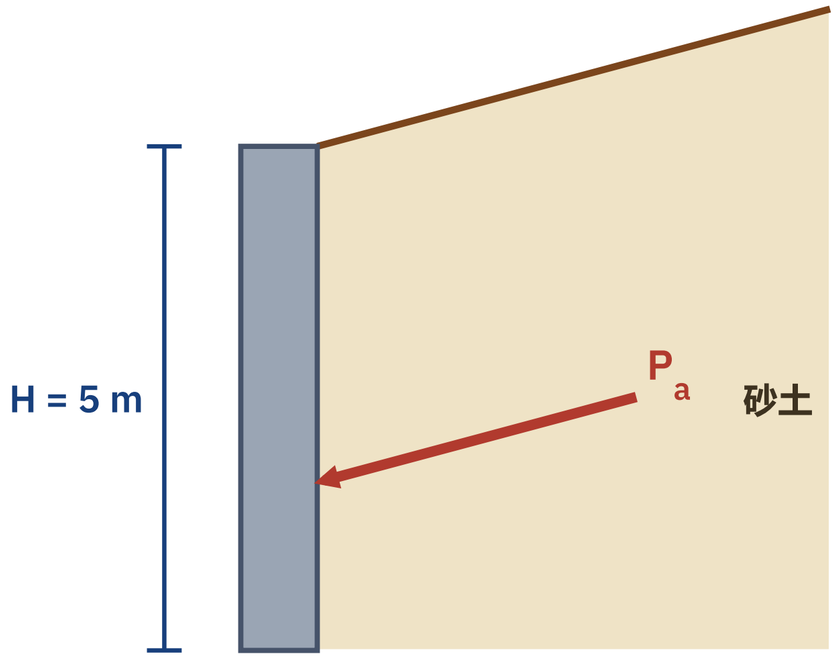
岩土工程课程讲义 · 侧向土压力

Rankine：倾斜填土与倾斜墙背

讲义：填土表面倾斜或墙面倾斜时的Rankine解；压力平行于填土表面、K系数、黏性土填土与分层填土；每个主题均有工程算例。

倾斜填土 | 主动与被动 | 倾斜墙 · Chu (1991) | 黏性填土 | 分层填土



引言

本讲内容

- 填土表面倾斜时土压力**平行于表面**这一特点，以及K_a和K_p随α变化的原因
- 关系式$K_aK_p = \cos^2\alpha$和**α ≤ φ′**的限值
- 倾斜墙+倾斜填土情形的**Chu (1991)**解：ψ、$K_{(R)}$、β和η
- 确定力的**大小、方向(β)和作用位置**；分解其水平分量和竖向分量
- 黏性填土中的曲线形压力分布图、受拉区深度，以及**不排水黏土**中边坡的稳定条件
- 在平行于地表的土层中，每层采用各自的K

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

各力均为墙每延米的值(kN/m)；α和θ以度为单位，压力以kPa为单位。墙背无摩擦。

压力平行于地表

理论

墙后无黏性土填土的表面与水平面成α角时，Rankine压力不再是水平的：它们**平行于填土表面**，即与水平方向成α角倾斜，并仍随深度线性增大：

$$K_a = \cos\alpha \frac{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}} \qquad P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

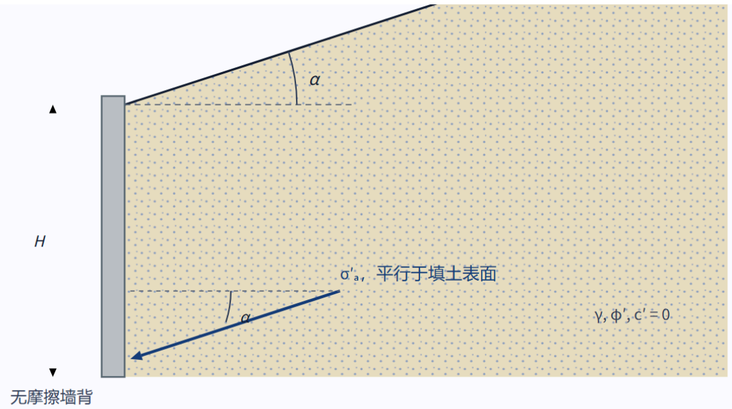
$$K_p = \cos\alpha \frac{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}} \qquad P_p = \tfrac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

两个力均作用于底面以上**H/3**处，并与水平方向成α角：$P_h = P\cos\alpha$，$P_v = P\sin\alpha$。

当α = 0时，方程退化为$\tan^2(45° \mp \varphi'/2)$。

乘积**$K_a K_p = \cos^2\alpha$**；α = 0时为1。

倾斜填土



K_a和K_p – α和φ′

理论

主动K_a

α \ φ′	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
0°	0.3610	0.3333	0.3073	0.2827	0.2596	0.2379	0.2174
5°	0.3656	0.3372	0.3105	0.2855	0.2620	0.2399	0.2192
10°	0.3802	0.3495	0.3210	0.2944	0.2696	0.2464	0.2247
15°	0.4086	0.3729	0.3405	0.3108	0.2834	0.2581	0.2346
20°	0.4605	0.4142	0.3739	0.3381	0.3060	0.2769	0.2504
25°	0.5727	0.4936	0.4336	0.3847	0.3431	0.3070	0.2750

被动K_p

α \ φ′	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
0°	2.770	3.000	3.255	3.537	3.852	4.204	4.599
5°	2.715	2.943	3.196	3.476	3.788	4.136	4.527
10°	2.551	2.775	3.022	3.295	3.598	3.936	4.316
15°	2.284	2.502	2.740	3.002	3.293	3.615	3.977
20°	1.918	2.132	2.362	2.612	2.886	3.189	3.526
25°	1.434	1.664	1.894	2.135	2.394	2.676	2.987

