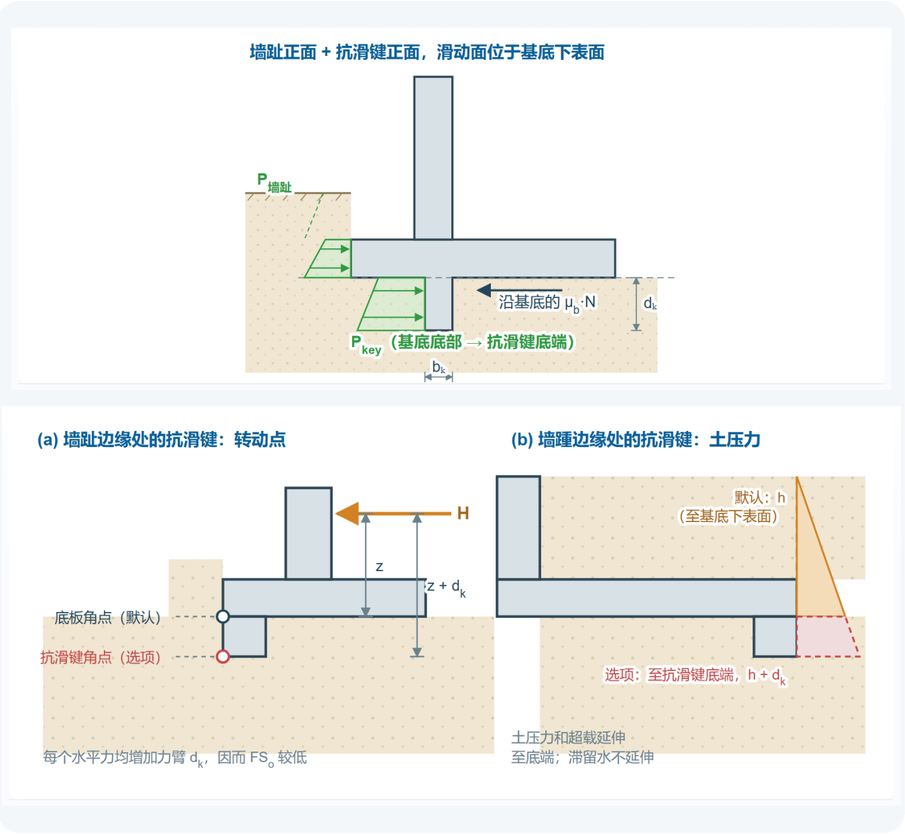
$$P_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p_{top} + p_{bot}\right) d_k \quad (p = K_{mob}\sigma'_v) \qquad V_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p^g_{top} + p^g_{bot}\right) d_k \quad (p^g = K_p\sigma'_v)$$

$$M_{key} = p^g_{top}\frac{d_k^2}{2} + \left(p^g_{bot} - p^g_{top}\right)\frac{d_k^2}{3}$$

凸榫自重（计入N_{eff}）在静力和地震两种工况中均计入。被动抗力**仅用于抗滑移验算**；地震工况下二者均乘以$\eta_{p,E}$（默认0，即不计入）。

转动中心：对于位于墙趾边缘的凸榫，倾覆支点可选底板前端下角（默认）或凸榫前端下角；对于位于墙踵边缘的凸榫，主动土压力可延伸至凸榫端部。

每种情况均报告$\Delta FS = P_{key}/\Sigma H_{drive}$。



题目

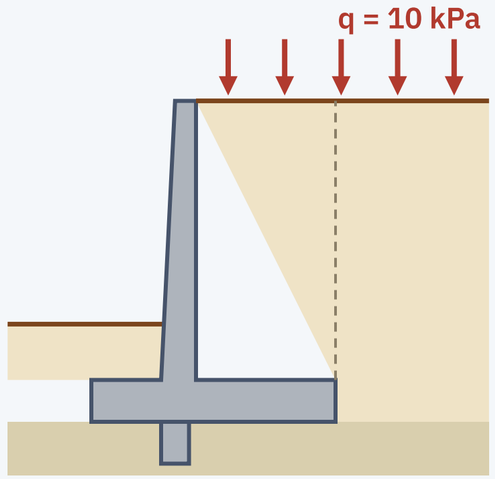
算例

已知条件

墙	**算例1–5中的墙；凸榫靠近墙趾边缘：** $x_k = 1.0$ **m，** $b_k = 0.40$ **m，** $d_k = 0.60$ **m（伸至基底以下）**
土	$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$**；墙前土体** $D_f = 1.4$ **m（坑底以下2.0 m）；** $w = 1/3$ **(** $K_{mob} = 1.333$**)**
地震	$\eta_{p,E} = 0$**（默认）与** $\eta_{p,E} = 0.5$

