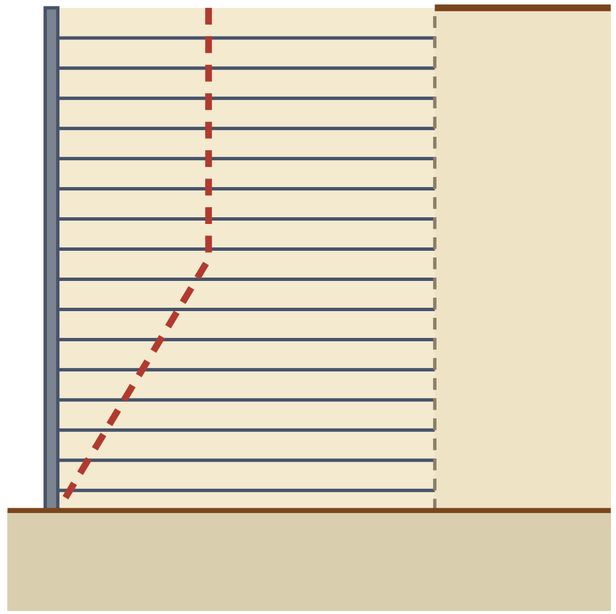
GeoTerva

岩土工程课程讲义 · 挡土墙

加筋土挡土墙(MSE)

讲义：加筋土挡土墙的内部稳定性（筋材拉断、拔出）、外部稳定性（抗倾覆、抗滑移、地基承载力）及地震验算；每个专题均附工程算例。

加筋土 | 筋材拉断 · 拔出 | 倾覆 · 滑移 · 地基承载力 | 地震



引言

本讲内容

加筋土的工作原理：土压力使筋材受拉，二者间的摩擦使两者共同工作；墙面面层仅起挡土作用

内部稳定性：每一层位的拉力$T = \sigma'_h S_V S_H$，**筋材拉断**（含腐蚀余量），**拔出**（破裂面后方的有效长度）

破坏面（双线性或Rankine土楔）及K_r/K_a之比：对于刚性筋材，顶部的侧向应力大于Rankine值

外部稳定性：L × H的加筋土块体相当于一道重力式挡土墙；抗倾覆、偏心距(L/6)、抗滑移和承载力（Meyerhof有效宽度）

活载超载为何只起加载作用，以及**地震**对块体、推力和筋材层位的影响

如何修正不满足要求的设计：筋材长度、筋材类型

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

算例墙：H = 10 m，镀锌钢带75 × 6 mm (f_y = 240 MPa)，L = 7.5 m，S_V = 0.6 m，S_H = 1.0 m；填土γ = 16.5 kN/m³，φ′ = 36°；地基土φ′ = 28°，c′ = 50 kPa。各力按每延米墙长（每条钢带）计。

有何功能，验算哪些内容?

理论

土墙自身仅能在休止角下保持稳定。若在填土铺设时放入细长的**受拉构件**（镀锌钢带、土工织物、土工格栅），则土体承受压力、筋材承受拉力，二者由**摩擦**结合在一起。面板（混凝土板、砌块或筋材包裹）将土体约束在内部，不承担其他荷载。

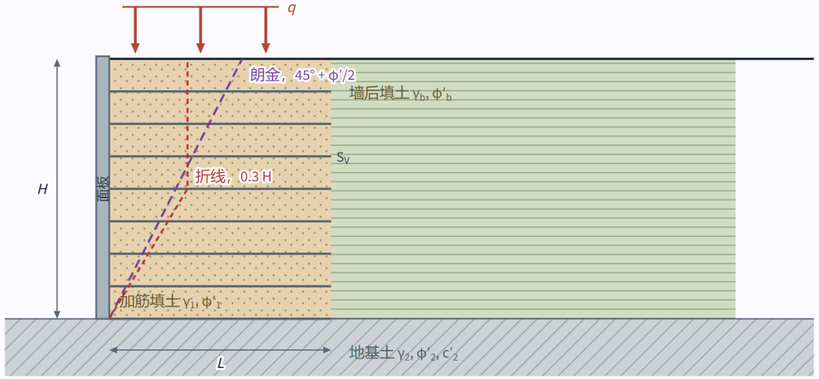
内部稳定性：每一层均须在以下条件下承受拉力：(1)不发生**筋材拉断**，(2)不从破裂面后方被**拔出**，(3)在面板处不发生**筋材拉断**（连接处）。

外部稳定性：宽L、高H的加筋体是一座**重力式挡土墙**：它不得在墙后填土的推力作用下倾覆，不得沿底面滑移，且地基土须能承受其荷载。

地震：重新进行两组验算，计入动态推力 + 块体及有效区惯性力（所需安全系数为静力工况的75%）。

填土须为自由排水的粒状土；**整体稳定性**（穿过基础的滑裂面或复合滑裂面）不在本模块范围之内。

两种方法：原文献的**Rankine**法，以及本软件(FHWA/AASHTO)的**简化方法**（模块默认采用的方法）。



竖向应力与侧向应力，K_r/K_a之比

理论

z为距墙顶的深度，γ_1、φ'_1为加筋填土的重度和内摩擦角。填土处于主动状态：

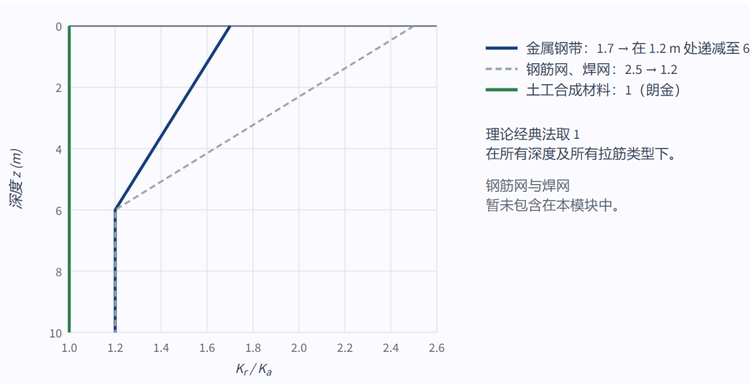
$$\sigma'_v = \gamma_1 z + q_D + q_L \qquad \sigma'_h = K_r\,(\gamma_1 z + q_D + q_L) \qquad K_a = \tan^2\!\left(45^\circ - \frac{\varphi'_1}{2}\right)$$

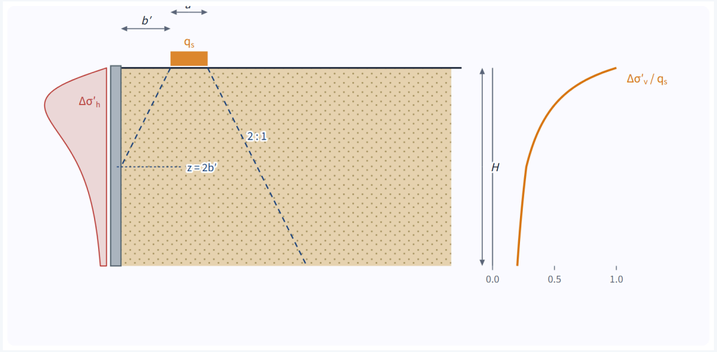
刚性（不可伸长）筋材——钢带——使填土在上部处于比Rankine状态**更刚硬**的状态；简化方法中，K_r/K_a按筋材类型取用：

$$\text{土条：}\ \frac{K_r}{K_a} = 1.7 - 0.5\frac{z}{6}\ (z \le 6\ \text{m})，1.2\ \text{下方} \qquad \text{土工合成材料：}\ \frac{K_r}{K_a} = 1$$

均布超载使各深度处的竖向应力均增加q，并通过K_r使侧向应力同样增大。**活载型**超载(q_L)产生荷载作用，但**不提供抗力**：它既不计入抗倾覆/抗滑移计算的重力，也不计入抵抗拔出的竖向应力（偏于安全）。

条形荷载(Laba–Kennedy)：竖向应力按2:1扩散，侧向压力采用刚性墙的弹性解(M = 1.4 → 1)。





题目

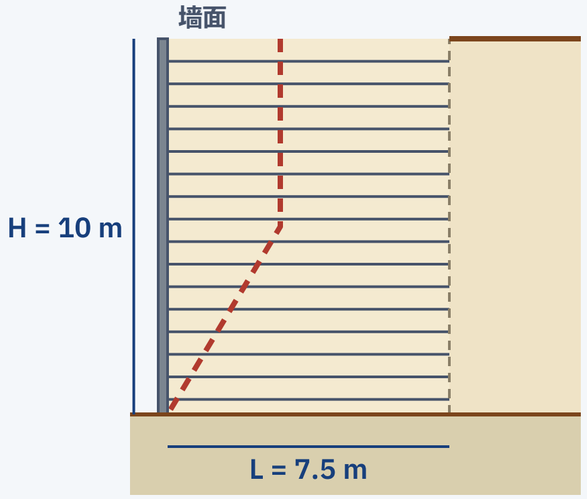
算例

已知条件

填土	$\gamma_1 = 16.5\ \text{kN/m}^3$, $\varphi'_1 = 36°$；**钢制筋带；简化方法；无超载**
深度	$z = 0.6;\ 3.0;\ 6.0$**和**10.0 **m（底部）**

求

各深度处的K_a、K_r/K_a、**σ'_v和σ'_h**；最大侧向应力出现在何处?