题目

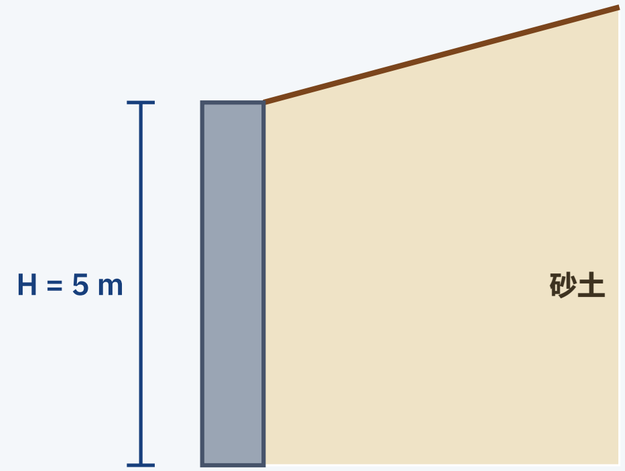
算例

已知条件

墙	$H = 5$ m，**竖直，光滑**
填土	**干砂：** $\gamma = 18$ kN/m^3，$\varphi' = 30^\circ$，**地表坡度** $\alpha = 15^\circ$

求

K_a、P_a、作用点高度和方向；水平分量与竖向分量；与水平填土情形的比较。



解答

解答

1 系数：cos 15° = 0.9659；√(cos²α − cos²φ′) = √(0.9330 − 0.75) = 0.4278

$$K_a = \cos\alpha\,\frac{\cos\alpha - r}{\cos\alpha + r} = 0.9659\,\frac{0.5381}{1.3937} = \mathbf{0.3729}$$

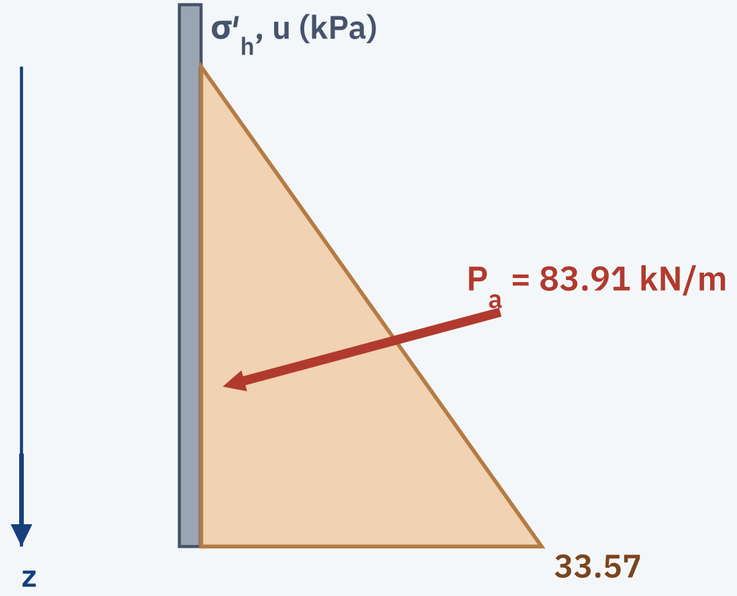
2 压力作用于底面（平行于地表）

$$\sigma'_a(5) = K_a\gamma H = 0.3729(18)(5) = \mathbf{33.57}\ \text{kPa}$$

3 力、位置与分量

$$P_a = \tfrac{1}{2}(33.57)(5) = \mathbf{83.91}\ \text{kN/m} \qquad \bar{z} = \tfrac{5}{3} = 1.67\ \text{m}$$

$$P_h = P_a\cos 15^\circ = 81.05 \qquad P_v = P_a\sin 15^\circ = 21.72\ \text{kN/m}$$



P_a = **83.91 kN/m**，与水平面成15°角，位于底面以上1.67 m处。水平填土时P_a = 75.00 kN/m：坡度使该力增大12%。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

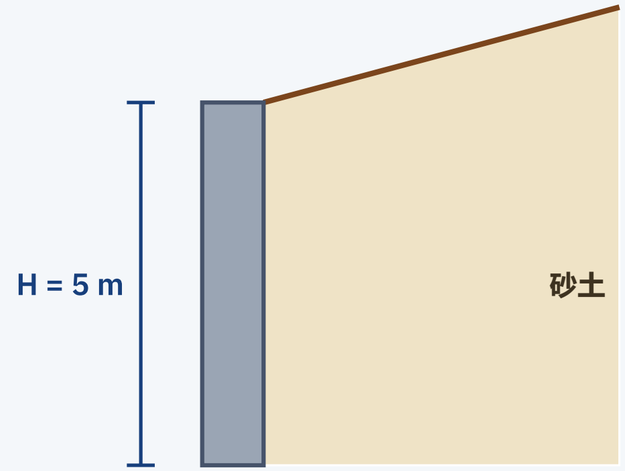
已知条件

墙与填土

算例1中的墙与填土： $H = 5\ \text{m}$，$\gamma = 18\ \text{kN/m}^3$，$\varphi' = 30^\circ$，$\alpha = 15^\circ$

求

K_p、P_p及其分量；与水平填土中被动土压力的比较。



γ = 18 kN/m³，φ′ = 30°，α = 15°（被动）

解答

解答

1 系数(r = 0.4278)

$$K_p = \cos\alpha \frac{\cos\alpha + r}{\cos\alpha - r} = 0.9659 \frac{1.3937}{0.5381} = \mathbf{2.5017}$$

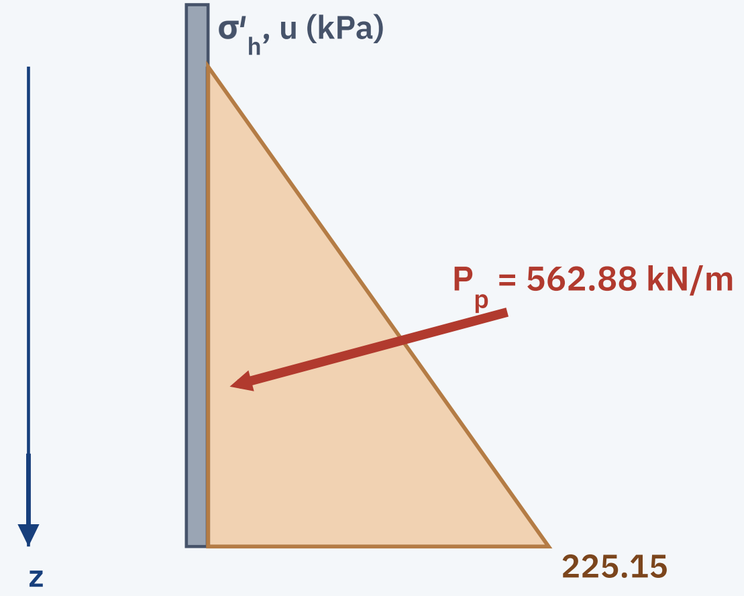
2 底部压力与作用力

$$\sigma'_p(5) = K_p \gamma H = 2.5017(18)(5) = 225.15 \text{ kPa}$$

$$P_p = \tfrac{1}{2}(225.15)(5) = \mathbf{562.9} \text{ kN/m} \qquad \bar{z} = 1.67 \text{ m}$$

