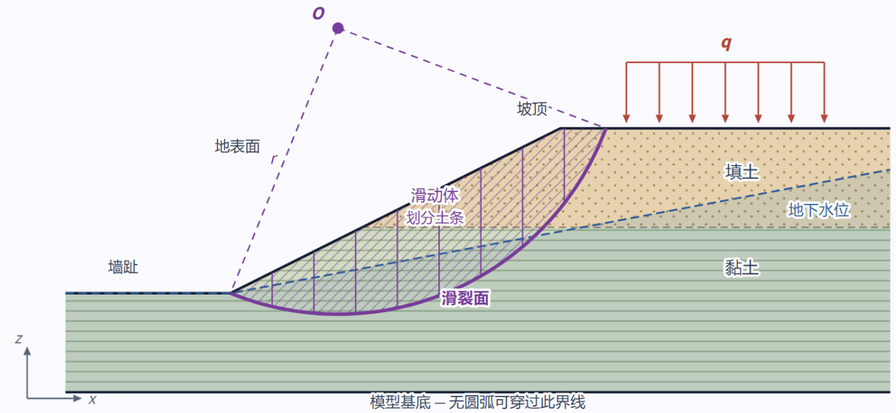
岩土工程讲义 · 边坡稳定性

边坡稳定性：极限平衡法（条分法）

讲义：极限平衡条分法；对一个圆弧滑裂面和一个土条的详细手算，其余土条和各专题以表格呈现。

条分法 | 普通条分法 · Bishop · Spencer | 最危险圆弧滑裂面 | 水 · 荷载 · 地震 · 裂缝 | 筋材 · Hoek–Brown



引言

本讲内容

极限平衡的概念：滑裂面以上的土体是一个刚体，其强度按相同比例发挥；**FS = 强度 / 所需应力**

把土体划分为**土条**：每个土条的重量W、底面倾角α、底面长度L、水压力U

对**三种方法**（普通条分法/Fellenius法、简化Bishop法、Spencer法）在同一圆弧滑裂面上、针对**单个土条**进行详细求解

同样的计算如何在**其余32个土条**上重复，以及结果表格；最危险圆弧滑裂面的搜索

水、荷载、地震、拉裂缝、筋材（土钉、锚杆、土工格栅）和岩石(Hoek–Brown)的影响

讲授流程

首先是**理论**，然后是采用单个圆弧和单个土条的**手算**：

1 · **理论**：FS、土条、三种方法

2 · **题目**：单个圆弧，单个土条

3 · **解答**：土条22手算；其余按**表格**计算

模型：高度10 m、坡比2:1的边坡；上部为填土(γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°)，下部为黏土(γ = 17.5, c′ = 20, φ′ = 18°)；无水、无荷载、无地震。各力均按剖面每米计(kN/m)。

排水、不排水、随深度增大

理论

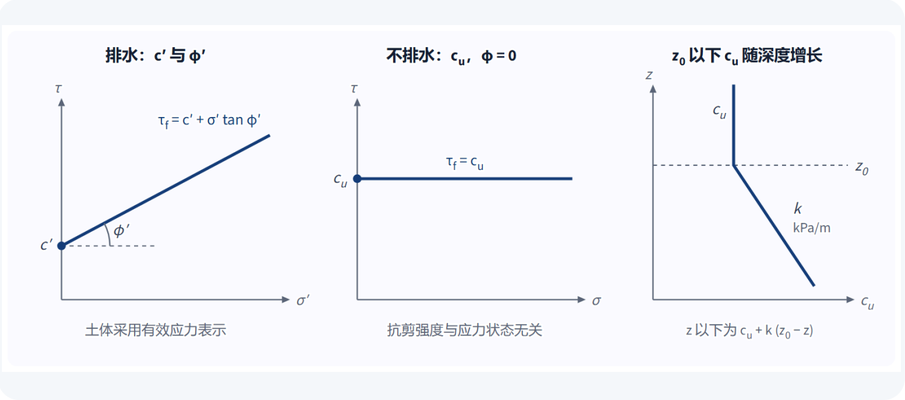
排水条件下土的抗剪强度由以有效应力σ′ = σ − u表示的Mohr–Coulomb包络线给出，并由参数c′和φ′确定。

在加载速度快于排水速度的饱和黏土中，强度取与法向应力无关的**不排水强度**c_u，并取φ = 0；许多天然黏土中，c_u随深度线性增大。

土条的强度取其底面中点所在高程处的值；岩石有其自身特有的强度准则，另行处理；选取排水条件还是不排水条件由工程师决定，构成分析的第一个假定。

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad \text{(排水)}$$

$$\tau_f = c_u \ (\varphi = 0) \qquad c_u(z) = c_u + k\,(z_0 - z) \ \ (z < z_0) \qquad \text{(不排水)}$$



强度/所需应力：对圆心的力矩

理论

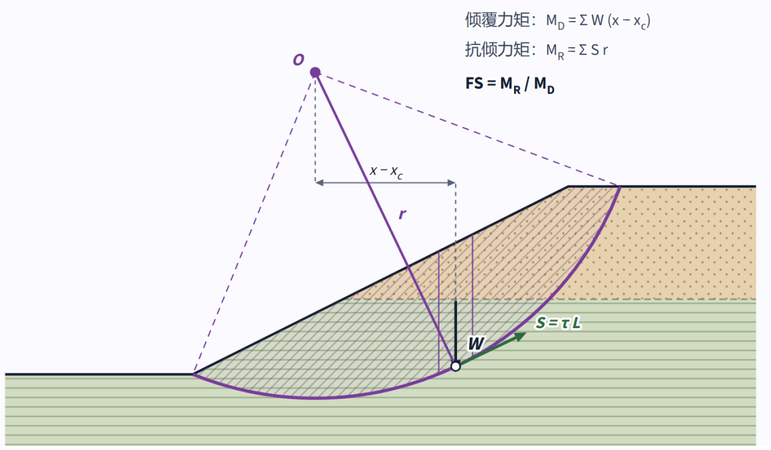
安全系数（FS）是土体所具有的抗剪强度与维持平衡所需剪应力之比，并假定沿滑裂面各点取相同的值。

在圆弧滑裂面上，起控制作用的平衡是绕圆心O的力矩平衡；将力矩除以半径后，比值写作FS = ΣR / ΣD，两个和的单位均为kN/m。

三种方法的差别在于每个土条底面有效法向力(N′)的求法：普通条分法仅由重量得到，Bishop法由竖向平衡得到，Spencer法则同时由力平衡和力矩平衡得到。

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \tau = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum R}{\sum D} \qquad R = cL + N' \tan\varphi' \qquad D = \frac{M_D}{r}$$



几何尺寸、重量、基底力

理论

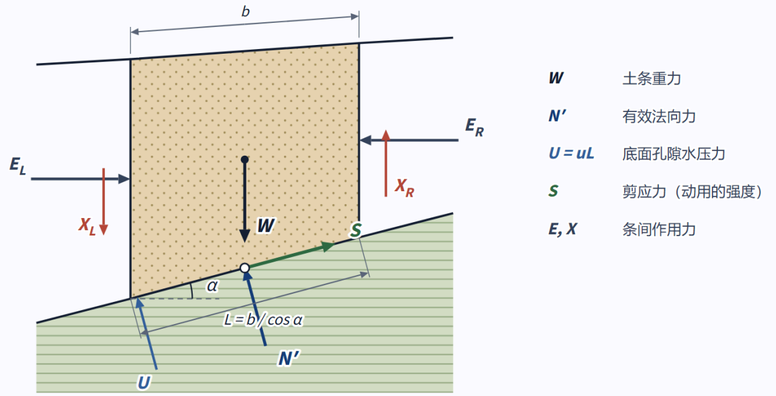
滑裂面与地表之间的土体，按土条数或最大土条宽度用竖直线划分为若干土条。

土体内每一个重要的交点都必须作为土条边界；这样每个土条底面只穿过一种土，每个土条只承受一种荷载。

在土条中线处，底面倾角α在圆心的坡顶一侧取正，在坡脚一侧取负。

有效法向力N′ = N − U；N′为负值表示土条底面受拉，在简单条分法和Bishop法中N′取为零。

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} \qquad L = \frac{b}{\cos\alpha} \qquad W = \sum_i b\, h_i\, \gamma_i \qquad N' = N - U\ ,\ U = uL$$



无土条间作用力

理论

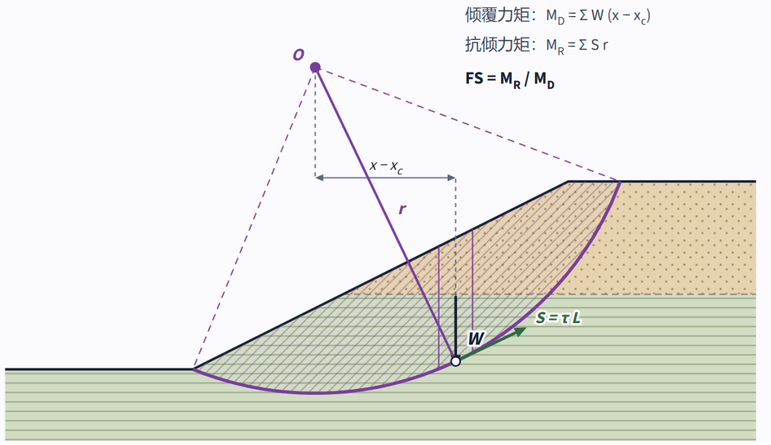
在**Fellenius**（瑞典）法中，完全忽略条间力，每个土条仅在垂直于其底面的方向上平衡。