解答

解答

1 主动土压力系数

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 18^\circ) = \mathbf{0.2596}$$

2 各深度处（$K_r/K_a = 1.7 - 0.5z/6$，$z \le 6$ m；6 m以下取1.2）

z (m)	$\sigma'_v = 16.5z$ (kPa)	K_r/K_a	K_r	$\sigma'_h = K_r\sigma'_v$ (kPa)
0.6	9.9	1.65	0.4284	4.24
3.0	49.5	1.45	0.3764	18.63
6.0	99.0	1.20	0.3115	30.84
10.0	165.0	1.20	0.3115	51.40

墙底处：σ'_v = **165 kPa**，$K_r = 1.2K_a = 0.3115$，σ'_h = **51.4 kPa**。在最上层位($z = 0.6$ m)，$K_r/K_a = 1.65$：为Rankine值的1.65倍。σ'_h随深度增大；最大侧向应力（及拉力）出现在底部。

在GeoTerva中验算解答 ↗

有效长度$L_e = L - L_a$

理论

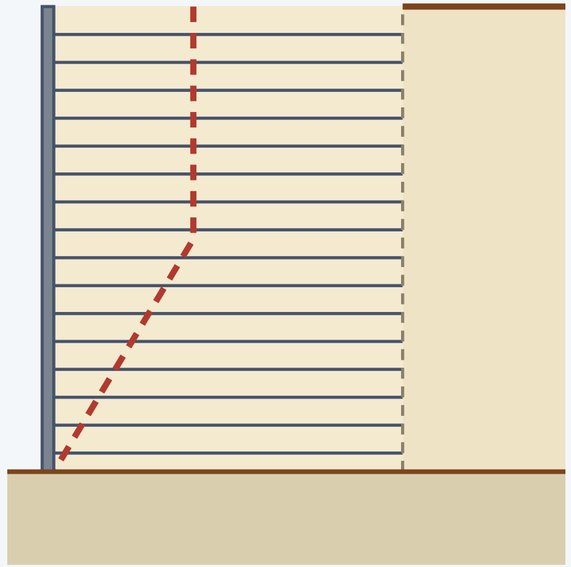
筋材在填土否则会发生破坏之处发挥作用。每一层筋材**位于破裂区内的部分**（面板与破裂面之间）随滑动土体一起滑动，不起拉结作用；仅**破裂面之后的部分**对该层起锚固作用：活动段长度L_a，有效段长度$L_e = L - L_a$。

Rankine: $L_a = \dfrac{H - z}{\tan(45^\circ + \varphi'_1/2)}$　　双线性：$L_a = 0.3H\ (z \le H/2)$，$L_a = 0.6(H - z)\ (z > H/2)$

文献法对每层筋材取自前端起始的Rankine土楔（与水平面成45° + φ′$_1$/2角）：φ′ = 36°时，在10 m高墙的墙顶处距墙面5.1 m。

在刚性（钢带）筋材中，实测表明最大拉力面距墙面近得多：实际采用**双线性**面——上半部分距墙面0.3H处竖直，再由此直线延伸至墙踵。土工合成材料中仍沿用Rankine面。

在模块的简化方法中，钢带取双线性破裂面，土工合成材料取Rankine破裂面；原文献的方法在两种情形下均为Rankine法。



红色虚线：双线性破坏面（筋带）。Rankine土楔自距墙面5.1 m处开始。

题目

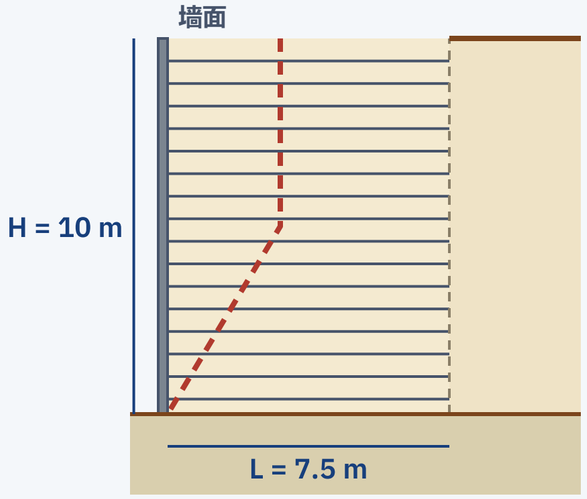
算例

已知条件

墙	$H = 10\ \text{m}$，$L = 7.5\ \text{m}$，**钢带**；$\varphi'_1 = 36^\circ$
深度	$z = 0;\ 0.6;\ 3;\ 5;\ 6;\ 9.4\ \text{m}$

求

各深度处的L_a（双线性与Rankine）及采用双线性滑裂面时的L_e。



解答

解答

1 双线性：z ≤ 5 m时，0.3H = 3.00 m；z > 5 m时，0.6(H − z)。Rankine：(H − z)/tan63° = (H − z)/1.963

z (m)	L_a双线性(m)	$L_e = 7.5 - L_a$ (m)	L_a Rankine (m)	L_e Rankine (m)
0.0	3.00	4.50	5.10	2.40
0.6	3.00	4.50	4.79	2.71
3.0	3.00	4.50	3.57	3.93
5.0	3.00	4.50	2.55	4.95
6.0	2.40	5.10	2.04	5.46
9.4	0.36	7.14	0.31	7.19

双线性破裂面在上部层位比Rankine破裂面更靠近墙面（z = 0.6 m：L_a = 3.00 m，Rankine为4.79 m）；因此**有效长度更大**（4.50 m，Rankine为2.71 m）。而上部层位所承受的拉力则增大为K_r/K_a倍（算例4）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

该层的拉力与筋材的承载力

理论

每一层位承担的是其与相邻层位之间中间高度所界定的**贡献高度**(S_V)范围内填土的侧向应力。钢带承担水平间距S_H宽度范围内的填土；由于片材和格栅是连续的，拉力按每延米墙长计：

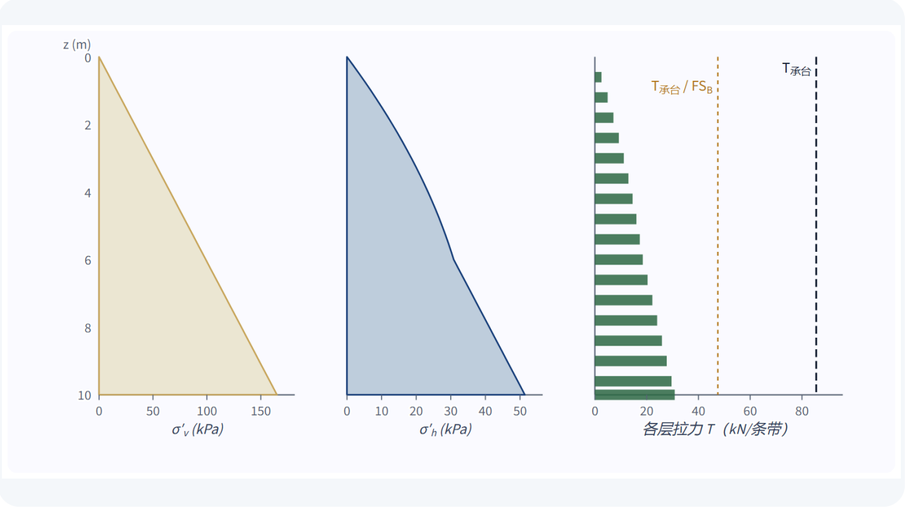
$$T = \sigma'_h S_V S_H \quad \text{（每条带）} \qquad T = \sigma'_h S_V \quad \text{（每延米墙长）}$$