3 分量（与水平方向成15°）

$$P_h = P_p \cos 15^\circ = 543.7 \qquad P_v = P_p \sin 15^\circ = 145.7 \text{ kN/m}$$



P_p = **562.9 kN/m**。填土水平时为675.0 kN/m：坡度使被动抗力**降低**17%（而主动力增大）。$K_a K_p$ = 0.9330 = $\cos^2 15°$的验算得到满足。

在GeoTerva中验算解答 ↗

α ≤ φ′的条件

理论

根式仅当**cos²α ≥ cos²φ′**，即α ≤ φ′时才为实数：比φ′更陡的边坡在无黏性土中无法自稳。在极限状态下根式为零，两个系数趋于同一值：

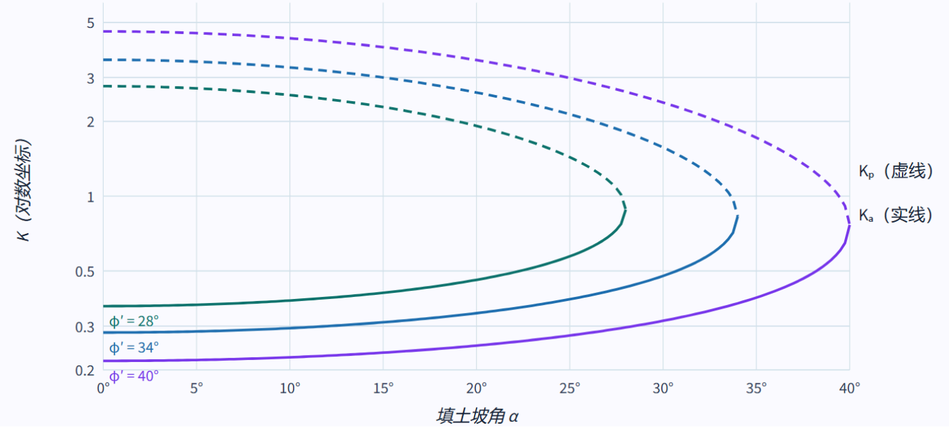
$$\alpha = \varphi' : \qquad K_a = K_p = \cos\varphi'$$

α增大时，K_a增大，K_p减小；二者在α = φ′处重合（主动与被动状态无法区分）。

这是土体处于天然休止角（堆积角）时的状态：填土已处于临界破坏状态，墙体的位移不会改变土压力。

当α > φ′时无解；模块给出警告。

K – α（对数坐标；φ′ = 28°，34°，40°）



题目

算例

已知条件

土	**无黏性砂土，** $\varphi' = 32^\circ$
坡度	$\alpha = 0^\circ,\ 10^\circ,\ 20^\circ,\ 30^\circ,\ 32^\circ$ **（及** 33°**）**

求

每一坡度对应的K_a、K_p及其乘积；极限处的值；α = 33°时的结果。

解答

解答

1 各坡度的方程(φ′ = 32°; cos 32° = 0.8480)

α	K_a	K_p	K_aK_p	$\cos^2\alpha$
0°	0.3073	3.255	1.0000	1.0000
10°	0.3210	3.022	0.9698	0.9698
20°	0.3739	2.362	0.8830	0.8830
30°	0.5741	1.306	0.7500	0.7500
32°	0.8480	0.848	0.7192	0.7192

2 界限：α = φ′ = 32°和α = 33°

$$\alpha = 32^\circ:\ \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'} = 0 \ \Rightarrow\ K_a = K_p = \cos 32^\circ = \mathbf{0.8480}$$

$$\alpha = 33^\circ:\ \cos^2 33^\circ - \cos^2 32^\circ < 0 \ \Rightarrow\ \text{无实根}$$

随α增大，K_a由0.307增至0.574，K_p由3.25降至1.306；对每一个α均有$K_aK_p = \cos^2\alpha$。当α = φ′ = 32°时，二者都等于cos φ′ = 0.848；α = 33°时**无解**（边坡过陡）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

倾斜墙背与倾斜填土：主动土压力

理论

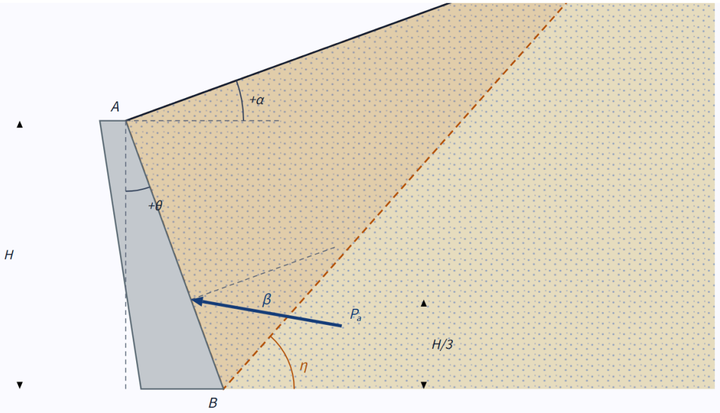
若墙面与竖直方向成θ角、填土表面与水平方向成α角（二者如图中所示均为正；墙背光滑），则按Chu (1991)解可求得合力的**大小和方向**：

$$\psi_a = \sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'} - \alpha + 2\theta$$

$$K_{a(R)} = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' - 2\sin\varphi'\cos\psi_a}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha + \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

$$P_a = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{a(R)} \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{\sin\varphi'\sin\psi_a}{1-\sin\varphi'\cos\psi_a}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'}$$