由该平衡条件可根据重量和荷载求得法向力；安全系数由力矩之比得到，在均质土中简化为FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α。

该方法简单、稳定且偏于安全；其误差随圆弧深度和孔隙水压力增大而增大，对于深圆弧，所得结果可能明显低于另外两种方法。

$$N' = W\cos\alpha - uL \qquad R = cL + N'\tan\varphi' \qquad D = W\sin\alpha$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{\sum \left[cL + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi'\right]}{\sum W\sin\alpha}$$



各土条的竖向平衡：迭代求解

理论

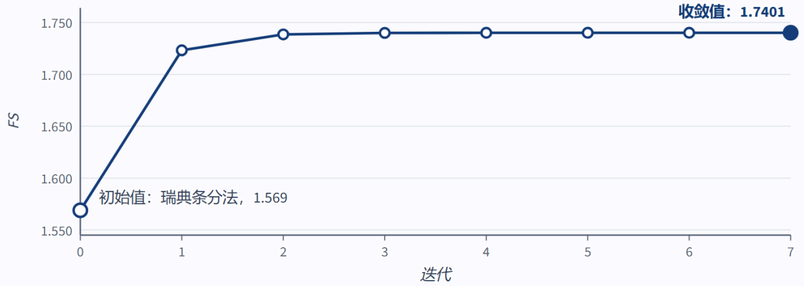
简化Bishop法忽略土条间的剪力，但每个土条满足竖向平衡，且土条底面的剪力取等于已发挥的强度。

由于FS同时出现在方程两侧，方程需从普通条分法的数值出发，通过迭代求解；迭代几步即可。

负的**N′**取为零，且不允许m_α的值低于0.2；该限制对深层圆弧滑裂面的坡脚部位较为重要。

$$N' = \frac{W - uL\cos\alpha - cL\sin\alpha / FS}{m_\alpha} \qquad m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum [cL + N'\tan\varphi']}{\sum D}$$



力与力矩平衡：土条间作用力平行

理论

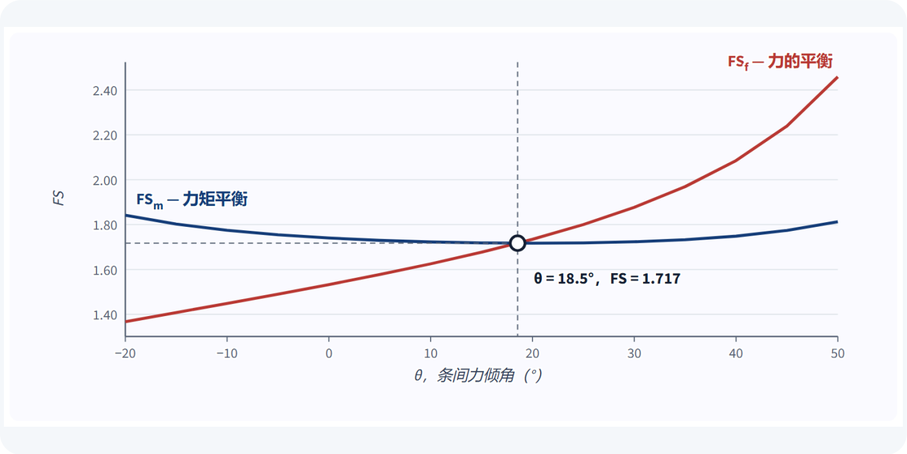
Spencer法同时满足力平衡和力矩平衡；条间力相互平行，且剪力为法向力的固定比例。

由于土体两端的侧面为自由面，ΣΔE = 0即给出力的平衡条件，并对每个θ角得到一个安全系数FS_f。

对圆心取矩可得到第二个值：$FS_m = \Sigma[c\,L + N' \tan\varphi] / \Sigma\,D$；$FS_f(\theta)$与$FS_m(\theta)$在某一角度处相交，该交点即构成解。

$$X = E\tan\theta \qquad \Delta E = \frac{cL + \tan\varphi'\,(W\cos\alpha - U) - FS\,W\sin\alpha}{FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) - \tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha)}$$

$$N' = W\cos\alpha - U + \Delta E\,(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) \qquad \sum \Delta E = 0 \;\Rightarrow\; FS_f(\theta)$$



满足什么，忽略什么

理论

方法	土条间作用力	力平衡	力矩平衡	表面	FS（同一圆弧）
普通条分法(Fellenius)	无	仅底面法向力	✓	圆	**1.569**
简化Bishop法	仅法向力（无剪力）	每个土条的竖向	✓	圆	**1.740**
Spencer	平行：X = E tanθ	水平+竖向	✓	每个面	**1.717**

普通条分法是可用手算校核且偏于保守的默认方法；其结果是三种方法中最低的。

Bishop法是圆弧滑裂面的常规选择；其结果与Spencer法在圆弧滑裂面上的结果仅相差百分之几。

Spencer法满足全部平衡条件，用于非圆弧滑裂面；其计算量最大，且对某些圆弧滑裂面无解。

题目

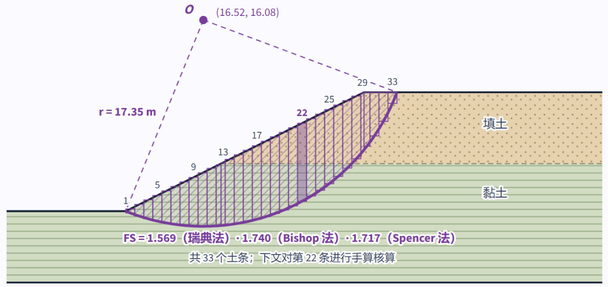
算例

已知条件

剖面	**地表**$(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ m；**基底**$z=-6$ m；$z=4$ m**以上为填土，以下为黏土**
土类	**填土**$\gamma=18$ kN/m³，$c'=5$ kPa，$\varphi'=30°$；**黏土**$\gamma=17.5$ kN/m³，$c'=20$ kPa，$\varphi'=18°$；**无水、荷载及地震**
圆弧滑裂面	**圆心**$x_c=16.52$ m，$z_c=16.08$ m；**半径**$r=17.35$ m（**最危险圆弧滑裂面，参见搜索所得**）

求

圆与地面相交的x_a和x_b两点、圆的最低点，以及**土条划分**。



解答

解答

1 圆与地表的交点：$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

$$x_a = x_c - \sqrt{r^2 - (z_a - z_c)^2} = 16.518 - \sqrt{301.08 - (0 - 16.080)^2} = \mathbf{10.00}\ \text{m} \quad (z_a = 0)$$

$$x_b = x_c + \sqrt{r^2 - (z_b - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (10 - 16.080)^2} = \mathbf{32.77}\ \text{m} \quad (z_b = 10)$$

2 最低点与条分

$$z_{min} = z_c - r = 16.080 - 17.352 = -1.27\ \text{m} \ (> -6\ \text{m})$$

$$b = \frac{x_b - x_a}{30} = \frac{22.771}{30} = 0.759\ \text{m} \ \Rightarrow\ 30\ \text{土条}$$

圆弧在x = 10.00（坡脚）和32.77 m（坡顶）之间切割土体；x = 10、18和30 m处的分界又多分出3个土条：共**33个土条**。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

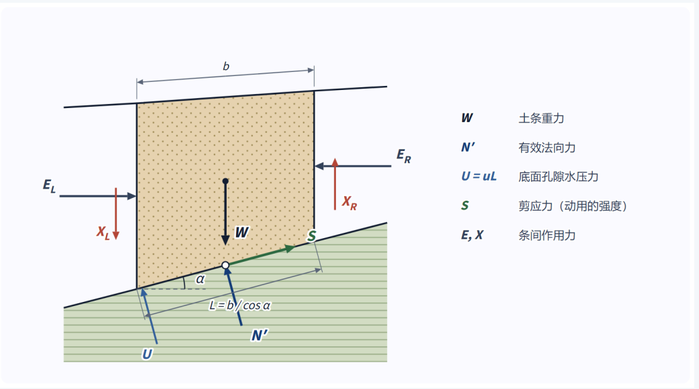
算例

已知条件

土条	**算例1中圆弧的第22号土条：中点**$x_m = 24.800$ **m，宽度**$b = 0.759$ **m**
土	**填土**$\gamma = 18$ **kN/m³(**$z > 4$ **m)；黏土**$\gamma = 17.5$ **kN/m³，**$c' = 20$ **kPa，**$\varphi' = 18°$ **（基底位于黏土中）；**$u = 0$

求

土条的α、L、W值；N′、R和D（普通条分法）。



解答 (1/2)