条带（宽度w，厚度t，屈服强度f_y）：镀锌钢筋材在填土中每年锈蚀0.025–0.050 mm；对于设计使用年限n，厚度减小r n：

$$t_{eff} = t - rn \qquad T_{diameter} = w\, t_{eff}\, f_y \qquad FS_B = \frac{T_{diameter}}{T} \qquad t_{req} = \frac{FS_B T_{max}}{w\, f_y} + rn$$

土工合成材料：长期强度等于极限抗拉强度除以损伤、蠕变和劣化系数；格栅并非总是覆盖整个平面(C_r)：

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF_{id}\, RF_{cr}\, RF_{cbd}} \qquad FS_B = \frac{T_{all} C_r}{T} \qquad S_{V,req} = \frac{T_{all} C_r}{\sigma'_h(H)\, FS_B}$$



题目

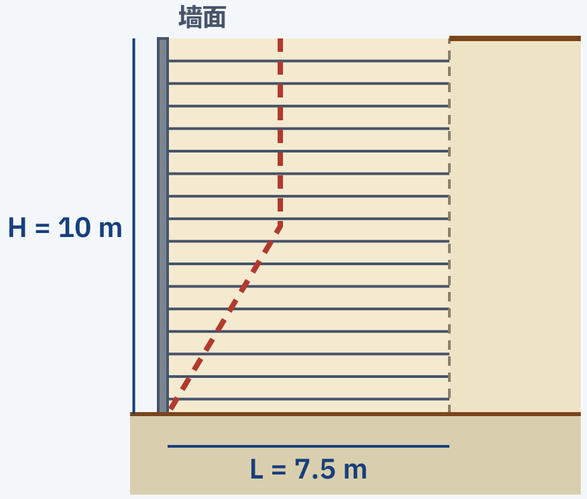
算例

已知条件

条形	**已布置75 × 6 mm；$f_y = 240$ MPa；腐蚀速率0.025 mm/年，设计使用年限50年；$S_V = 0.6$ m，$S_H = 1.0$ m**
所需	$FS_B \geq 1.8$**（应用：锈蚀截面取0.55 f_y）**

求

最大拉力T_{max}（每条筋带）；T_{cap}、FS_B；所需厚度t_{req}。



解答

解答

1 最大拉应力出现在底部标高处(z = 10 m; σ'_h = 51.40 kPa)

$$T_{max} = \sigma'_h S_V S_H = 51.40(0.6)(1.0) = \mathbf{30.84}\ \text{kN/筋带}$$

2 锈蚀截面与承载力

$$t_{eff} = 6 - 0.025(50) = 4.75\ \text{mm} \quad (1.25\ \text{mm损失})$$

$$T_{diameter} = w\, t_{eff}\, f_y = 0.075(0.00475)(240\,000) = \mathbf{85.5}\ \text{kN}$$

$$FS_B = 85.5/30.84 = \mathbf{2.772} \ \geq 1.80\ \checkmark$$

3 所需厚度（加回腐蚀裕量）

$$t_{req} = \frac{1.8(30.84)}{0.075(240\,000)} + rn = 3.084 + 1.25 = \mathbf{4.33}\ \text{mm}$$

FS_B = **2.77** ≥ 1.80：6 mm厚筋带满足要求；所需厚度为**4.33 mm**。控制层位为底部(k = 17)。

在GeoTerva中验算解答 ↗

破裂面后方的摩阻力

理论

未发生拉断的层位仍可能从填土中**拔出**。在破裂面后方，填土通过筋材两个面上的摩擦力锚固筋材；摩擦力等于该层位以上的竖向应力乘以筋材所发挥的系数：

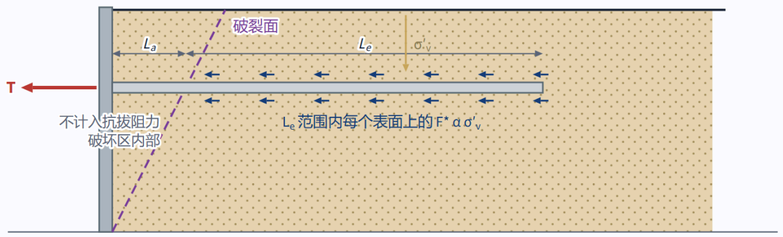
$$P_r = 2R_c\,F^*\alpha\,\sigma'_v\,L_e \qquad FS_P = \frac{P_r}{T} \qquad L_{req} = L_a + \frac{FS_P\,T}{2R_c F^*\alpha\,\sigma'_v}$$

F*拔出阻力系数：条带取tan φ′（下限值），土工合成材料取⅔ tan φ′（模块的下限值；由拉拔试验确定）。**α**尺寸效应：条带取1.0，土工格栅取0.8，土工织物取0.6。

R_c覆盖率：钢带取钢带宽度w（每条钢带），土工格栅取C_r（每延米墙长），整幅铺设的片材取1。**σ'_v**为抗拔区内的竖向应力：$\gamma_1 z$ + 永久超载；**不计入活载**（不提供抗力）。

筋带中T和P_r随深度增大：在文献方法中，各层位所需的有效长度相同；在简化方法中，上部层位承受的拉力为K_r/K_a倍，有效长度按相同比例增大。

连接：拉力T_{max}传至面板；连接强度由连接试验结果输入，并通过拉断系数验算。



题目

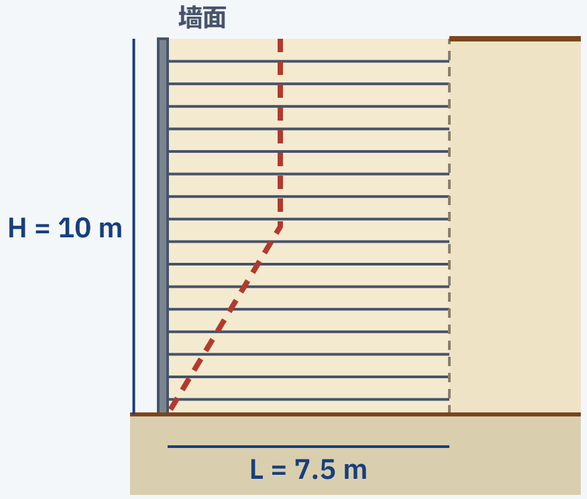
算例

已知条件

条形荷载与土体	**算例1–3中的墙；** $F^* = \tan 36^\circ = 0.727$，$\alpha = 1$；$FS_P \geq 1.5$
层位	**z = 0.6 m（第1层）及其他各层**

求

第1层处的P_r、FS_P、所需长度L_{req}；各层汇总。



解答 (1/2)

解答

1 层位1（z = 0.6 m）：$K_r/K_a = 1.65$；$\sigma'_h = 4.24$ kPa

$$T = \sigma'_h S_V S_H = 4.24(0.6) = 2.54 \text{ kN} \qquad L_a = 0.3H = 3.00, \quad L_e = 4.50 \text{ m}$$

$$P_r = 2(0.075)(0.727)(1.0)(9.9)(4.50) = \mathbf{4.86} \text{ kN}$$

$$FS_P = \frac{4.86}{2.54} = \mathbf{1.908} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

2 所需长度：$L_{req} = L_a + FS_P T/(F^* \alpha \, \sigma'_v \cdot 2w)$

$$L_{req} = 3.00 + \frac{1.5(2.54)}{0.727(1)(9.9)(2)(0.075)} = 3.00 + 3.54 = \mathbf{6.54} \text{ m}$$

解答 (2/2)

解答

3 全部层位汇总

标高	z (m)	T (kN)	L_a	L_e	P_r (kN)	FS_P	L_{req} (m)
1	0.6	2.54	3.00	4.50	4.86	1.91	6.54
2	1.2	4.93	3.00	4.50	9.71	1.97	6.43
5	3.0	11.18	3.00	4.50	24.28	2.17	6.11
10	6.0	18.51	2.40	5.10	55.02	2.97	4.97
17	10.0	30.84	0.00	7.50	134.86	4.37	2.57