β：力与墙面法线的夹角；力作用于距底面**H/3**的高度处。**η**：滑动土楔底面BC与水平面的夹角。

θ = 0时，$K_{a(R)}$退化为倾斜填土公式（式1），而β退化为α。

被动状态下符号发生变化

理论

在被动状态下，同一几何条件的符号相应改变：

$$\psi_p = \sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'} + \alpha - 2\theta \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{\sin\varphi'\sin\psi_p}{1+\sin\varphi'\cos\psi_p}$$

$$K_{p(R)} = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' + 2\sin\varphi'\cos\psi_p}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha - \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2}\sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'} \qquad P_p = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{p(R)}$$

合力作用于底面以上H/3处。墙面与地表以90° − |α − θ|的夹角相交；该角闭合时，墙体沿坡面延伸，作用于墙面的是上方土体的重量；模块接受|α − θ| ≤ 75°的情形。

题目

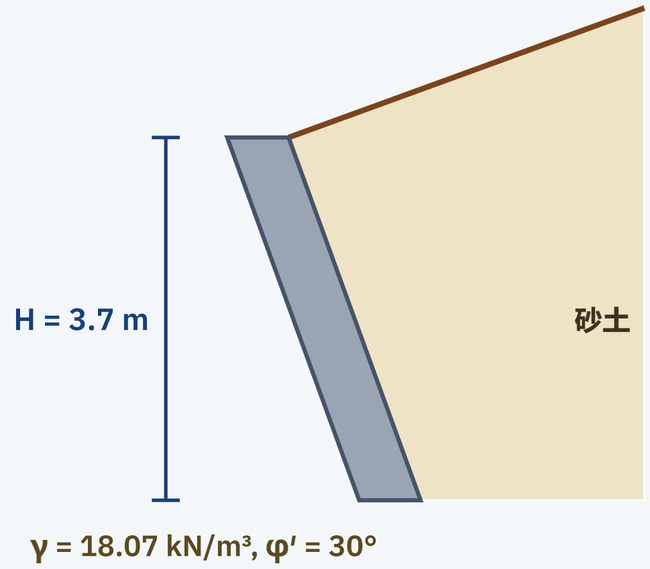
算例

已知条件

墙	**无摩擦；墙面自竖直方向倾斜**$\theta = +20^\circ$**；** $H = 3.658$ **m (12 ft)**
填土	**干砂：** $\gamma = 18.07$ kN/m^3 **(115 pcf)，** $\varphi' = 30^\circ$**；地表坡度**$\alpha = +20^\circ$

求

ψ_a、$K_{a(R)}$、P_a、β、η及作用点高度。模块默认载入该挡土墙。



解答 (1/2)

解答

1 辅助角与ψ_a

$$\sin^{-1}\frac{\sin 20^\circ}{\sin 30^\circ} = 43.16^\circ$$

$$\psi_a = 43.16^\circ - 20^\circ + 2(20^\circ) = \mathbf{63.16^\circ}$$

2 系数$K_{a(R)}$

$$\sqrt{1+\sin^2 30^\circ - 2\sin 30^\circ \cos 63.16^\circ} = 0.8936 \qquad \cos^2 20^\circ = 0.8830$$

$$\sqrt{\sin^2 30^\circ - \sin^2 20^\circ} = 0.3647$$

$$K_{a(R)} = \frac{\cos 0^\circ\,(0.8936)}{0.8830\,(0.9397+0.3647)} = \mathbf{0.776}$$

解答 (2/2)

解答

3 力及其位置

$$P_a = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{a(R)} = \tfrac{1}{2}(18.07)(3.658)^2(0.7758) = \mathbf{93.79}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z} = \tfrac{H}{3} = \mathbf{1.219}\ \text{m}$$

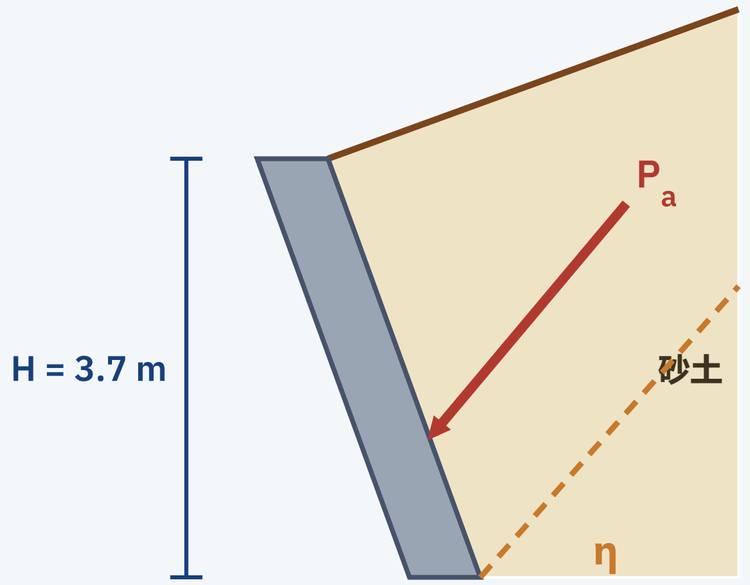
4 走向β与土楔角η

$$\beta = \tan^{-1}\frac{\sin 30^\circ \sin 63.16^\circ}{1 - \sin 30^\circ \cos 63.16^\circ} = \mathbf{29.95^\circ}\ (\approx 30^\circ)$$

$$\eta = 45^\circ + 15^\circ + 10^\circ - \tfrac{1}{2}(43.16^\circ) = \mathbf{48.42^\circ}$$

5 分量（垂直于该面和平行于该面）

$$N = P_a \cos\beta = 81.27 \qquad T = P_a \sin\beta = 46.83\ \text{kN/m}$$



P_a = **93.79 kN/m**（美制单位为6,424 lb/ft），与墙面法线夹角**30.0°**，作用点距底面H/3 = 1.22 m。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