求

凸榫抗力P_{key}，静力工况的FS_s；凸榫的截面内力V_{key}, M_{key}；地震作用下$\eta_{p,E}$的影响。



解答 (1/2)

解答

1 凸榫面上的组合压力($\sigma'_v = 18\,z$; $z = 1.4 \to 2.0$ m)

$$p_{top} = K_{mob}(25.2) = 33.6 \qquad p_{bot} = K_{mob}(36.0) = 48.0 \text{ kPa}$$

$$P_{key} = \tfrac{1}{2}(33.6 + 48.0)(0.60) = \mathbf{24.48} \text{ kN/m}$$

2 静力抗滑移（凸榫自重5.76 kN/m计入N；墙趾被动土压力计入23.52）

$$N_{eff} = 253.25 \qquad \mu_b N = 139.29 \text{ kN/m}$$

$$FS_s = \frac{139.29 + 23.52 + 24.48}{78.81} = \mathbf{2.376} \;\; (\text{无凸榫 } 2.066)$$

解答 (2/2)

解答

3 凸榫截面内力：总的全被动状态(K_p = 3.00)下，p^g_{top} = 75.6；p^g_{bot} = 108.0 kPa

$$V_{key} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 108.0)(0.60) = \mathbf{55.08}\ \text{kN/m}$$

$$M_{key} = 45.36(0.30) + 9.72(0.40) = \mathbf{17.50}\ \text{kN·m/m}$$

凸榫使静力抗滑移安全系数由2.07提高到**2.38**(ΔFS = 0.31)。地震工况下，$\eta_{p,E}$ = 0时，凸榫**不予计入抗力**；$\eta_{p,E}$ = 0.5时，$FS_{s,E}$由0.98增至**1.16**（≥ 1.1，满足要求），但偏心距(0.80 m > B/6)仍然存在：因此算例6中的几何形状改变更为有效。