最小拔出安全系数为**层位1处的FS_P = 1.91**（要求值为1.5）；最大所需长度为**6.54 m**（L = 7.5 m满足要求）。上部层位的拉力较小，但σ'_v也小，故拔出在该处最不利。

该块体是一堵重力式挡土墙

理论

满足内部稳定性的加筋块体是**尺寸为L × H的土体块**，用以挡住其后的填土。被挡填土(γ_b, φ'_b)以Rankine主动推力作用于块体的竖直背面；超载带来附加推力：

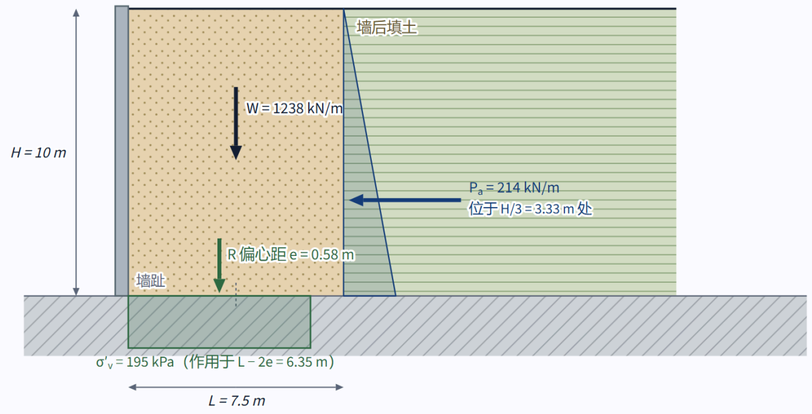
$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 \ \ (H/3) \qquad P_q = K_a\, q\, H \ \ (H/2) \qquad W = \gamma_1 H L \ \ (L/2)$$

$$FS_{ot} = \frac{M_R}{M_o} = \frac{W\, L/2}{P_a H/3 + P_q H/2} \qquad x_R = \frac{M_R - M_o}{\Sigma V} \qquad e = \frac{L}{2} - x_R$$

抗力：块体自重和**永久**超载。推力作用时可能并不存在的**活荷载不起抗力作用**（仅指荷载）。

同一项验算可按两种形式表述：**力矩比**($FS_{ot} \geq 2$)与合力作用点位置：为使基底全部处于受压状态，要求**e ≤ L/6**（地震工况下为L/3）。

墙面板及其前方的埋入部分不计入抗力重量（偏于安全）。



题目

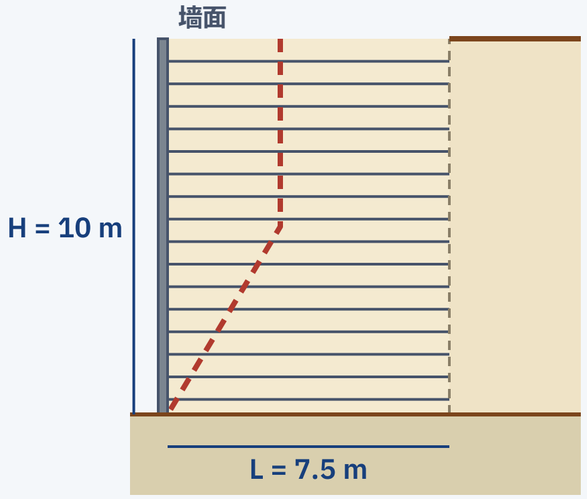
算例

求

P_a和M_O；W和M_R；FS_{ot}；合力位置x_R和e（限值L/6）。

已知条件

块体	$H = 10$ m，$L = 7.5$ m；**加筋填土**$\gamma_1 = 16.5$ kN/m³
被支挡填土	**相同土体**($\gamma_b = 16.5, \varphi_b' = 36°$)；**无超载**



解答 (1/2)

解答

1 主动推力($K_a = 0.2596$)及倾覆力矩

$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 = \tfrac{1}{2}(0.2596)(16.5)(10)^2 = \mathbf{214.18}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = P_a\, H/3 = 214.18(3.333) = \mathbf{713.9}\ \text{kN·m/m}$$

2 块体重量与抗力矩

$$W = \gamma_1 H L = 16.5(10)(7.5) = \mathbf{1{,}237.5}\ \text{kN/m}$$

$$M_R = W\, L/2 = 1{,}237.5(3.75) = \mathbf{4{,}640.6}\ \text{kN·m/m}$$

解答 (2/2)

解答

3 抗倾覆与合力位置

$$FS_{ot} = M_R / M_o = 4{,}640.6 / 713.9 = \mathbf{6.50} \ \geq 2.0 \ \checkmark$$

$$x_R = (M_R - M_o)/\Sigma V = (4{,}640.6 - 713.9)/1{,}237.5 = 3.173 \text{ m}$$

$$e = L/2 - x_R = 3.75 - 3.173 = \mathbf{0.577} \text{ m} \ \leq L/6 = 1.25 \ \checkmark$$

抗倾覆安全系数为**6.50** (≥ 2.0)；合力仅自基底中点向墙趾方向偏移了**0.58 m**：基底全部受压(e ≤ L/6 = 1.25 m)。

在GeoTerva中验算解答 ↗

基底摩擦

理论

当推力超过基底摩阻力时，块体沿其底面滑动。**文献**如同置于地基上的混凝土墙那样，将摩擦按k ≈ ⅔取值；而加筋块体的底面则是**土与土**接触：工程实践以加筋填土与基础地基土二者中**较弱者**的内摩擦角为准。模块保留⅔系数，选取较弱的土，并且不计地基土的黏聚力：

$$FS_{sl} = \frac{\Sigma V \tan\left(\frac{2}{3}\varphi'_{min}\right)}{\Sigma H} \qquad \varphi'_{min} = \min\left(\varphi'_1, \varphi'_2\right)$$

ΣH：被挡填土的推力及（如有）超载产生的推力；ΣV：加筋土块体自重和永久超载。**活荷载计入推力，不计入ΣV。**

按原文献的做法（仅考虑填土，φ'_1）也进行计算；若基础下土层较弱，则模块所得数值更低，并且是**起控制作用的数值。**

抗滑移问题通过加宽加筋土块体来解决（ΣV随L线性增大）；增加长度还能改善拔出和偏心距。

要求的安全系数

验算	静力（所需）	地震（要求值，75%）
筋材拉断FS_B	1.80	1.35
拔出FS_P	1.50	1,125
抗倾覆FS_{ot}	2.00	1.50
偏心距e	≤ L/6	≤ L/3
抗滑移FS_{sl}	1.50	1,125
地基承载力FS_{bc}	2.50	1,875

地震工况的取值为静力工况的75%（偏心距：L/6 → L/3）。活荷载在两种工况下均保留。

题目

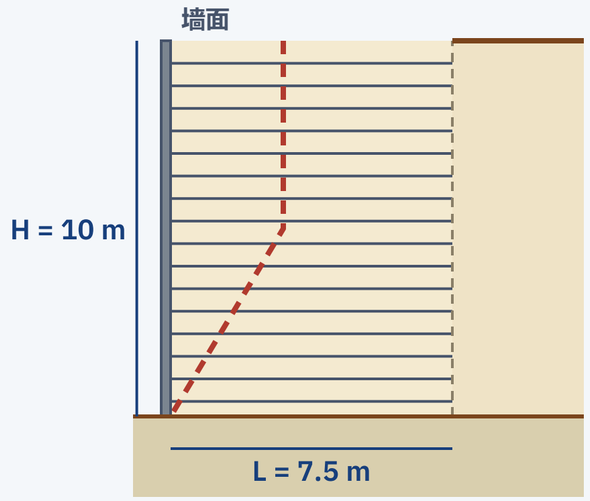
算例

已知条件

块体	**算例5中的块体($\Sigma V = 1\,237.5$ kN/m, $\Sigma H = P_a = 214.18$ kN/m)**
土类	**加筋填土$\varphi'_1 = 36^\circ$；地基土$\varphi'_2 = 28^\circ$（$c'_2 = 50$ kPa，不计黏聚力)**