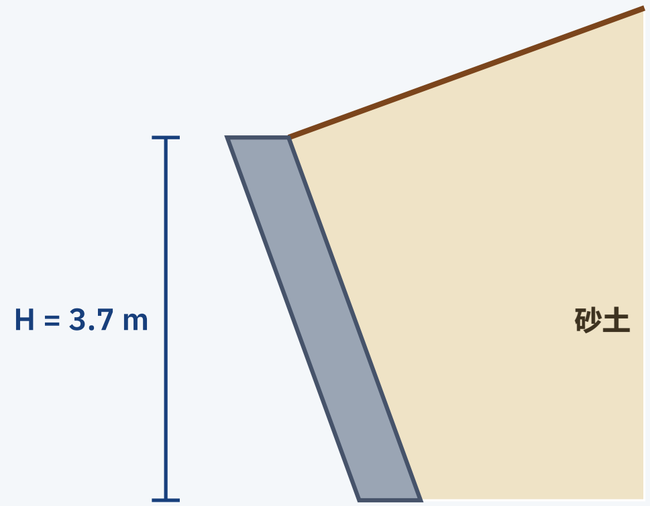
算例

已知条件

墙与填土	**算例4中的墙体与填土：** $\theta = +20^\circ$, $\alpha = +20^\circ$, $\varphi' = 30^\circ$, $\gamma = 18.07\ \text{kN/m}^3$, $H = 3.658\ \text{m}$

求

ψ_p、$K_{p(R)}$、P_p、β和η；与主动状态的比较。



γ = 18.07 kN/m³，φ′ = 30°（被动）

解答

解答

1 ψ_p与$K_{p(R)}$

$$\psi_p = 43.16^\circ + 20^\circ - 2(20^\circ) = \mathbf{23.16^\circ}$$

$$K_{p(R)} = \frac{\cos 0^\circ \sqrt{1 + \sin^2 30^\circ + 2 \sin 30^\circ \cos 23.16^\circ}}{\cos^2 20^\circ \left(\cos 20^\circ - \sqrt{\sin^2 30^\circ - \sin^2 20^\circ}\right)} = \mathbf{2.901}$$

2 力、方向和土楔角

$$P_p = \tfrac{1}{2}(18.07)(3.658)^2(2.9010) = \mathbf{350.7}\ \text{kN/m}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sin 30^\circ \sin 23.16^\circ}{1 + \sin 30^\circ \cos 23.16^\circ} = \mathbf{7.67^\circ} \qquad \eta = \mathbf{61.58^\circ}$$

P_p = **350.7 kN/m**，β = 7.7°；同一堵墙的主动土压力合力为93.79 kN/m（比值3.7）。被动状态下合力几乎垂直于墙面（β很小），而主动状态下则倾斜约30°。

在GeoTerva中验算解答 ↗

墙面倾角θ如何改变作用力?

理论

若保持填土坡角不变(α = 20°, φ′ = 30°)而仅转动墙面，则$K_{a(R)}$和β发生变化：

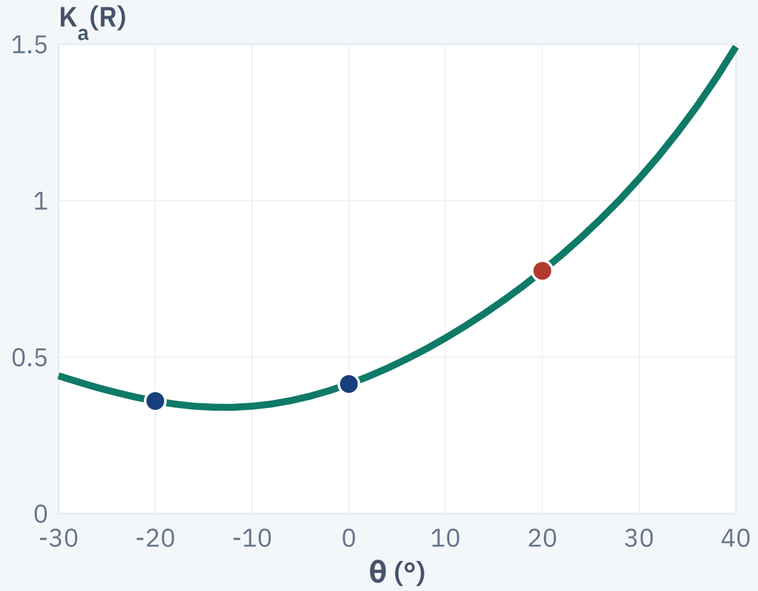
θ	$K_{a(R)}$	β
−20°	0.360	-15.5°
0°	0.414	20.0°
+20°	0.776	30.0°

θ为正时（墙面向填土上方倾斜），填土位于墙面之上，土压力合力增大；θ为负时则减小。

θ = 0且α = 20°时，β = α = 20°：合力平行于地表。

$K_{(R)}$同时包含力**平行于和垂直于墙面**的两个分量；仅求水平分量时，取P cos(β + θ)。

$K_{a(R)}$ – θ (α = 20°, φ′ = 30°)



Mazindrani和Ganjali (1997)

理论

墙背竖直光滑、填土表面倾角为α的c′–φ′土，深度处的主动土压力：

$$\sigma'_a = \gamma z\, K'_a \cos\alpha \qquad r = \frac{c'}{\gamma z}$$

$$K'_a = \frac{2\cos^2\alpha + 2r\cos\varphi'\sin\varphi' - \sqrt{D}}{\cos^2\varphi'} - 1$$

$$D = 4\cos^2\alpha\left(\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'\right) + 4r^2\cos^2\varphi' + 8r\cos^2\alpha\sin\varphi'\cos\varphi'$$

$$z_c = \frac{2c'}{\gamma}\sqrt{\frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'}}$$

平行于地表面的压力

与无黏性土情形相同，土压力**平行于**表面作用，即与水平面成α角；力在墙面法向上的分量为P cos α。

K'_a通过c′/γz与深度相关：压力**非线性分布**；在地表以上为负值，拉裂缝深度z_c与倾角无关。

被动状态下，根号前的符号变为+。α = 0 → Rankine ($\sigma'_a = K_a\gamma z - 2c'\sqrt{K_a}$)；c′ = 0 → 式1。

考虑拉裂缝的计算中对z_c以下部分积分，无裂缝时对全高积分；仅适用于θ = 0。

题目

算例

已知条件

墙	$H = 5$ m，**竖直，光滑**
填土	$\gamma = 18$ kN/m^3，$\varphi' = 25°$，$c' = 10$ **kPa；地表坡度**$\alpha = 10°$

求

z_c、底部压力、有裂缝与无裂缝时的P_a及作用点高度；与水平填土的比较。

解答 (1/2)