解答

1 底面坡度与长度

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} = \frac{24.800 - 16.518}{17.352} = 0.4773 \;\Rightarrow\; \alpha = \mathbf{28.51}^\circ,\ \cos\alpha = 0.8787$$

$$L = \frac{b}{\cos\alpha} = \frac{0.759}{0.8787} = \mathbf{0.864}\ \text{m}$$

2 土柱高度和重量（填土 + 黏土）

$$z_{surface} = \frac{x_m - 10}{2} = 7.3998\ \text{m};\quad z_{base} = z_c - r\cos\alpha = 0.8327\ \text{m}$$

$$h_1 = 7.3998 - 4 = 3.3998\ \text{m}\ (\text{填土});\quad h_2 = 4 - 0.8327 = 3.1673\ \text{m}\ (\text{黏土})$$

$$W = b\,(h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2) = 0.7590(3.3998 \cdot 18 + 3.1673 \cdot 17.5) = \mathbf{88.52}\ \text{kN/m}$$

土条22是**最重的土条**(W = 88.52 kN/m)；其底面倾角为28.5°，位于黏土中(c′ = 20 kPa, φ′ = 18°)。

解答 (2/2)

解答

3 法向力与抗力（u = 0）

$$N' = W\cos\alpha = 88.52 \times 0.8787 = \mathbf{77.79}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 77.79(0.3249) = 17.27 + 25.27 = \mathbf{42.55}\ \text{kN/m}$$

4 下滑作用

$$D = W\sin\alpha = 88.52 \times 0.4773 = \mathbf{42.25}\ \text{kN/m}$$

土条22：**R = 42.55** kN/m，**D = 42.25** kN/m。每个土条的R和D值均通过**相同的三个步骤**求得；安全系数为二者各自总和之比：**FS = ΣR/ΣD**（表格见后续页面）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

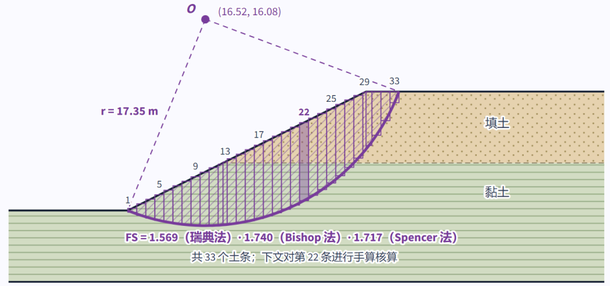
算例

已知条件

土条	**算例1中的圆弧滑裂面，共33个土条；每个土条按算例2中的三个步骤求解**
方法	**普通条分法(Fellenius)：无条间力**

求

全部土条的计算表：**W, N′, R, D**及其总和；**FS = ΣR / ΣD**。



解答 (1/3)

解答

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
1	10.00	0.001	−22.1	0.001	0.00	20	18	0.00	0.03	−0.00
2	10.38	0.758	−20.7	0.810	4.49	20	18	4.20	17.57	−1.59
3	11.14	0.759	−18.1	0.798	13.08	20	18	12.43	20.01	−4.06
4	11.90	0.759	−15.4	0.787	21.15	20	18	20.39	22.37	−5.63
5	12.66	0.759	−12.9	0.779	28.74	20	18	28.02	24.67	−6.40
6	13.41	0.759	−10.3	0.771	35.84	20	18	35.27	26.89	−6.41
7	14.17	0.759	−7.8	0.766	42.49	20	18	42.10	29.00	−5.74
8	14.93	0.759	−5.2	0.762	48.68	20	18	48.47	30.99	−4.45
9	15.69	0.759	−2.7	0.760	54.42	20	18	54.36	32.86	−2.59
10	16.45	0.759	−0.2	0.759	59.72	20	18	59.72	34.59	−0.23
11	17.21	0.759	2.3	0.760	64.58	20	18	64.53	36.16	2.57
12	17.79	0.411	4.2	0.412	36.85	20	18	36.75	20.19	2.71
13	18.17	0.348	5.5	0.349	32.15	20	18	32.01	17.39	3.07
14	18.73	0.759	7.3	0.765	73.11	20	18	72.51	38.87	9.31
15	19.49	0.759	9.9	0.770	76.77	20	18	75.64	39.98	13.13
16	20.25	0.759	12.4	0.777	79.97	20	18	78.11	40.92	17.18
17	21.00	0.759	15.0	0.786	82.70	20	18	79.89	41.67	21.38

解答 (2/3)

解答

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
18	21.76	0.759	17.6	0.796	84.94	20	18	80.97	42.23	25.68
19	22.52	0.759	20.2	0.809	86.67	20	18	81.32	42.60	29.99
20	23.28	0.759	22.9	0.824	87.86	20	18	80.91	42.77	34.25
21	24.04	0.759	25.7	0.842	88.49	20	18	79.74	42.76	38.37
22	**24.80**	**0.759**	**28.5**	**0.864**	**88.52**	**20**	**18**	**77.79**	**42.55**	**42.25**
23	25.56	0.759	31.4	0.889	87.89	20	18	75.02	42.16	45.80
24	26.32	0.759	34.4	0.920	86.56	20	18	71.43	41.60	48.89
25	27.08	0.759	37.5	0.956	84.44	20	18	67.00	40.90	51.38
26	27.84	0.759	40.7	1.001	81.43	20	18	61.72	40.08	53.11
27	28.59	0.758	44.1	1.056	77.34	20	18	55.53	39.17	53.83
28	29.35	0.760	47.7	1.129	72.09	5	30	48.51	33.65	53.33
29	29.87	0.267	50.3	0.418	23.72	5	30	15.15	10.84	18.25
30	30.25	0.492	52.3	0.805	40.15	5	30	24.55	18.20	31.76
31	30.87	0.759	55.8	1.351	50.12	5	30	28.16	23.01	41.46
32	31.63	0.759	60.6	1.545	33.40	5	30	16.41	17.20	29.09
33	32.39	0.759	66.2	1.878	12.72	5	30	5.14	12.36	11.64
Σ					**1,841.11**			**1,613.77**	**1,006.25**	**641.34**

解答 (3/3)

解答

1 总和与安全系数

$$\sum R = 1{,}006.25 \text{ kN/m} \qquad \sum D = 641.34 \text{ kN/m} \qquad \sum W = 1{,}841.1 \text{ kN/m}$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{1{,}006.25}{641.34} = \mathbf{1.569}$$

对该圆弧，用普通条分法得**FS = 1.569**。位于坡脚一侧的土条(α < 0)中，土条底面的倾向与滑动方向相反：D为负值，使ΣD减小。土条22即表中的第22行，与手算值相同。

ΣR/ΣD：**抗力**与滑动力之比；若FS > 1，则沿该圆弧不会发生滑动。

普通条分法给出最低值；在同一圆弧上Bishop法和Spencer法的结果更高（见后续算例）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

土条与圆弧

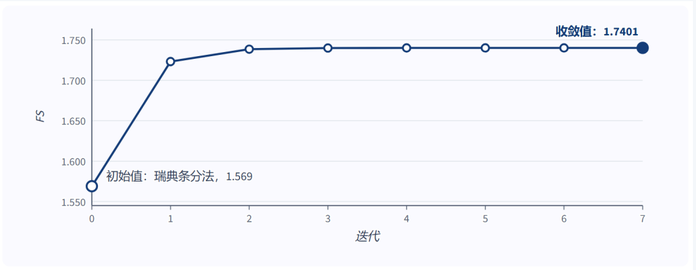
算例2中的第22个土条和算例1中的圆弧；初始值为算例3中的$FS_0 = 1.569$

方法

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha},\ m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$ **(u = 0)**

求

土条22的m_α、N′、R；整个圆弧的**迭代**和FS。



解答 (1/4)

解答

1 第一次迭代（FS_0取普通条分法的值，为1.5690）

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS_0} = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.5690} = 0.9776$$

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS_0}{m_\alpha} = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.5690}{0.9776} = 85.17\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 85.17(0.3249) = 44.95\ \text{kN/m}$$

解答 (2/4)

解答

2 采用收敛值(FS = 1.7401)

$$m_\alpha = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.7401} = \mathbf{0.9679}$$

$$N' = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.7401}{0.9679} = \mathbf{86.56}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 86.56(0.3249) = \mathbf{45.40}\ \text{kN/m} \qquad D = 42.25\ \text{kN/m}$$

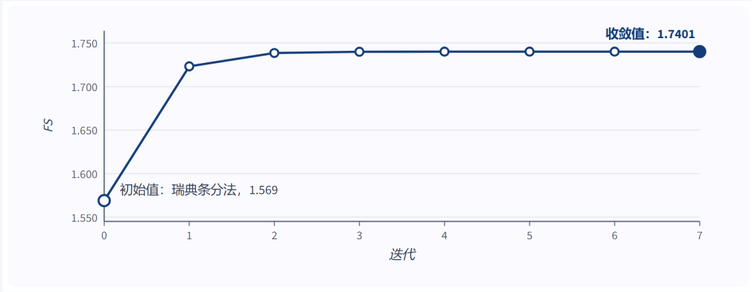
第22土条的法向力由普通条分法中的77.79增至**86.56** kN/m（土条间竖向平衡）；抗力由42.55 → **45.40** kN/m。相同的步骤对33个土条逐一重复。