在GeoTerva中验算解答 ↗

两侧为静水，基底为线性分布的扬压力

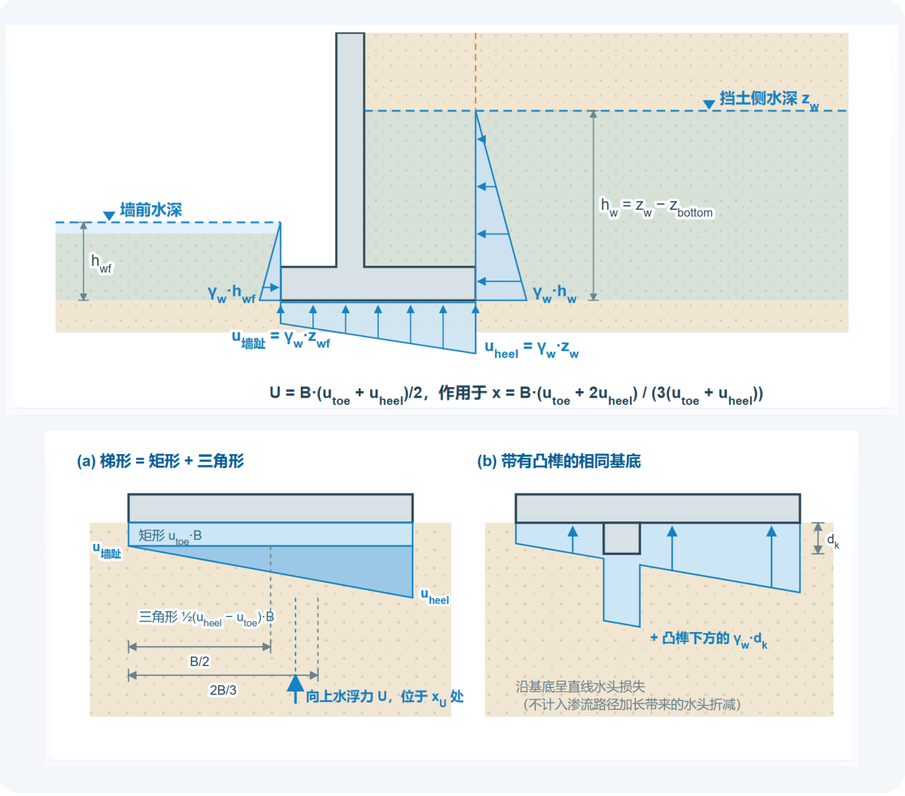
理论

水压力是各向同性的，垂直作用于每个表面。隔离体的三个边界均被水包围：后侧压力面、墙的前表面和底面。其中每一项在受力明细汇总表中各自单列；土体按总应力计重(γ_{sat})：

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \quad (h_w/3) \qquad U = \frac{B(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B(u_{toe} + 2u_{heel})}{3(u_{toe} + u_{heel})}$$

扬压力向上作用：使N（以及摩阻力）减小，并增加倾覆力矩。基底下的压力在墙趾处与墙踵处的水压力之间呈线性变化。

地震情况下，自由孔隙水的动水压力$(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ $(0.4h_w)$须另外叠加。



题目

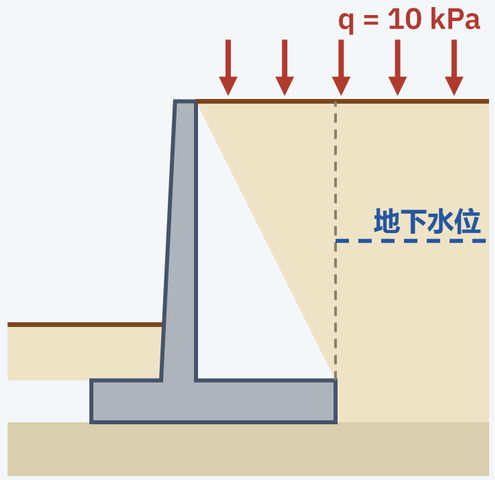
算例

已知条件

墙与土体	**算例1–4中的挡土墙与填土($\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3)；静力状态**
水	**填土中地下水位在墙顶以下2.0 m；基底下的扬压力呈线性分布**

求

受力明细汇总表；FS_s、FS_o、e、q_{max}；水的影响。



解答 (1/2)

解答

1 受力明细汇总表（模块；$M = xF_z - zF_x$，倾覆为正）

项目	F_x (kN/m)	F_z (kN/m)	x (m)	z (m)	M (kN·m/m)
墙	0.00	−88.80	1.55	1.22	−137.96
墙踵块体（取γ_{sat}）	0.00	−152.00	2.50	2.55	−380.00
Q_{heel}（不采用）	0.00	−20.00	2.50	4.60	−50.00
墙前填土	0.00	−14.69	0.51	1.00	−7.49
土压力合力P_A	−54.68	0.00	3.50	1.64	89.71
地面超载推力P_Q	−15.33	0.00	3.50	2.30	35.27
墙后水推力	−33.16	0.00	3.50	0.87	28.74
上浮	0.00	44.64	2.33	0.00	104.15
墙前抗力	23.52	0.00	0.00	0.47	−10.98

解答 (2/2)

解答

2 验算

$$N = 210.85\ \text{kN/m} \quad FS_s = \frac{116.0 + 23.5}{103.2} = \mathbf{1.352} \quad FS_o = \frac{525.5}{257.9} = \mathbf{2.038}$$

$$e = 0.481\ \text{m}\ (\leq B/6 = 0.583) \qquad q_{max} = 109.9\ \text{kPa} \qquad q_{min} = 10.6\ \text{kPa}$$

水使抗滑移安全系数由2.03降至**1.35**(< 1.5 ✗)，抗倾覆安全系数由3.81降至**2.04**，e由0.243增至0.481 m；扬压力使N减小44.6 kN/m。**静力抗滑移不满足要求**：需采取排水措施、设置凸榫（抗滑键）或加宽底板。