解答

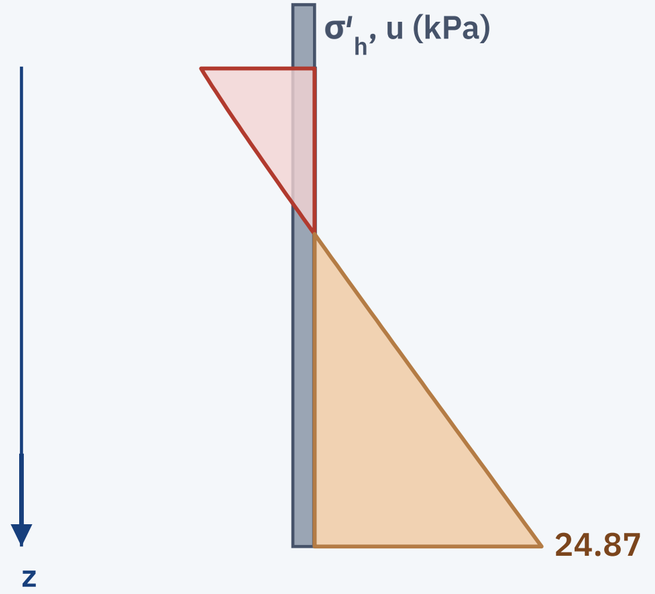
1 拉裂缝深度（与坡度无关）

$$z_c = \frac{2(10)}{18}\sqrt{\frac{1+\sin 25^\circ}{1-\sin 25^\circ}} = 1.111(1.5697) = \mathbf{1.744}\ \text{m}$$

2 底部(z = 5 m)：r = c′/γz = 10/(18·5) = 0.1111

$$D = 0.9467 \qquad K_a' = 0.2806$$

$$\sigma_a'(5) = \gamma z K_a' \cos\alpha = 18(5)(0.2806)\cos 10^\circ = \mathbf{24.87}\ \text{kPa}$$



解答 (2/2)

解答

3 考虑拉裂缝时的力（曲线形压力图在z_c至H区间的面积，数值积分）

$$P_a = \int_{z_c}^{H} \sigma'_a \, dz = \mathbf{40.33}\ \text{kN/m} \quad （平行于地表，10°）$$

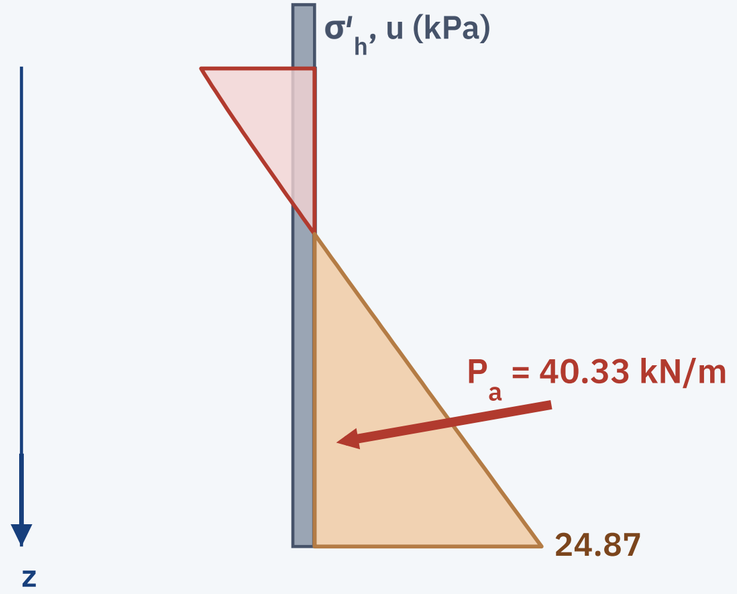
$$\bar{z} = 1.08\ \text{m} \quad （自底部）$$

4 对比

无裂缝：$P_a = 29.16$ kN/m

水平填土：$P_a = \frac{1}{2}(23.79)(3.256) = 38.72$ kN/m

有裂缝时的力为**40.33 kN/m**，比无裂缝时大38%；与水平填土(38.72 kN/m)相比，坡度使该力增大了4%。含裂缝的数值即为设计值。



在GeoTerva中验算解答 ↗

平行于地表的土层

理论

若填土由**与地表平行**的土层组成（墙后的竖向钻孔在各处所揭露的层厚相同），则在其上覆土重$\sigma'_v = \Sigma\gamma_i h_i$作用下，每一土层按各自的γ、φ′和c′值进行计算：

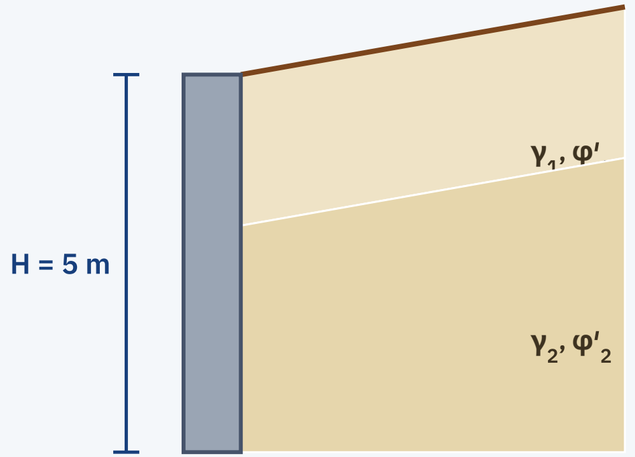
$$\sigma' = \sigma'_v \frac{K_{(R)}\cos\theta}{1+\tan\theta\tan\alpha} \qquad \theta = 0:\ \sigma' = \sigma'_v K_{(R)}$$

由于K在土层分界面处改变，压力**发生突变**；各土层的力分解为垂直于墙面的分量N_i和平行于墙面的分量T_i；$P = \sqrt{(N^2 + T^2)}$，$\beta = \tan^{-1}(T/N)$。

超载q视为地表处重量为q/cos α的一层土，叠加到σ'_v上；**水**位以下采用γ′，u垂直作用于墙面。

这是模块将Chu和Mazindrani–Ganjali的解推广到分层土的做法（文献中不存在分层土的闭式解）；对于单一土层，其结果与闭式解的偏差在10^{-8}以内。