解答 (3/4)

解答

2 每次迭代重新计算ΣR，$FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

迭代k	FS_k	差值
0（普通）	1.5690	
1	1.7232	0.1542
2	1.7385	0.0153
3	1.7399	0.0014
4	1.7401	0.0001
5	1.7401	0.0000
6	1.7401	0.0000
7	**1.7401**	0.0000



经7次迭代，**FS = 1.740**；ΣR = 1,115.97，ΣD = 641.34 kN/m。比普通条分法(1.569)高10.9%。

解答 (4/4)

解答

No	α (°)	W	m_α	N′	R
1	−22.1	0.00	0.8566	0.01	0.03
2	−20.7	4.49	0.8693	8.95	19.11
3	−18.1	13.08	0.8928	17.83	21.76
4	−15.4	21.15	0.9141	25.78	24.12
5	−12.9	28.74	0.9333	32.92	26.27
6	−10.3	35.84	0.9505	39.38	28.22
7	−7.8	42.49	0.9656	45.23	30.02
8	−5.2	48.68	0.9788	50.55	31.67
9	−2.7	54.42	0.9900	55.39	33.20
10	−0.2	59.72	0.9993	59.80	34.61
11	2.3	64.58	1.0066	63.81	35.93
12	4.2	36.85	1.0110	36.10	19.98
13	5.5	32.15	1.0133	31.35	17.18
14	7.3	73.11	1.0156	70.88	38.34
15	9.9	76.77	1.0172	73.99	39.45
16	12.4	79.97	1.0168	76.77	40.49
17	15.0	82.70	1.0143	79.24	41.46
18	17.6	84.94	1.0097	81.39	42.37
19	20.2	86.67	1.0028	83.22	43.22
20	22.9	87.86	0.9937	84.71	44.01
21	25.7	88.49	0.9821	85.83	44.74
22	**28.5**	**88.52**	**0.9679**	**86.56**	**45.40**
23	31.4	87.89	0.9508	86.84	46.00
24	34.4	86.56	0.9307	86.59	46.53
25	37.5	84.44	0.9072	85.70	46.98
26	40.7	81.43	0.8798	84.02	47.33
27	44.1	77.34	0.8480	81.24	47.52
28	47.7	72.09	0.9183	75.89	49.46
29	50.3	23.72	0.8941	25.50	16.81
30	52.3	40.15	0.8741	43.83	29.33
31	55.8	50.12	0.8363	56.09	39.14
32	60.6	33.40	0.7803	37.85	29.58
33	66.2	12.72	0.7076	11.00	15.74
Σ		**1,841.11**			**1,115.97**

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

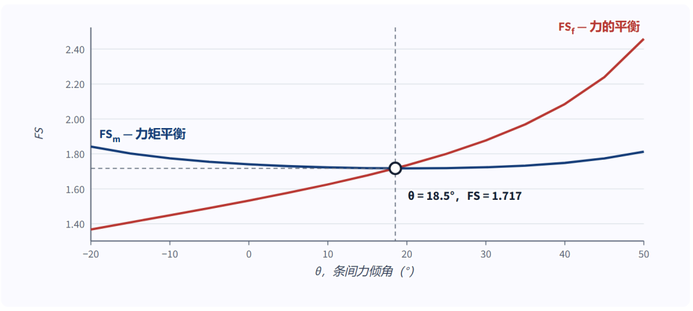
算例

已知条件

土条与圆弧	**算例2中的第22个土条、算例1中的圆弧；条间力相互平行，$X = E\tan\theta$**
解的角度	$\theta = 18.54°$**（下方两条曲线相交处的角度），** $FS = 1.717$

求

土条22的**ΔE**、**N′**、**R**、**E**和**X**；θ–FS曲线及整个圆弧。



解答 (1/4)

解答

1 土条的法向力差ΔE(θ = 18.54°, tan θ = 0.3354, FS = 1.717)

$$\text{余量} = cL + \tan\varphi' W\cos\alpha - FS\, W\sin\alpha = 17.275 + 25.274 - 72.542 = -29.99$$

$$\text{分母}_1 = FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) = 1.7837$$

$$\text{分母}_2 = -\tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 0.0593$$

$$\Delta E = \frac{\text{余量}}{\text{分母}_1 + \text{分母}_2} = \frac{-29.99}{1.8430} = -\mathbf{16.27}\ \text{kN/m}$$

解答 (2/4)

解答

2 法向力、抗力和条间力

$$N' = W\cos\alpha + \Delta E(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 77.786 + (-16.27)(-0.1826) = \mathbf{80.76}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = \mathbf{43.51}\ \text{kN/m}$$

$$E_{foot} = 254.69\ \text{kN/m} \quad \Rightarrow \quad E_{top} = E_{foot} + \Delta E = 238.41\ \text{kN/m}$$

$$X_{foot} = E\tan\theta = \mathbf{85.42}$$

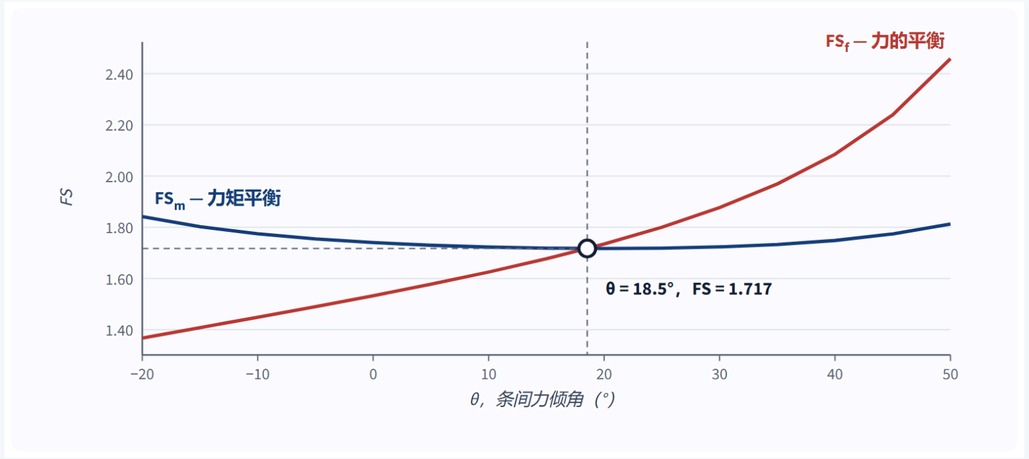
在Spencer法中，第22号土条的法向力为**80.76** kN/m（普通法77.79，Bishop法86.56）；作为土条间力，朝坡脚一侧作用有E = 254.69 kN/m。

解答 (3/4)

解答

3 对每个θ，求FS_f(ΣΔE = 0)和FS_m（力矩）；交点即为解

θ (°)	FS_m（力矩）	FS_f（力）
-20	1.842	1.367
-15	1.802	1.408
-10	1.774	1.449
-5	1.755	1.490
0	1.740	1.533
5	1.730	1.577
10	1.723	1.625
15	1.718	1.677
20	1.717	1.735
25	1.718	1.800
30	1.723	1.877
35	1.733	1.969
40	1.748	2.085
45	1.774	2.239
50	1.812	2.458
18.54	**1.717**	**1.717**



解答 (4/4)

解答

No	ΔE	E（墙趾）	N′	R
1	0.02	−0.00	0.02	0.03
2	17.12	0.02	15.62	21.28
3	21.59	17.14	26.01	24.42
4	24.46	38.73	34.81	27.06
5	26.08	63.19	42.35	29.33
6	26.67	89.27	48.84	31.30
7	26.41	115.94	54.44	33.01
8	25.43	142.35	59.29	34.51
9	23.87	167.78	63.49	35.83
10	21.80	191.65	67.12	36.99
11	19.32	213.45	70.24	38.01
12	9.30	232.78	39.17	20.97
13	7.19	242.08	33.72	17.95
14	13.38	249.26	75.26	39.76
15	10.03	262.64	77.24	40.50
16	6.48	272.67	78.84	41.16
17	2.77	279.15	80.07	41.73
18	−1.03	281.92	80.95	42.23
19	−4.89	280.89	81.47	42.65
20	−8.75	276.01	81.62	43.01
21	−12.57	267.25	81.39	43.29
22	**−16.27**	**254.69**	**80.76**	**43.51**
23	−19.80	238.41	79.67	43.67
24	−23.06	218.61	78.07	43.76
25	−25.94	195.55	75.88	43.79
26	−28.29	169.61	72.98	43.74
27	−29.89	141.32	69.14	43.59
28	−30.84	111.42	64.36	42.80
29	−11.02	80.59	21.27	14.37
30	−19.70	69.57	36.10	24.87
31	−26.62	49.87	45.17	32.83
32	−18.69	23.25	29.61	24.82
33	−4.56	4.56	8.70	14.41
Σ	0.00			**1,101.18**

θ = 18.54°; ΣR = 1,101.18, ΣD = 641.34 → **FS = 1.717**. E_{max} = 281.9 kN/m.