求

由基底摩擦得到的FS_{sl}；与文献做法（仅考虑填土）的比较。



解答

解答

1 软弱土：φ'_{min} = min(36°, 28°) = 28°（地基土）

$$\tan\left(\tfrac{2}{3}\cdot 28^\circ\right) = \tan 18.67^\circ = 0.3378$$

$$R = \Sigma V \tan(\ldots) = 1{,}237.5(0.3378) = 418.1 \text{ kN/m}$$

$$FS_{sl} = \frac{R}{\Sigma H} = \frac{418.1}{214.18} = \mathbf{1.952} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

2 文献采用的途径（仅填土，φ'_1 = 36°）

$$\tan\left(\tfrac{2}{3}\cdot 36^\circ\right) = \tan 24^\circ = 0.4452$$

$$FS_{sl} = \frac{1{,}237.5(0.4452)}{214.18} = \mathbf{2.572}$$

由于基底土较弱，抗滑移安全系数为**1.95**（按文献法为2.57）：模块取**较小者**作为控制值；高于所需的1.5。

在GeoTerva中验算解答 ↗

地基土块体的承载方式类似条形基础

理论

所依文献将位于地表、宽度为L的基础的承载力与基底处的竖向应力相比较，不含深度项。一般承载力系数(Vesic)：$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$，$N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$，$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$：

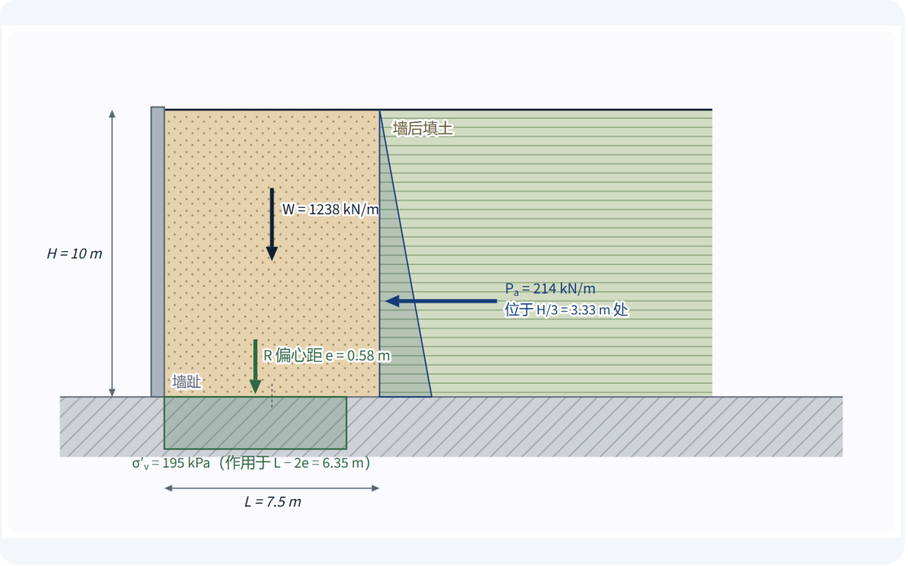
$$q_u = c_2' N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma_o'},\ \sigma_o' = \gamma_1 H + q_D$$

应用(FHWA/AASHTO)：合力偏离中心(e)，趾部压力大于平均压力；因此将全部竖向荷载均匀分布于**Meyerhof有效宽度**$L' = L - 2e$上，并计算该宽度基础的承载力：

$$L' = L - 2e \qquad \sigma_v' = \frac{\Sigma V}{L'} \qquad q_u = c_2' N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L' N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma_v'}$$

压力更大、基础更窄：Meyerhof法的安全系数更低；模块**对二者均进行计算，取较小者**为控制值。

本页为短期验算（不考虑孔隙水压力）；整体稳定性和沉降不在本模块范围之内。



题目

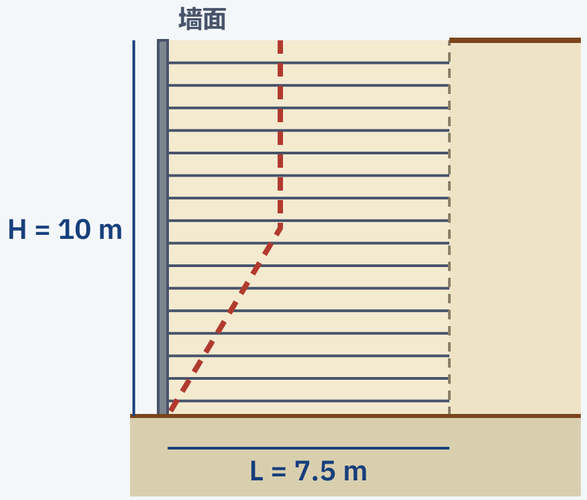
算例

已知条件

块体	**算例5中的块体：** $\Sigma V = 1\,237.5$ **kN/m，** $e = 0.577$ **m**
地基土	$\varphi'_2 = 28^\circ$**,** $c'_2 = 50$ **kPa,** $\gamma_2 = 17.3$ **kN/m³**

求

按文献方法求得的FS_{bc}，按Meyerhof有效宽度求得的FS_{bc}；以及二者中起控制作用的一个。



解答

解答

1 系数(Vesic, $\varphi'_2 = 28°$)：$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$，$N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$，$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$

$$N_q = 14.72 \qquad N_c = 25.80 \qquad N_\gamma = 16.72$$

2 原文献的做法（宽度$L = 7.5$ m，$\sigma'_o = \gamma_1 H = 165$ kPa）

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(7.5)(16.72) = 2{,}375 \text{ kPa} \qquad FS_{bc} = 2{,}375/165 = \mathbf{14.39}$$

3 Meyerhof有效宽度($e = 0.577$ m)

$$L' = 7.5 - 2(0.577) = 6.346 \text{ m} \qquad \sigma'_v = \Sigma V / L' = 1{,}237.5/6.346 = 195 \text{ kPa}$$

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(6.346)(16.72) = 2{,}208 \text{ kPa}$$

$$FS_{bc} = 2{,}208/195 = \mathbf{11.32} \ \geq 2.5 \ \checkmark$$

原文献的计算路径得**14.39**，采用有效宽度得**11.32**：由于偏心距使压力增大并使基础变窄，故**以Meyerhof值为控制值**；二者均远大于2.5。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

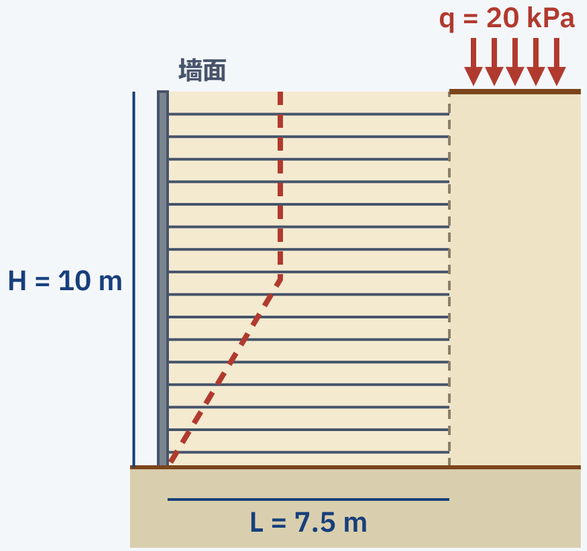
算例

已知条件

墙	**算例1–7中的挡土墙（H = 10 m，L = 7.5 m，筋带）**
荷载	**墙顶上的活载均布超载$q_L = 20$ kPa（作用于块体上方及其后方）**

求

第1层处求$\mathbf{FS_P}$；底部求$\mathbf{T_{max}}$、FS_B；外部稳定验算（推力、抗倾覆、抗滑移、地基承载力）。



解答 (1/2)

解答

1 层位1（z = 0.6 m）：超载增大侧向应力，但不增大拔出阻力

$$\sigma_h' = K_r\left(\gamma_1 z + q_L\right) = 0.4284(9.9 + 20) = 12.81 \text{ kPa} \quad T = 12.81(0.6) = 7.68 \text{ kN}$$

$$P_r = 4.86 \text{ kN} \quad (\sigma_v' = \gamma_1 z = 9.9 \text{ kPa}；\text{活荷载不计入})$$

$$FS_P = \frac{4.86}{7.68} = \mathbf{0.632} \ < 1.5 \ \text{✗}$$

2 底部：最大拉力与筋材拉断

$$\sigma_h' = 0.3115(165 + 20) = 57.63 \text{ kPa} \quad T_{max} = 57.63(0.6) = 34.58 \text{ kN}$$

$$FS_B = \frac{85.5}{34.58} = \mathbf{2.47} \ \geq 1.8 \ \text{✓} \qquad L_{req} = 13.68 \text{ m} \ > 7.5 \ \text{✗}$$