平行于地表的土层



题目

算例

已知条件

墙	$H = 5$ m，**竖直，光滑**
填土	**地表坡度**$\alpha = 10^\circ$**；两层土平行于地表（竖向厚度）**
土层1(2 m)	$\gamma = 17$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$
土层2(3 m)	$\gamma = 19$ kN/m^3, $\varphi' = 35^\circ$

求

各土层中的压力、**P**、**N**、**T**和作用高度。

解答 (1/2)

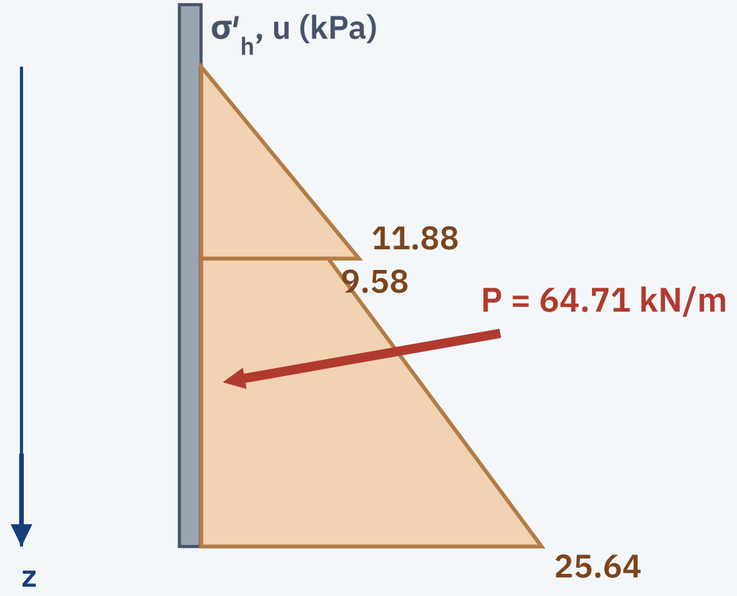
解答

1 系数(α = 10°)

$$K_1(30^\circ) = \mathbf{0.3495}$$
$$K_2(35^\circ) = \mathbf{0.2818}$$

2 竖向应力：分界处17(2) = 34；底部34 + 19(3) = 91 kPa

$$\sigma_1' = 0.3495(34) = \mathbf{11.88}\ \text{kPa}\ \text{（顶部）}$$
$$\sigma_2' = 0.2818(34) = \mathbf{9.58}\ \text{kPa}\ \text{（底部）}$$
$$\sigma'(5) = 0.2818(91) = \mathbf{25.64}\ \text{kPa}$$



解答 (2/2)

解答

3 各力（平行于地表）：上部三角形 · 下部矩形 · 下部三角形

$$P = \tfrac{1}{2}(2)(11.88) + 3(9.58) + \tfrac{1}{2}(3)(16.06) = 11.88 + 28.74 + 24.09 = \mathbf{64.71}\ \text{kN/m}$$

4 分量与作用高度

$$N = P\cos 10^\circ = 63.73 \qquad T = P\sin 10^\circ = 11.24\ \text{kN/m}$$

$$\beta = \tan^{-1}(T/N) = 10^\circ \qquad \bar{z} = \mathbf{1.71}\ \text{m}$$

P = **64.71 kN/m**，垂直于墙面的N = 63.73 kN/m；位于底面以上1.71 m处。在分界面处，压力11.88 → 9.58 kPa**下降**，因为下伏土层的φ′值较大；σ'_v则是连续的。

在GeoTerva中验算解答 ↗

坡面的稳定条件

理论

不排水黏土（$\varphi_u = 0$，c_u，总应力）适用同一关系式，取$\varphi' = 0$，$c' = c_u$：

$$K_a' = 2\cos^2\alpha - 2\sqrt{r^2 - \sin^2\alpha\cos^2\alpha} - 1 \qquad r = \frac{c_u}{\gamma z}$$

仅当**边坡保持稳定**时才有解：平行于坡面的平面上的剪应力不能超过黏聚力：

$$\tau = \gamma z \sin\alpha\cos\alpha \le c_u \;\Rightarrow\; z_{max} = \frac{c_u}{\gamma\sin\alpha\cos\alpha} \qquad z_c = \frac{2c_u}{\gamma}$$

模块对该条件一直验算至墙底；若墙高大于z_{max}，计算即停止。

$\alpha = 0$时，$\sigma_a = \gamma z - 2c_u$，拉裂缝深度为$2c_u/\gamma$。

为什么存在限值?

在倾斜表面以下，平行于表面的每个平面上的剪应力随深度增大；黏土能承受的该应力至多为c_u。在更大的深度处，边坡将在自重作用下滑动。

题目

算例

已知条件

填土	**饱和黏土，不排水：** $\gamma = 18$ kN/m^3, $c_u = 20$ **kPa；地表坡度** $\alpha = 15^\circ$
墙	$H = 4$ **m（及5 m），竖直，无摩擦**

求

z_{max}、z_c、底部压力以及考虑裂缝的P_a；H = 5 m时会怎样？

解答 (1/2)

解答

1 稳定界限与受拉深度

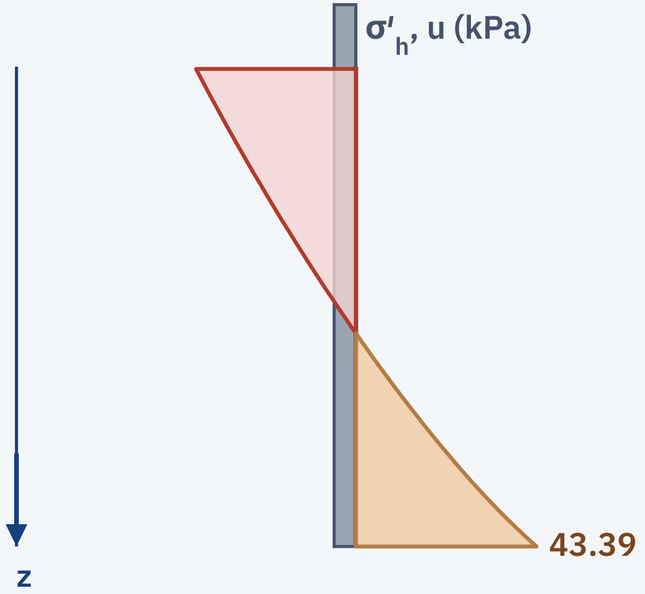
$$z_{max} = \frac{20}{18 \sin 15^\circ \cos 15^\circ} = \mathbf{4.44}\ \text{m}$$

$$z_c = \frac{2c_u}{\gamma} = \frac{40}{18} = \mathbf{2.22}\ \text{m}$$

2 H = 4 m：τ(4) = 18(4) sin15° cos15° = 18.0 ≤ 20 kPa：边坡稳定；坡底处r = 20/(18·4) = 0.2778

$$K_a' = 2\cos^2 15^\circ - 2\sqrt{r^2 - \sin^2 15^\circ \cos^2 15^\circ} - 1 = 0.6239$$

$$\sigma_a(4) = \gamma z K_a' \cos\alpha = 18(4)(0.6239)\cos 15^\circ = \mathbf{43.39}\ \text{kPa}$$