在GeoTerva中验算解答 ↗

减轻立壁受力的悬臂式卸荷板

理论

减载平台是自立壁背面伸入填土的钢筋混凝土板；用于高墙（立壁弯矩随H^3增大）或加固不满足要求的墙。其作用有三：(1)承托其上方的土体；(2)**减轻**其下方立壁的受力：平台以下土的自重压力重新开始增长；(3)为墙增加重量。

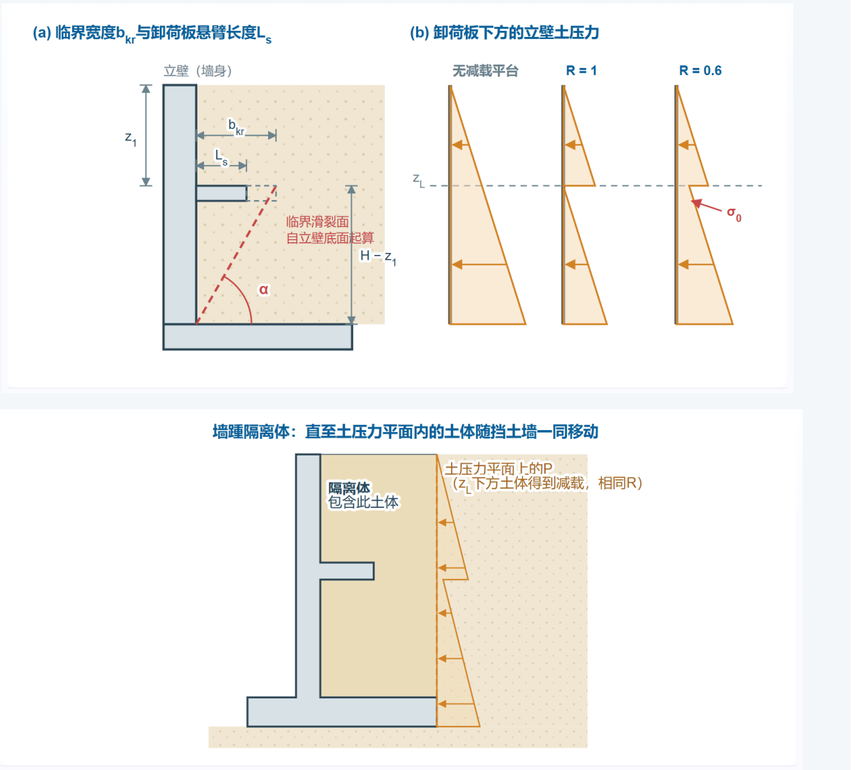
减载平台仅当其端部到达自立壁背面下方向上发展的**临界破裂面**时才完全有效（Rankine，水平填土：α = 45° + φ′/2）。减载平台所需的临界宽度和减载比：

$$b_{kr} = (H - z_1)\,(\cot\alpha - \tan\beta_w) \qquad R = \min\left(\frac{L_s}{b_{kr}}, 1\right)$$

$$p(z) = K\,[\sigma'_v(z) - R\,\sigma'_v(z_L)] \qquad z > z_L \ \text{（悬臂段以下）}$$

R = 1：两个独立的三角形（完全减载）；R < 1：部分减载，在无减载平台的墙与完全减载的墙之间线性内插。仅静力的**土体自重**压力得到减载；超载、水压力和地震增量不减载。

卸荷板荷载对立壁的力矩不计入立壁（偏于安全）；卸荷板在自身荷载下按独立悬臂板计算（M_{root}）。



题目

算例

已知条件

墙与土体	**算例1–4中的挡土墙（H = 4.0 m；静力工况）；水平填土，$\varphi' = 30^\circ$**
悬臂	**卸荷板底面深度$z_1 = 2.15$ m（自墙顶算起），挑出长度$L_s = 1.00$ m，厚度$t_s = 0.30$ m**

求

临界角α、临界宽度b_{kr}、R；立壁底部V、M的变化；外部稳定性。

解答 (1/2)