在第1层筋材，拉力由2.54增至**7.68 kN**时，拔出阻力**保持不变**：FS_P 1.91 → **0.63**。筋材拉断验算满足要求(2.47)，但所需长度变为13.68 m：活载**只增加荷载，不增加抗力。**

解答 (2/2)

解答

3 外部验算：推力增大；不计入重量

$$P_q = K_a q_L H = 0.2596(20)(10) = 51.92 \text{ kN/m} \ (H/2) \qquad P_a = 266.11 \text{ kN/m}$$

$$M_o = 713.9 + 51.92(5) = 973.6 \text{ kN·m/m} \qquad W = 1{,}237.5 \text{ kN/m}（无活荷载）$$

$$FS_{ot} = 4{,}640.6/973.6 = \mathbf{4.77} \qquad e = \mathbf{0.787} \text{ m} \ \leq 1.25 \ \checkmark$$

4 抗滑移和地基承载力（地基承载力验算中活荷载同样作用于基底）

$$FS_{sl} = 1{,}237.5(0.3378)/266.11 = \mathbf{1.57} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

$$V = 1\,237.5 + 20(7.5) = 1{,}387.5 \ \Rightarrow \ e_b = 0.702, \ L' = 6.10 \text{ m}, \ \sigma'_v = 227.6 \text{ kPa}$$

$$q_u = 2{,}172 \text{ kPa} \qquad FS_{bc} = \mathbf{9.54} \ \geq 2.5 \ \checkmark$$

外部稳定性满足要求（抗倾覆4.77，抗滑移1.57，地基承载力9.54），但**拔出验算不满足**(FS_P = 0.63)：对于有活荷载的墙，上部各层筋材的长度起控制作用。

在GeoTerva中验算解答 ↗

动态推力、块体惯性力及主动区惯性力

理论

地震作用（拟静力，k_h；$k_v = 0$）增加三个力：被支挡填土的动土压力（Mononobe–Okabe）、加筋体的惯性力，以及由筋材所约束的**主动区的惯性力**：

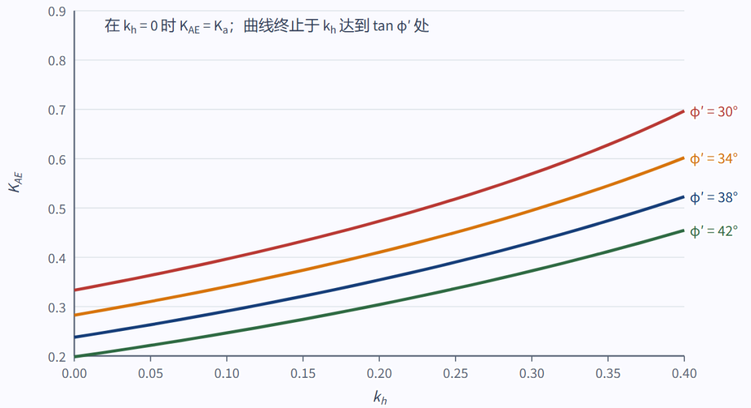
$$\psi = \tan^{-1} k_h \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi_b' - \psi)}{\cos^2\psi \left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin\varphi_b' \sin(\varphi_b' - \psi)}{\cos\psi}}\right]^2}$$

$$\Delta P_{AE} = \tfrac{1}{2}\gamma_b H^2 (K_{AE} - K_a) \ (0.6H) \qquad P_{IR} = \tfrac{1}{2} k_h \gamma_1 H^2 \ (H/2) \qquad P_i = k_h W_a \ \Rightarrow \ T_{md} = P_i \frac{L_e}{\Sigma L_e}$$

取ΔP_{AE}的**一半**（推力与惯性力不会同时达到各自的最大值）；P_{IR}仅针对面板后方宽度为0.5H的土块。超载不产生惯性力。

外部稳定性验算：$\Sigma H = P_a + \tfrac{1}{2}\Delta P_{AE} + P_{IR}$；$e \le L/3$；安全系数取静力工况的75%。

内部验算：每一层重新验算：按$T + T_{md}$验算筋材拉断，按F^*的**80%**验算拔出；活荷载与静力工况相同，保持不变。



题目

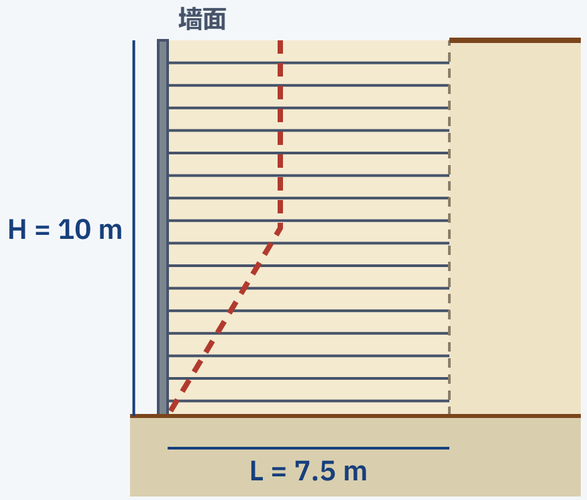
算例

求

K_{AE}, ΔP_{AE}, P_{IR}；外部稳定性验算；主动区惯性力，以及按$T + T_{md}$对各层筋材进行的拉断与拔出验算。

已知条件

墙	**算例1–7中的墙；无超载**
地震	**$k_h = 0.15$ ($k_v = 0$)；所需FS为静力值的75%；$e \le L/3$；拔出时F^*为静力值的80%**



解答 (1/4)

解答

1 地震角与地震系数

$$\psi = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ \qquad \sqrt{\sin 36^\circ \sin(27.47^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.5236$$

$$K_{AE} = \cos^2(27.47^\circ)/\left[\cos^2 8.53^\circ (1+0.5236)^2\right] = \mathbf{0.3468} \quad (K_a = 0.2596)$$

2 动态推力增量、块体惯性力及总水平力

$$\Delta P_{AE} = \tfrac{1}{2}(16.5)(10)^2(0.3468-0.2596) = \mathbf{71.89}\ \text{kN/m} \ \ (6.0\ \text{m})$$

$$P_{IR} = \tfrac{1}{2}(0.15)(16.5)(10)^2 = \mathbf{123.75}\ \text{kN/m} \ \ (5.0\ \text{m})$$

$$P_s = 214.18 + \tfrac{1}{2}(71.89) + 123.75 = \mathbf{373.88}\ \text{kN/m}$$

3 倾覆力矩

$$M_{o,E} = 214.18(3.333) + 35.94(6.0) + 123.75(5.0)$$

$$= 713.9 + 215.7 + 618.8 = \mathbf{1{,}548.4}\ \text{kN·m/m}$$

解答 (2/4)

解答

4 倾覆与偏心距（限值L/3 = 2.50 m）

$$FS_{ot,E} = 4{,}640.6/1{,}548.4 = \mathbf{3.00} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

$$x_R = (4{,}640.6 - 1{,}548.4)/1{,}237.5 = 2.499 \text{ m} \qquad e = 3.75 - 2.499 = \mathbf{1.251} \text{ m} \ \leq 2.50 \ \checkmark$$

5 抗滑移（不计墙前阻力）

$$FS_{sl,E} = 1{,}237.5(0.3378)/373.88 = 418.1/373.88 = \mathbf{1.118} \ < 1.125 \ \ \text{✗}$$

6 地基承载力(Meyerhof)

$$L' = 7.5 - 2(1.251) = 4.998 \text{ m} \qquad \sigma'_v = 1{,}237.5/4.998 = 247.6 \text{ kPa}$$

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(4.998)(16.72) = 2{,}013 \text{ kPa} \quad FS_{bc,E} = \mathbf{8.13} \ \geq 1.875 \ \checkmark$$

解答 (3/4)