在GeoTerva中验算解答 ↗

重量、孔隙水压力、边坡中的水

理论

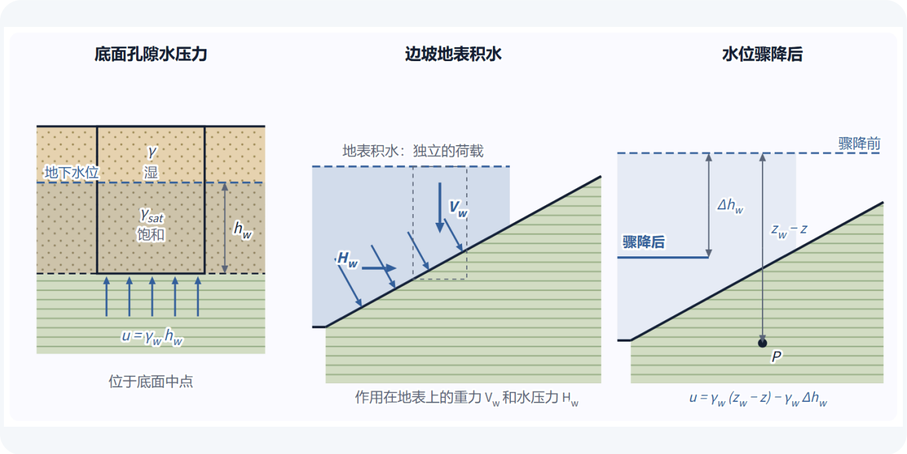
水通过三种途径进入分析：饱和土的重量，使各土条底面抗剪强度降低的孔隙水压力，以及位于边坡上的水本身作为荷载（按其所在位置计入）。

地下水位线以下，孔隙水压力按静水压力分布；由于未分析渗流，倾斜的地下水位只是对流网的一种近似，且从不采用浮重度。

当孔隙水压力已知为上覆压力的某一比例时，给土体指定一个r_u比值；这适用于施工阶段的填土，或软黏土上的填土。

边坡前的水可以排出，因此当其迅速下降时，水的支撑作用消失，孔隙水压力保持不变，安全系数对应于水位骤降刚结束时的最小值。

$$u = \gamma_w h_w \qquad u = r_u \frac{W}{b} \qquad H_w = \frac{\gamma_w}{2}\left[(z_w - z_L)^2 - (z_w - z_R)^2\right]$$



题目

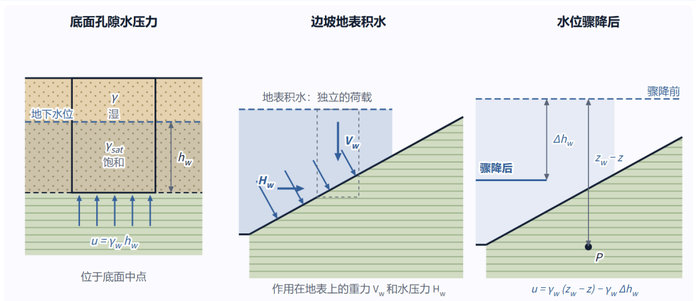
算例

已知条件

水位线	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ m，**静水压力分布；$\gamma_w = 9.81$ kN/m³；饱和重度：填土20，黏土19.5 kN/m³**
土条	**同一圆弧；$x_m = 24.800$ m处的土条（有水时为第24个土条，而非第33个）**

求

土条中的z_w, h_w, u, U；新的W, N′, R, D；整个圆弧的FS。



解答 (1/2)

解答

1 水位高度和孔隙水压力

$$z_w = 2.5 + \frac{24.800 - 20}{30}(4.5) = 3.2199 \text{ m}$$

$$h_w = z_w - z_{base} = 3.2199 - 0.8327 = \mathbf{2.3872} \text{ m}$$

$$u = \gamma_w h_w = 9.81(2.3872) = \mathbf{23.42} \text{ kPa} \qquad U = uL = 23.42(0.864) = \mathbf{20.23} \text{ kN/m}$$

2 重量：水位以上取湿润状态，水位以下取饱和状态

$$W = b\left[h_1\gamma_1 + h_{dry}\gamma_{moist} + h_w\gamma_{sat}\right]$$

$$W = 0.7590\left[3.3998(18) + 0.7801(17.5) + 2.3872(19.5)\right] = \mathbf{92.14} \text{ kN/m}$$

水既使重量由干燥状态的88.52 kN/m增至**92.14** kN/m，又在基底产生**U = 20.23** kN/m的水压力。

解答 (2/2)

解答

3 有效法向力、抗力、滑动力（土条22）

$$N' = W\cos\alpha - U = 92.14(0.8787) - 20.23 = \mathbf{60.74}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 60.74(0.3249) = \mathbf{37.01}\ \text{kN/m} \qquad D = W\sin\alpha = \mathbf{43.98}\ \text{kN/m}$$

4 整个圆（36个土条，同一圆弧）及与干燥情况的对比

方法	ΣU	ΣR	ΣD	FS（水）	FS（干）
普通	476.94	879.96	655.41	**1.343**	1.569
Bishop	476.94	981.07	655.41	**1.497**	1.740
Spencer	476.94	970.22	655.41	**1.480**	1.717

对同一圆弧，水使FS由1.569降至**1.343**（普通条分法）；若按含水位线重新搜索最危险圆弧，则滑裂面变浅，FS为**1.255 / 1.568 / 1.564**（普通条分法 / Bishop / Spencer）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

条形荷载与集中荷载：竖向、垂直、倾斜

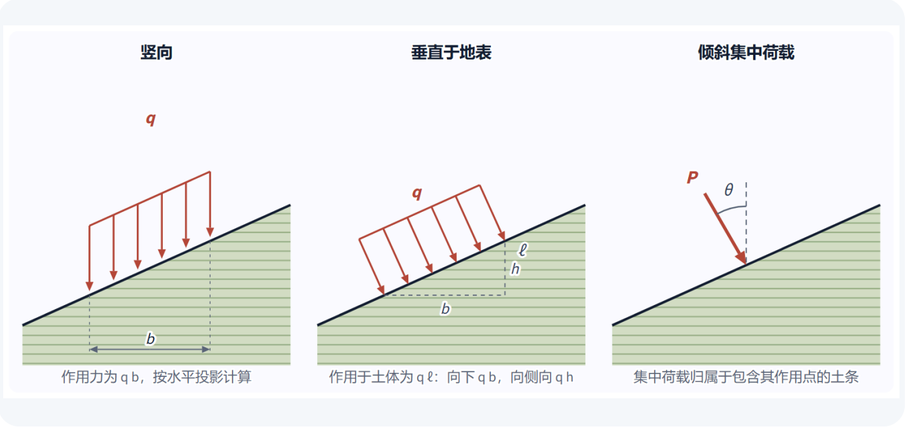
理论

竖向或倾斜作用的条形荷载按水平投影取值，水平宽度为b的部分上的力为q b。

垂直于表面作用的荷载按表面长度计算；长度为ℓ的一段上的力为q ℓ，其竖向分量为q b，水平分量为q h。

每个土条承担落在其两侧边缘之间的那部分荷载，该部分荷载按水平宽度分配；集中荷载归属于包含其作用点的土条。

$$F = q\,b \qquad F_n = q\,\ell \;\Rightarrow\; F_z = q\,b,\; F_x = q\,h \qquad P_x = P\sin\theta,\; P_z = P\cos\theta$$



土条重心处的惯性力

理论

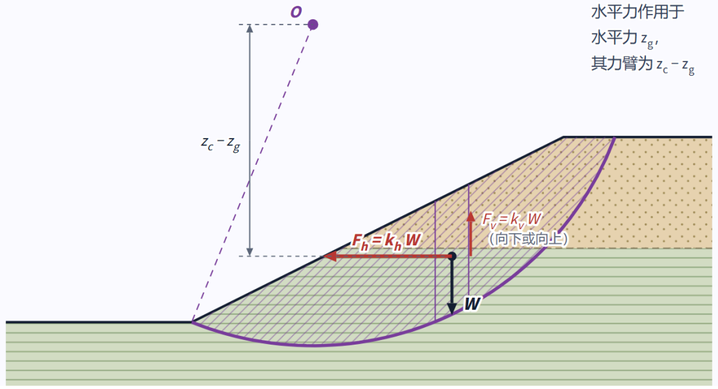
在**拟静力**方法中，地震晃动由施加于滑动土体、以g的某一分数表示的恒定加速度来代表。

在每一土条中，土体(W_{soil})的惯性力作用在重心(z_g)处；该重心由土条内土体的湿润部分和饱和部分确定，因为土条上方积聚的水不承担该惯性力。

在“临界工况”选项下，水平两个方向和竖向两个方向均进行试算，取最小安全系数；系数由用户给定，静力与**拟静力**FS一并报告。

$$F_h = k_h W_{soil} \qquad F_v = k_v W_{soil}$$

$$N = (W + F_v)\cos\alpha \mp F_h \sin\alpha \qquad D = (W + F_v)\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r}$$