解答

1 临界平面及宽度（竖直墙背：$\beta_w = 0$）

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} = 60.0^\circ \qquad b_{kr} = (4.0 - 2.15)\cot 60^\circ = 1.068\ \text{m}$$

$$R = \min(1.00/1.068,\ 1) = \mathbf{0.9362}\ \text{（部分减载）}$$

2 立壁底部的内力（无卸荷板 → 有卸荷板）

$$V：\ 61.33 \rightarrow 38.99\ \text{kN/m}\ \ (-\%36.4)$$

$$M：\ 90.67 \rightarrow 70.00\ \text{kN·m/m}\ \ (-\%22.8)$$

解答 (2/2)

解答

3 减载平台荷载与外部稳定性（压力平面内的减载作用相同）

$$W_{soil} = 43.3\ \text{kN/m}, \quad W_{self} = 7.2\ \text{kN/m}, \quad M_{root} = 25.25\ \text{kN·m/m}$$

$$FS_s:\ 2.03 \rightarrow 3.26 \qquad FS_o:\ 3.81 \rightarrow 5.28 \qquad e:\ 0.243 \rightarrow 0.094\ \text{m}$$

减载平台(L_s = 1.00 m < b_{cr} = 1.07 m: R = 0.94)使立壁底部的剪力减小36%、弯矩减小23%；平台的荷载和自重加到墙上：抗滑移FS由2.03增至3.26，偏心距由0.243减至0.094 m。减载平台另按其自身根部M_{root} = 25.3 kN·m/m进行设计。

在GeoTerva中验算解答 ↗

解答范围

理论

外部稳定性将墙体视为单一刚性块体；**截面内力**（立壁、墙趾、墙踵、减载平台、凸榫）由本模块给出的作用求得，钢筋混凝土设计（配筋、抗剪）不在本课件范围内。

无黏性填土($c' = 0$)；单层，水平或单一坡度的表面；地下水面水平且按静水压力分布；超载为均布（条形和集中侧向压力按Boussinesq解叠加）。

基底摩擦$\mu_b = \tan \delta_b$；不计黏着力。墙前被动抗力仅用于抗滑移验算，不用于抗倾覆和地基承载力验算；地震工况下按$\eta_{p,E}$计入（默认为0）。

拟静力地震：Mononobe–Okabe + 惯性力 + 动水压力；$k_v > 0$时，两个方向均需计算。

减载平台（卸荷板）和凸榫（抗滑键）采用简化方法建模（减载平台：部分/完全卸荷，凸榫：组合被动土压力）；整体稳定性与沉降不在范围之内。

小结

要点回顾

墙体：底板+立壁；$W_c = \Sigma \gamma_c A_i$；**墙踵块体**和墙前填土随墙一起运动；土压力作用于基础后缘的竖直面上($h = t_f + H$)；Q_{heel}不参与任何验算

各项验算均取自同一受力明细汇总表：$FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H$，$FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$，$x_R$，e，$q = V/B(1 \pm 6e/B)$；若$|e| > B/6$，则$q_{max} = 2V/(3x_R)$

地震：P_{AE} (Mononobe–Okabe) + 0.6h处的ΔP_{AE} + $k_h W$惯性力；算例墙在地震下**抗滑移和偏心距验算不满足**，加宽墙趾/墙踵修改后即满足要求

截面内力：立壁$V = K_a(\frac{1}{2}\gamma H^2 + qH)$, $M = K_a(\gamma H^3/6 + qH^2/2)$；墙趾和墙踵在立壁面处固结：基底应力减去底板与土体自重

凸榫（抗滑键）：P_{key}取自组合被动土压力（抗滑移验算中），V、M取自总K_p；地震工况下采用$\eta_{p,E}$

减载平台：$b_{kr} = (H - z_1)(\cot \alpha - \tan \beta_w)$，$R = \min(L_s/b_{kr}, 1)$；平台以下由土体自重产生的压力重新开始；水压力和超载不被减轻

水：按γ_{sat}计算的重量 + 单独的墙后水推力；扬压力使N减小并增加倾覆作用（算例中静力抗滑移不满足）

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采用这堵墙(H = 4 m, q = 10 kPa, k_h = 0.15)。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

在GeoTerva中输入自己墙体的立壁、底板、墙后填土、水、地震系数、凸榫和减载平台；模块一并给出受力明细汇总表、验算结果和截面内力。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。