解答

7 主动区的惯性力及其在各层之间的分配

$$W_a = \gamma_1 A_a = 16.5(22.50) = 371.25 \text{ kN/m} \qquad P_i = 0.15(371.25) = 55.69 \text{ kN/m}$$

$$T_{md} = P_i L_e / \Sigma L_e \qquad \Sigma L_e = 91.5 \text{ m} \quad (17 \text{ 层位})$$

8 第1层(z = 0.6 m, L_e = 4.50 m)：筋材拉断力与拔出

$$T_{md} = 55.69(4.50)/91.5 = 2.739 \text{ kN} \qquad T + T_{md} = 2.54 + 2.739 = 5.283 \text{ kN}$$

$$P_{r,E} = 0.8(4.855) = 3.884 \text{ kN} \quad (F^* \text{ 静力值的80\%})$$

$$FS_{P,E} = 3.884/5.283 = \mathbf{0.735} \; < 1.125 \quad ✗$$

9 第17层（底部，L_e = 7.50 m）：筋材拉断

$$T_{md} = 55.69(7.50)/91.5 = 4.565 \text{ kN} \qquad FS_{B,E} = 85.5/(30.84 + 4.565) = \mathbf{2.415} \; \geq 1.35 \; ✓$$

解答 (4/4)

解答

10 结果小结(k_h = 0.15)

验算	静力	地震	要求值（静力/地震）	判定（地震）
筋材拉断FS_B（最小）	2.77	2.41	1.80 / 1.35	满足
拔出FS_P（最小值）	1.91	**0.74**	1.50 / 1,125	**不满足**（第1级）
抗倾覆FS_{ot}	6.50	3.00	2.00 / 1.50	满足
偏心距e (m)	0.58	1.25	≤ 1.25 / ≤ 2.50	满足
抗滑移FS_{sl}	1.95	**1.118**	1.50 / 1,125	**不满足**（临界状态）
地基承载力FS_{bc}	11.32	8.13	2.50 / 1,875	满足

地震使**抗拔出($FS_{P,E}$ = 0.74)和抗滑移($FS_{sl,E}$ = 1.12)**降至要求值以下；抗倾覆、偏心距、承载力和筋材拉断验算均满足要求。上部各层筋材的拉力虽小，但σ'_V也小，因此**拔出是最薄弱的环节**：应加大筋材长度（算例10）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

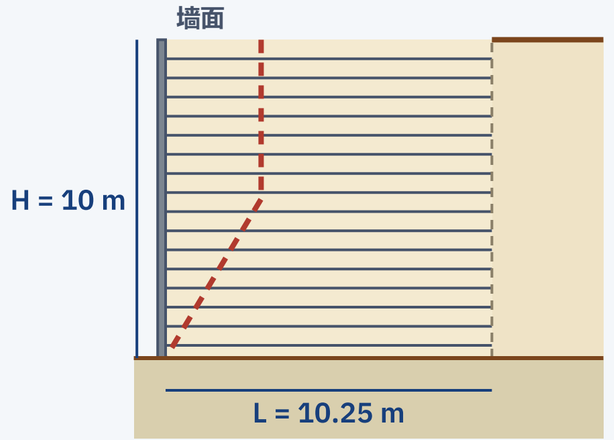
算例

已知条件

初始	**算例9：地震下抗拔出($FS_{P,E} = 0.74$)和抗滑移($FS_{sl,E} = 1.12$)不足**
变量	**筋带长度L（以0.25 m为步长递增）；S_V、S_H、筋带截面和填土均保持不变**

求

最小L：须满足地震验算($FS_{P,E} \geq 1.125$; $FS_{sl,E} \geq 1.125$; $e \leq L/3$)；**L表。**



解答 (1/2)

解答

1 安全系数随桩长增加的变化（粗体：低于要求值）

L (m)	$FS_{P,E}$ (≥ 1,125)	$FS_{sl,E}$ (≥ 1,125)	e_E / (L/3) (m)	静力FS_P	静力FS_{sl}	静力FS_{bc}
7.5	**0.735**	**1.118**	1.25 / 2.50	1.91	1.95	11.32
8.5	**0.884**	1.267	1.10 / 2.83	2.33	2.21	12.65
9.5	**1.033**	1.416	0.99 / 3.17	2.76	2.47	13.87
10.5	1.182	1.565	0.89 / 3.50	3.18	2.73	15.02
11.5	1.331	1.715	0.82 / 3.83	3.60	2.99	16.11
12.5	1.480	1.864	0.75 / 4.17	4.03	3.25	17.16

L = 7.5 m时，拔出(0.74)和抗滑移(1.12)均不满足要求；**拔出起控制作用**：即使L = 9.5 m，仍为1.03 < 1.125。随着长度增加，有效长度L_e（拔出）和块体重量（抗滑移、偏心距）均增大。

解答 (2/2)

解答

2 按0.25 m步长取最小长度：L = 10.25 m

$$FS_{P,E} = 1.145 \ \geq 1.125 \ \checkmark \qquad FS_{sl,E} = 1.528 \ \geq 1.125 \ \checkmark$$

$$e_E = 0.916 \ \leq \frac{L}{3} = 3.42 \text{ m} \ \checkmark \qquad FS_{ot,E} = 5.60 \quad FS_{bc,E} = 12.48$$

3 采用该长度的静力工况（验算）

$$FS_P = 3.07 \quad FS_{sl} = 2.67 \quad FS_{ot} = 12.14 \quad e = 0.422 \text{ m} \quad FS_{bc} = 14.74$$

地震作用下需要**L = 10.25 m**(≈ 1.02 H)；在此筋长下静力安全系数很高。同样的结果也可通过加密筋材（S_V、S_H）或采用更宽的条带/涂层筋材来实现；筋长是最直接的影响因素。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

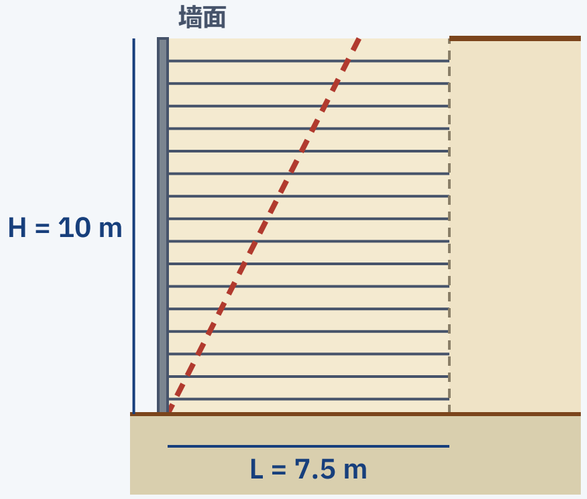
算例

已知条件

土工格栅	$T_{ult} = 150$ kN/m；$RF_{id} = 1.2$，$RF_{cr} = 2.5$，$RF_{cbd} = 1.25$；**路面**$C_r = 0.8$；$S_V = 0.6$ m
拔出	$F^* = \frac{2}{3}\tan 36°$，$\alpha = 0.8$；**Rankine破裂面(**$K_r = K_a$**)**；$FS_B \geq 1.8$，$FS_P \geq 1.5$

求

T_{all}, T_{cap}, T_{max}（每延米墙长），**FS_B**，所需的S_V；第1层的**FS_P**和L_{req}。



解答 (1/2)

解答

1 长期强度与承载能力

$$RF = 1.2(2.5)(1.25) = 3.75 \qquad T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF} = \frac{150}{3.75} = 40.0 \text{ kN/m}$$

$$T_{diameter} = T_{all} C_r = 40.0(0.8) = 32.0 \text{ kN/m}$$

2 筋材拉力与拉断($K_r = K_a$)

$$\sigma'_h(H) = K_a(165) = 42.84 \text{ kPa} \qquad T_{max} = 42.84(0.6) = 25.70 \text{ kN/m}$$

$$FS_B = \frac{32.0}{25.70} = \mathbf{1.245} < 1.8 \ \text{✗} \qquad S_{V,req} = \frac{T_{all} C_r}{\sigma'_h FS_B} = \frac{32.0}{42.84(1.8)} = \mathbf{0.415} \text{ m}$$

已布置的间距(0.6 m)过大：筋材拉断安全系数为1.25 < 1.8；所需间距为**$S_V \le 0.415$ m**（或采用强度更高的土工格栅）。

解答 (2/2)