解答 (2/2)

解答

3 考虑拉裂缝的合力（自z_c至4 m）

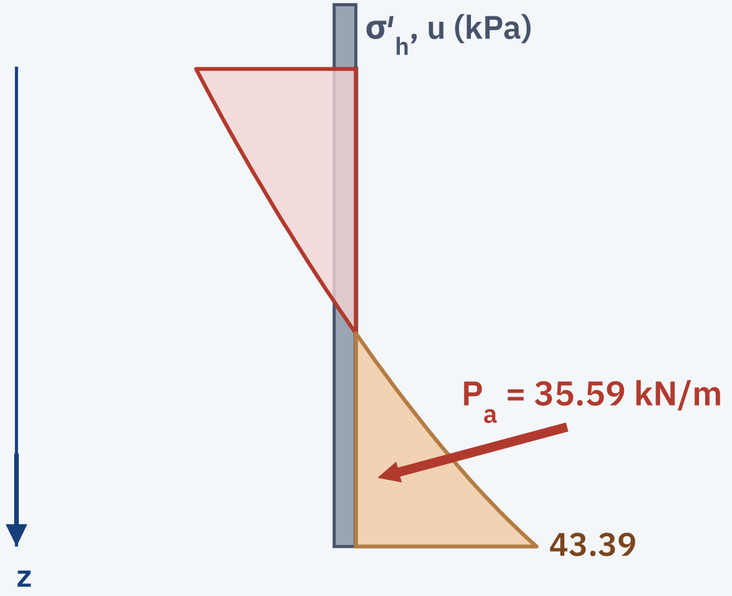
$$P_a = \int_{z_c}^{H} \sigma_a \, dz = \mathbf{35.59}\ \text{kN/m} \quad \text{（与水平面成15°）}$$

$$\bar{z} = 0.57\ \text{m} \qquad \text{无裂缝：}\ P_a = -9.37\ \text{kN/m}$$

4 H = 5 m: τ(5) = 22.5 kPa > c_u = 20 kPa

$$\tau(5) = 18(5)\sin 15^\circ \cos 15^\circ = 22.5 > c_u \ \Rightarrow\ \text{边坡滑动}$$

H = 4 m时，计入拉裂缝的P_a = **35.59 kN/m**；不计拉裂缝时的力为负值(−9.37 kN/m)，即拉裂缝假定起决定作用。因z_{max} = 4.44 m，故5 m高的墙无解。



在GeoTerva中验算解答 ↗

解答范围

理论

墙光滑；在Chu解中，压力按与墙面法线成β角给出（β仅来自土体自身的应力状态，而非墙土摩擦）。有摩擦的墙参见Coulomb模块。

填土为具有单一坡度的平面；各土层与地表平行。本解不包括地表坡度变化、台阶或折线形地表。

黏性填土仅对竖直墙(θ = 0)由Mazindrani–Ganjali给出；假定拉裂缝深度取至z_c，充水裂缝须另行考虑。

几何条件：墙面与地表的交角不得小于15°(|α − θ| ≤ 75°)；否则作用于墙面上的压力就不是侧向土压力，而是上覆土体的重量。

地震和**墙背摩擦**不在本模块范围之内(Mononobe–Okabe, Coulomb)。

小结

要点回顾

倾斜填土($\alpha \le \varphi'$)：压力**平行于**填土表面，$K_a = \cos\alpha\,(\cos\alpha - r)/(\cos\alpha + r)$，$K_p$的符号相反；$P = \tfrac{1}{2}K\gamma H^2$，作用点距底部H/3处，与水平方向成$\alpha$角

$K_aK_p = \cos^2\alpha$；随着α增大，K_a增大而K_p减小；$\alpha = \varphi'$时二者均等于$\cos\varphi'$，$\alpha > \varphi'$时无解

Chu (1991)：$\psi_a = \sin^{-1}(\sin\alpha/\sin\varphi') - \alpha + 2\theta$；$K_{a(R)}$、$\beta$和$\eta$均为闭式表达；力与墙面法线成$\beta$角倾斜

墙背倾角θ为正时力增大，为负时力减小；被动状态下$\psi_p = \sin^{-1}(\ldots) + \alpha - 2\theta$

在**黏性**填土中，K'_a随深度变化，压力分布图为曲线；$z_c = (2c'/\gamma)\sqrt{(1+\sin\varphi')/(1-\sin\varphi')}$与坡角无关；以含拉裂缝的土压力为准

分层填土：$\sigma' = \sigma'_vK_{(R)}$；分界面处发生突变，$P = \sqrt{(N^2 + T^2)}$

不排水黏土：若超过$z_{max} = c_u/(\gamma\sin\alpha\cos\alpha)$，边坡将在自重作用下滑动，无解

参考文献

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning.

Chu, S.C. (1991). Rankine analysis of active and passive pressures on dry sands. Soils and Foundations, 31(4), 115–120.

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

Mazindrani, Z.H. and Ganjali, M.H. (1997). Lateral earth pressure problem of cohesive backfill with inclined surface. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(2), 110–112.

注

所有数值算例均由模块自带的计算引擎生成；模块给出的数值与之相同。模块打开时载入算例4中的挡土墙(H = 3.658 m, γ = 18.07 kN/m³)。

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墙面倾角、填土坡角、土层和地下水；模块同时给出力的大小、方向和作用高度。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。