题目

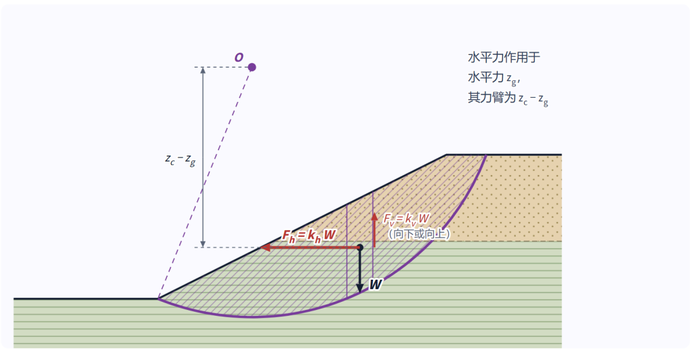
算例

已知条件

地震	$k_h = 0.15$，$k_v = 0$；**水平力指向坡脚方向（最不利方向）**
土条与圆弧	**算例2中的第22号土条和圆弧；求力臂z_g需要用到形心**

求

土条22的F_h、N′、R、D；整个圆弧按三种方法得到的$FS_{earthquake}$。



解答 (1/2)

解答

1 惯性力与力臂

$$F_h = k_h W = 0.15(88.52) = \mathbf{13.28}\ \text{kN/m}$$

$$z_g = \sum W_i z_{g,i} / W = (46.45(5.700) + 42.07(2.416))/88.52 = 4.139\ \text{m}$$

$$\text{力臂} = (z_c - z_g)/r = (16.080 - 4.139)/17.352 = 0.6882$$

2 法向力、抗力、滑动作用

$$N' = W\cos\alpha - F_h \sin\alpha = 77.79 - 6.34 = \mathbf{71.45}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 71.45(0.3249) = \mathbf{40.49}\ \text{kN/m}$$

$$D = W\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r} = 42.25 + 13.28(0.6882) = \mathbf{51.39}\ \text{kN/m}$$

滑动力由42.25增至**51.39** kN/m (+22%)，抗力由42.55降至**40.49** kN/m：水平力减小法向力，并增加滑动力矩。

解答 (2/2)

解答

3 同一圆弧上的三种方法(k_h = 0.15, k_v = 0)

方法	ΣR	ΣD	FS（静态）	FS（地震）
普通	967.97	840.48	1.569	**1.152**
Bishop	1,083.01	840.48	1.740	**1.289**
Spencer	1,069.09	840.48	1.717	**1.272**

k_h = 0.15使FS降低约27%（无地震时1.569 → **1.152**）。地震作用下最危险圆弧也会改变：在页面所示模型中（k_h = 0.15，k_v = 0.05，取最不利方向），搜索结果为1.138 / 1.265 / 1.250。

在GeoTerva中验算解答 ↗

裂缝中及深处的水

理论

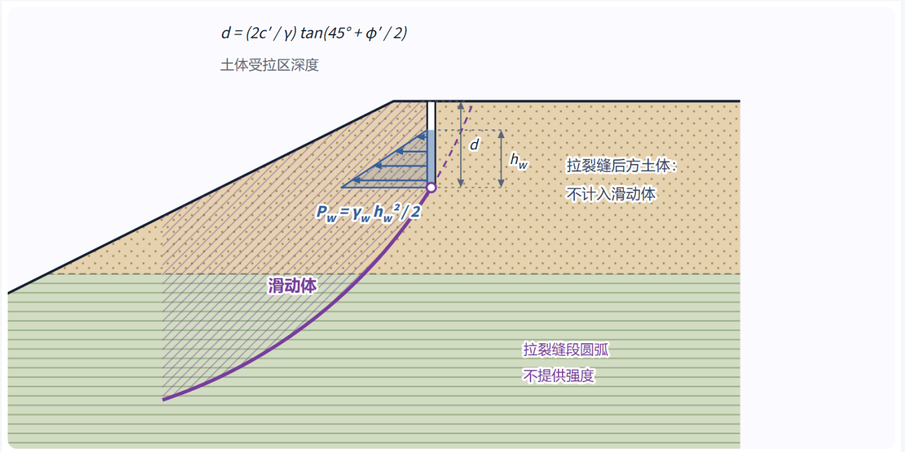
拉裂缝深度按d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2)确定；不排水条件下该深度为$2c_u/\gamma$。

存在裂缝作用时，滑裂面终止于滑动体深度等于裂缝深度之处；裂缝后方的土体不属于滑动体，圆弧位于裂缝内的部分不提供抗力。

拉裂缝中积水至高度h_w时，将产生静水压力；充满水的拉裂缝会降低安全系数，而这种情形更容易被忽视。

$$d = \frac{2c'}{\gamma}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad d = \frac{2c_u}{\gamma}$$

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \qquad z_f = z_{base} + \frac{h_w}{3} \qquad D_{crack} = \frac{P_w\left(z_c - z_f\right)}{r}$$



题目

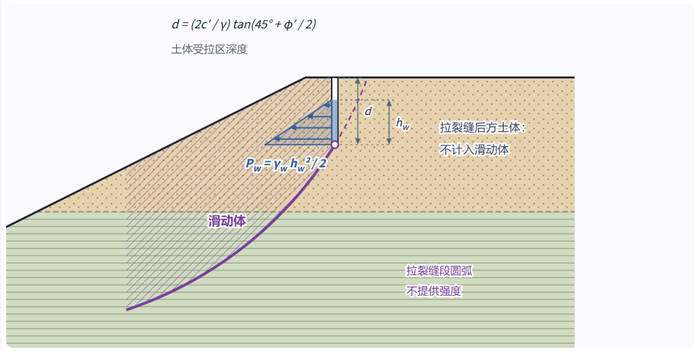
算例

已知条件

裂缝	**顶部在$d = 2$ m深度处有竖向拉裂缝（模型初始值）；干燥和充水($h_w = 2$ m)两种情形**
圆	**算例1中的圆弧滑裂面；终止于裂缝底部**

求

拉裂缝的x位置；P_w、z_f、D_{crack}；三种方法求得的FS。



解答 (1/2)

解答

1 裂缝的位置：裂缝在圆弧降至高程z = 10 − 2 = 8 m处终止

$$x = x_c + \sqrt{r^2 - (8 - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (8 - 16.080)^2} = \mathbf{31.87}\ \text{m}$$

2 裂缝中的水(h_w = 2 m)：力与力矩

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} = \frac{9.81(2)^2}{2} = \mathbf{19.62}\ \text{kN/m} \qquad z_f = 8 + \frac{2}{3} = 8.667\ \text{m}$$

$$D_{crack} = \frac{P_w(z_c - z_f)}{r} = \frac{19.62(16.080 - 8.667)}{17.352} = \mathbf{8.38}\ \text{kN/m}$$

Rankine深度在填土中为0.96 m，在黏土中为3.15 m；模块的拉裂缝深度取输入值（此处为2 m）。充满水的拉裂缝使ΣD增加**8.38** kN/m。

解答 (2/2)

解答

3 无裂缝、干裂缝和充满水的裂缝（同一圆弧；有裂缝时共34个土条）

方法	无裂缝FS	ΣR	ΣD（干）	FS（干裂缝）	ΣD（水）	FS（充水裂缝）
普通	1.569	991.18	625.52	**1.585**	633.91	**1.564**
Bishop	1.740	1,096.39	625.52	**1.753**	633.91	**1.727**
Spencer	1.717	1,083.00	625.52	**1.731**	633.91	**1.702**

干裂缝对FS的影响很小（上方的下滑土体与弧段上的抗力一同消失：1.569 → 1.585）；**充水裂缝**则使其降低(1.564)。裂缝中的水是最容易被遗忘的情形。

在GeoTerva中验算解答 ↗

圆心网格、半径、加密

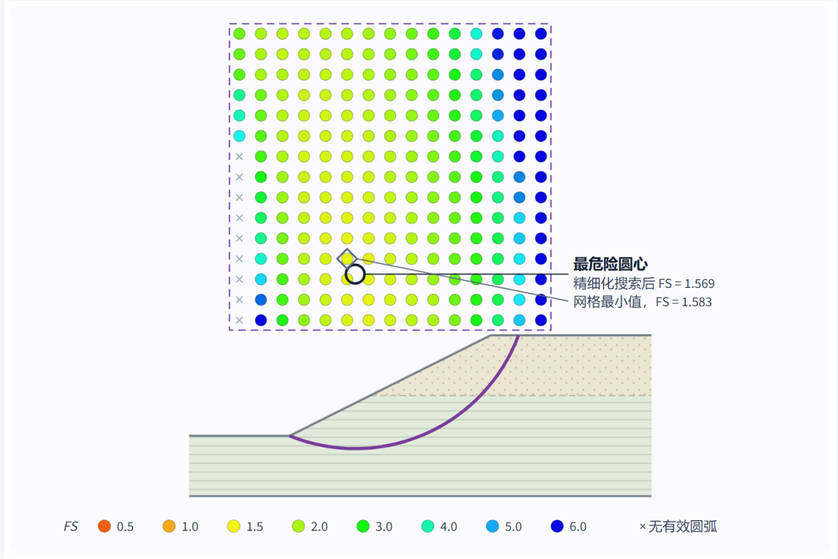
理论

最危险圆弧滑裂面的搜索在布置于边坡上的$n_X \times n_Z$点圆心网格上进行，并在每个圆心处试算一组等间距的半径。

每个圆弧划分为土条后求解，各圆心对应的最小安全系数连同相应半径一并保存；在工程算例模型中，以15 × 15个圆心和12个半径共试算了4650个圆弧。

$$FS(x_c, z_c) = \min_j FS(x_c, z_c, r_j) \qquad FS_{crit} = \min_{x_c, z_c} FS(x_c, z_c)$$