解答

3 层位1 (z = 0.6 m)：Rankine面

$$L_a = (H - z)/\tan 63^\circ = 4.79 \text{ m} \qquad L_e = 7.5 - 4.79 = 2.71 \text{ m}$$

$$\sigma_h' = K_a(9.9) = 2.57 \text{ kPa} \qquad T = 2.57(0.6) = 1.542 \text{ kN/m}$$

4 拔出（每延米墙长，$R_c = C_r = 0.8$）

$$F^* = \tfrac{2}{3}\tan 36^\circ = 0.4844$$

$$P_r = 2C_r F^* \alpha \sigma_v' L_e = 2(0.8)(0.4844)(0.8)(9.9)(2.71) = 16.64 \text{ kN/m}$$

$$FS_P = 16.64/1.542 = \mathbf{10.79} \ \geq 1.5 \ \checkmark \qquad L_{req} = L_a + \frac{1.5\,T}{2C_r F^* \alpha \sigma_v'} = \mathbf{5.17} \text{ m}$$

土工合成材料的拔出验算裕度充足(FS_P = 10.79)，所需长度遵循Rankine土楔：**L_{req} = 5.17 m**(< 7.5 m)。起控制作用的是**筋材拉断**：通过设计强度和间距来调整。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

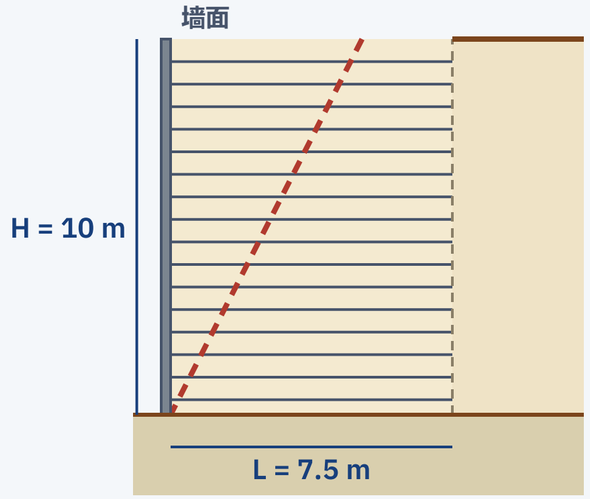
算例

已知条件

墙	**H = 10 m，L = 7.5 m，$S_V = 0.6$ m；填土 $\varphi_1' = 36°$；地基土相同**
工况	**简化方法、原文献的Rankine方法、活荷载、条形荷载、土工格栅、短筋材**

求

将七种情形的**安全系数**并列写出，并分析其差异。



解答

解答

1 同一堵墙，七种工况（静力）

状态	FS_B	FS_P	L_{req} (m)	FS_{ot}	e (m)	FS_{sl}	FS_{bc}
初始设置：简化法，土条，L = 7.5 m	2.77	1.91	6.54	6.50	0.58	1.95	11.32
文献的Rankine方法（相同的条形荷载）	3.33	1.90	6.93	6.50	0.58	1.95	11.32
Rankine方法，L = 13.5 m	3.33	6.09	6.93	21.06	0.32	3.51	18.18
活载超载q_L = 20 kPa	2.47	0.63	13.68	4.77	0.79	1.57	9.54
条形荷载60 kPa (a′ = 2 m, b′ = 1 m)	2.74	1.32	8.13	3.66	1.14	1.55	7.87
土工格栅150 kN/m (Rankine, α = 0.8)	1.25	10.79	5.17	6.50	0.58	1.95	11.32
筋带L = 7 m (0.7H)	2.77	1.70	6.54	5.66	0.62	1.82	10.60

Rankine方法在墙底采用K_a：拉力较小(T_{max} 25.7 kN)，筋材拉断安全系数较高(3.33)，但顶部所需的筋长为6.93 m。**活荷载**使每一项安全系数降低（FS_P 0.63：在荷载作用下无法维持稳定）；**条形荷载**使其降低较少(FS_P 1.32)，因为它以重量的形式作用于块体上方，起抵抗作用。土工格栅的拔出安全系数充裕，**筋材拉断起控制作用**(FS_B 1.25)。L = 7 m时，加筋带仍然满足要求(FS_P 1.70, e = 0.62 m)。

在GeoTerva中验算解答 ↗

解答范围

理论

填土为自由排水的散粒土（无孔隙水压力）；墙内或墙后的地下水以及墙顶以上的倾斜墙后填土**均不存在**。

筋材层位位于深度S_V、$2S_V$、…处；单一筋材长度、梯形断面以及不同长度的层位均不模拟。钢筋/钢丝网($K_r/K_a \geq 2.5$)以及肋纹钢带随深度变化的F*值不在范围内。

荷载：分布超载（永久/活荷载）和条形荷载（Laba–Kennedy法；叠加）。集中荷载和线荷载不纳入模型。

墙面面层不承担荷载；仅在输入强度时，才用拉断安全系数验算连接；面层前方的埋入部分不计入。

未验算的内容：整体与复合稳定性（边坡稳定性分析）、沉降与差异沉降、排水、面层、施工工况。

各项验算采用**容许应力**形式（总体安全系数）；不采用AASHTO LRFD/GEC 11的荷载和抗力系数。对于重要的墙，还应另行核查产品数据、整体稳定性并计算沉降。

小结

要点回顾

加筋土：土压力由筋材拉力承担，并靠摩擦使筋土共同工作。内部稳定性：筋材拉断、拔出、（连接）；外部稳定性：对L × H土块验算抗倾覆、抗滑移、地基承载力

应力：$\sigma'_h = K_r\sigma'_v$；筋带中$K_r/K_a = 1.7 \rightarrow 1.2$（至6 m深），土工合成材料中为1。**拉力**$T = \sigma'_h S_V S_H$；最大拉力位于底部

筋材拉断：$T_{cap} = w(t - rn)f_y$（条带）或$T_{all}C_r$（土工合成材料）；**拔出**：$P_r = 2R_cF^*\alpha\sigma'_vL_e$，$L_e$位于破裂面（双线性/Rankine）之后

外部验算：FS_{ot}，$e \le L/6$，$FS_{sl} = \Sigma V \tan(\tfrac{2}{3}\varphi'_{min})/\Sigma H$，地基承载力（文献法与取$L' = L - 2e$的Meyerhof法，取较小者）

活荷载起加载作用，不起抗力作用：它增大拉力和推力，不计入拔出和重量；算例中FS_P由1.91降至0.63

地震：ΔP_{AE}（取其一半，作用于0.6H），P_{IR}，$P_i \rightarrow T_{md}$；所需FS为静力工况的75%；算例墙在**拔出(0.74)和抗滑移(1.12)**验算中不满足，取L = 10.25 m时满足

土工格栅：$T_{all} = T_{ult}/(RF_{id}RF_{cr}RF_{cbd})$；控制条件为筋材拉断($S_{V,req}$ = 0.415 m)，拔出方面富余较多

参考文献

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston. Chapter 13, Sections 13.10 to 13.17: soil reinforcement, the design of walls with metallic strips, geotextiles and geogrids; Table 4.2 for the bearing capacity factors.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Vol. I, FHWA-NHI-10-024. Federal Highway Administration, Washington, D.C.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed., Section 11.10, Mechanically stabilized earth walls.

Vidal, H. (1966). La terre armée. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, July–August, 888–938.

Laba, J.T. and Kennedy, J.B. (1986). Reinforced earth retaining wall analysis and design. Canadian Geotechnical Journal, 23(3), 317–326.

Koerner, R.M. (2005). Designing with Geosynthetics, 5th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Binquet, J. and Lee, K.L. (1975). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT12), 1257–1276.

Martin, J.P., Koerner, R.M. and Whitty, J.E. (1984). Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles and soils. Proceedings, International Conference on Geomembranes, Denver, 191–196.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings, 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).

Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM1), 45–73.

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同样是这道墙（H = 10 m，镀锌钢带75 × 6 mm，L = 7.5 m，S_V = 0.6 m，S_H = 1.0 m）。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

在GeoTerva中输入墙高、筋材（条带、土工格栅、土工织物）、填料、超载和地震系数；模块一并给出各层筋材拉断和拔出的安全系数、加筋体的外部稳定验算和所需筋长。

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