算例模型	数值
网格（n_X×n_Z×半径）	15 × 15 × 12
试算圆弧/采用圆弧	4,650 / 3,487
网格中的最小值	FS = 1.583
细化后	**FS = 1.569**
最危险圆弧	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



折线，仅用于Spencer法

理论

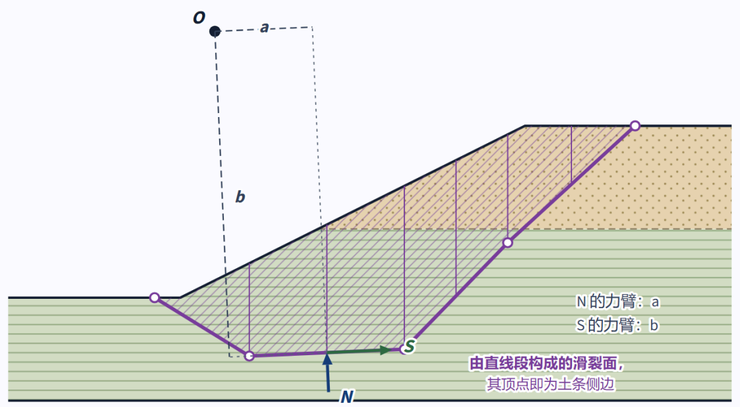
非圆弧滑裂面为两端均位于地面的折线形（多边形）滑裂面，可由自坡顶下降、再向坡脚上升的土楔组成，沿软弱土层发展。

多段直线滑裂面上的力矩方程，是对位于土体坡脚上方所选的一点O写出的；N的力臂为a，S的力臂为b。

以n段折线的形式搜索安全系数最小的滑裂面；搜索中的移动仅当滑裂面仍可接受时才予以保留，而凸性约束可防止搜索趋向锯齿形滑裂面。

$$a = (X - X_O)\cos\alpha - (z - z_O)\sin\alpha \qquad b = (X - X_O)\sin\alpha + (z - z_O)\cos\alpha$$

$$\sum [Na + Sb] - \sum V(X - X_O) - \sum A(z_A - z_O) + M_{reinforcement} + M_{crack} = 0$$



被动与主动构件对FS的贡献

理论

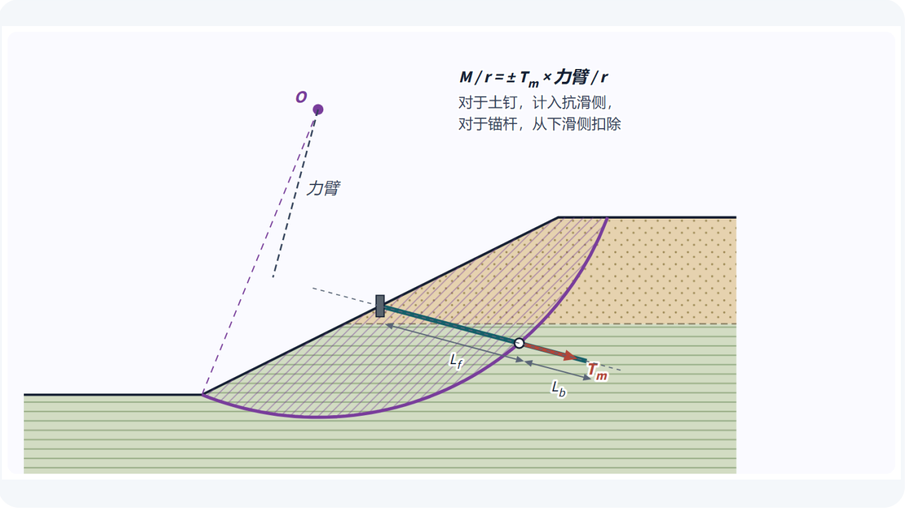
筋材单元为与滑裂面相交的一条线，其位于滑裂面前方、至与圆弧交点为止的长度记为L_f，该点之后的锚固长度记为L_b。

被动构件（土钉、土工格栅）的力矩计入抗力一侧；主动构件（锚杆）在发生位移之前就已承担荷载，因此其力矩从滑动力一侧扣除。

对于相同的力，主动构件比被动构件更能提高安全系数；静力和拟静力工况下该力取值相同。

$$\frac{M}{r} = \pm \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r}$$

$$FS = \frac{\sum R + \sum M_{passive}/r}{\sum D - \sum M_{active}/r}$$



三个值中的最小值

理论

土钉的拉力T = min[T_t, q_u π D_h L_b, q_u π D_h L_f + T_h]，取三者中的最小值。

土钉是被动构件：随土体移动才逐步发挥作用，除以间距Sh后的土钉力表示为T_m = T/S_h。

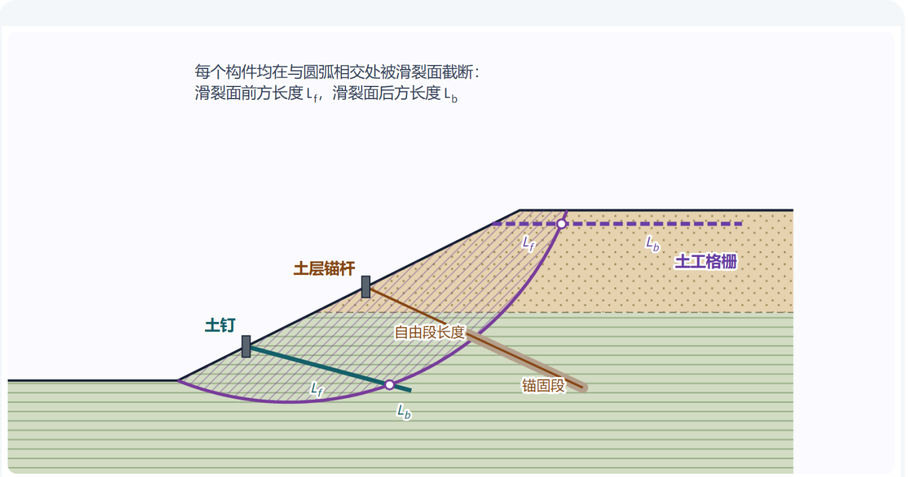
钉头位于圆弧之外，或钉端位于滑动土体之内的土钉，对该圆弧不提供抗力。

自由段内不产生粘结；锚杆由锚固段锚住，锚杆穿过一个圆弧滑裂面时所传递的力取以下三个值中的最小者：**T = min[P, T_t, q_u π D_h L_b]**。

锚杆是主动构件：荷载在土体滑动之前就已存在于锚索中，在Spencer方程中锚杆力为给定力；该力在其中不除以**FS**。

土钉：$T = \min\left[T_t,\ q_u\pi D_h L_b,\ q_u\pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \dfrac{T}{S_h}$

锚杆：$T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u\pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \dfrac{T}{S_h}$



设计强度、拔出、连接

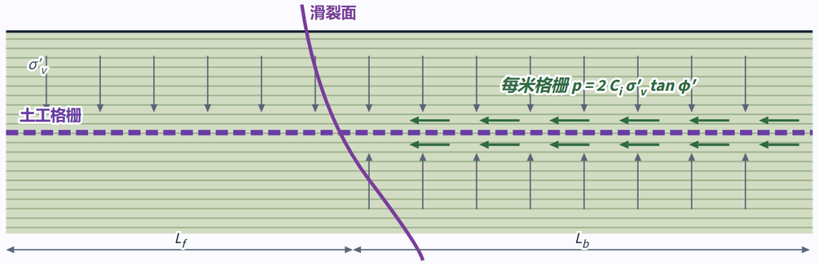
理论

土工格栅由其长度L、每米断面的长期设计强度T_d、土与格栅之间的相互作用系数C_i，以及与墙面板连接时的连接强度T_c来定义。

每米长度的拔出阻力来自有效上覆应力σ'_v作用下两个表面上的摩擦；土工格栅为被动单元，沿片材所在平面方向起作用。

σ'_v由板上方土体的重量（地下水位以下取饱和重度）减去孔隙水压力得到；为偏于安全，未计入地表荷载。

$$p = 2\,C_i\,\sigma'_v\,\tan\varphi' \qquad T_m = \min\left[T_d,\ \int_{L_b} p\,dl,\ \int_{L_f} p\,dl + T_c\right]$$



题目

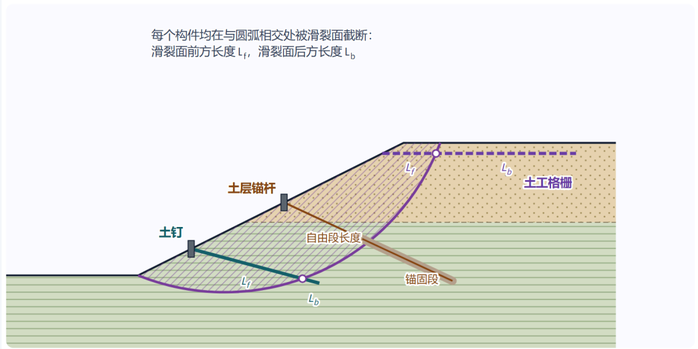
算例

已知条件

土钉	**四根土钉，钉头位于**$x = 14, 18, 22, 26$ **m处（地表），倾斜**15°**，**$L = 14$ **m；**$T_t = 250$ **kN，**$q_u = 120$ **kPa，**$D_h = 120$ **mm，**$S_h = 1.5$ **m**
圆	**土钉模型中搜索得到的圆弧滑裂面：圆心**$(18.29;\ 13.90)$**，**$r = 18.18$ **m**

求

每根土钉的L_f、L_b、T和T_m；力矩贡献；FS。



解答 (1/2)

解答

1 粘结强度（单位长度）与土钉N3

$$q_u \pi D_h = 120\pi(0.120) = \mathbf{45.239}\ \text{kN/m}$$

$$L_f = 11.282\ \text{m},\ L_b = 2.718\ \text{m} \qquad P(32.90;\ 3.08)$$

$$T = \min[250,\ 45.239(2.718) = 122.94,\ 45.239(11.282) = 510.4] = \mathbf{122.94}\ \text{kN}$$

$$T_m = \frac{T}{S_h} = \frac{122.94}{1.5} = \mathbf{81.96}\ \text{kN/m}$$

2 力对圆心的力矩

$$F_x = T_m \cos 15^\circ = 79.17,\quad F_z = -T_m \sin 15^\circ = -21.21\ \text{kN/m}$$

$$\frac{M}{r} = \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r} = \frac{(14.606)(-21.21) - (-10.822)(79.17)}{18.178} = \mathbf{30.09}\ \text{kN/m}$$

土钉N3承担**81.96** kN/m的荷载，起到锚固滑动土体的作用；其力矩使ΣR增加30.09 kN/m（被动构件）。

解答 (2/2)

解答

3 四根土钉的受力（同一方法）

土钉	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	控制项	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	端部位于土体内：不承担荷载	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	后部拔出	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	后部拔出	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	后部拔出	156.12	31.82

4 土钉模型：搜索所得圆弧滑裂面上的FS

方法	无土钉（初始）	土钉加固
普通	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

土钉使FS提高约12%（普通条分法1.569 → 1.753；Bishop法1.740 → 2.018）。

在GeoTerva中验算解答 ↗

曲线形强度包络线及各土条底面处的切线

理论

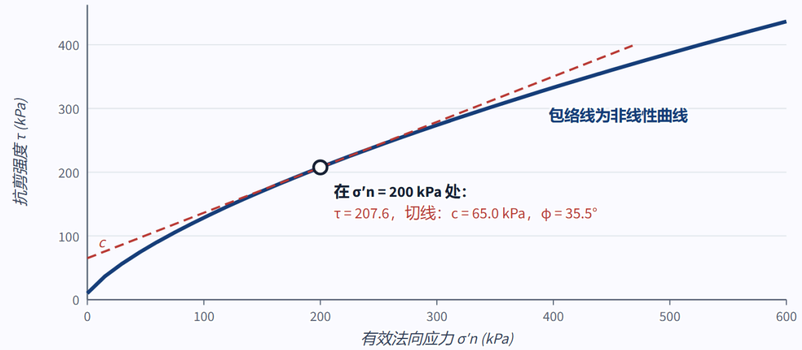
在广义Hoek–Brown准则中，岩体由σ_{ci}, GSI, m_i和D确定；未扰动岩体取D=0，强烈爆破或岩体松弛时取D=1。

由于土条底面的抗剪强度取决于法向应力，曲线形强度包线借助Balmer关系式转换到τ–σ'_n平面；切线在底面处给出ci和φi的值。

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i\, e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad a = \frac{1}{2} + \frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6}$$

$$d = \frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma'_n \tan\varphi_i$$



题目

算例

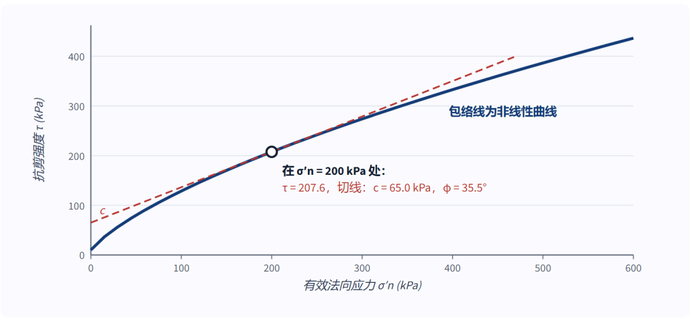
已知条件

岩体　$\sigma_{ci} = 5$ MPa, $GSI = 30$, $m_i = 8$, $D = 0$

底面　**有效法向应力**$\sigma_n' = 200$ kPa

求

m_b、s、a；该应力下的τ、φ_i和c_i。



解答 (1/2)

解答

1 岩体常数

$$m_b = 8\,e^{(30-100)/28} = 0.6567 \qquad s = e^{(30-100)/9} = 0.000419$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{-2} - e^{-20/3}}{6} = 0.5223$$

2 σ'_n = 200 kPa时，σ'_3 = 93.05 kPa（迭代求得）

$$d = 1 + a\,m_b\left(\frac{m_b\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1} = 3.767$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(\frac{m_b\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a} = 602.9\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\,\frac{d-1}{d+1} = 200.0\ \text{kPa}\ \checkmark$$

解答 (2/2)

解答

3 抗剪强度及等效Mohr–Coulomb参数

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')\frac{\sqrt{d}}{d+1} = \mathbf{207.6}\ \text{kPa}$$

$$\varphi_i = \arcsin\frac{d-1}{d+1} = \mathbf{35.48^\circ} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i = 207.6 - 200(0.7128) = \mathbf{65.0}\ \text{kPa}$$

在该基底处，岩石的表现如同Mohr–Coulomb材料，**c_i = 65.0 kPa**，**φ_i = 35.5°**（τ = 207.6 kPa）；应力变化时这些值也随之变化：每个土条采用各自的c和φ。

在GeoTerva中验算解答 ↗

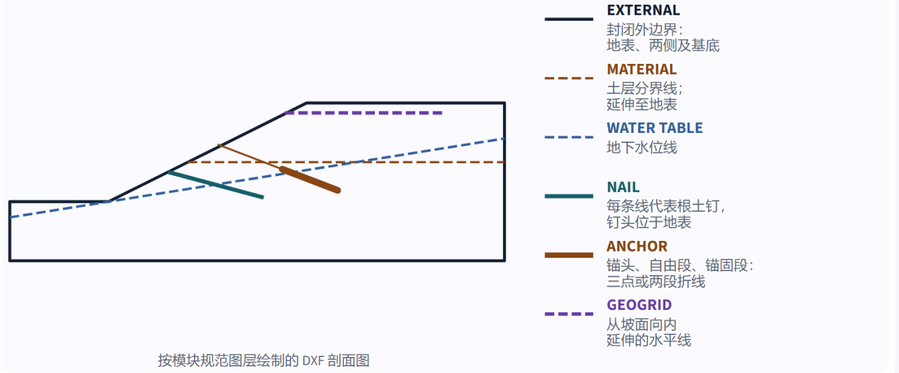
按土层名称读取

理论

读取DXF剖面的图层名称时，不区分大小写，也忽略空格、短横线和下划线的差异；**EXTERNAL**以一条闭合线给出地表、两侧边界和底面。

MATERIAL即各土层之间的分界线；在剖面内终止的线沿地面延伸，并为两条边界之间的每个区域分别指定土层。

WATER TABLE为地下水位线；**NAIL**、**ANCHOR**和**GEOGRID**为筋材，图中未表示的重度、强度、承载力、荷载以及地震作用在“模型”选项卡中输入。



按模块规范图层绘制的 DXF 剖面图

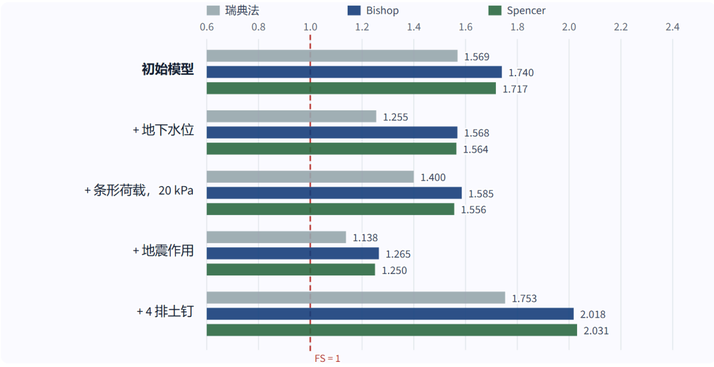
结果表

同一剖面，五个模型，三种方法

模型（添加某项后，重新搜索圆弧）	圆心(x_c; z_c)	r (m)	土条	普通	Bishop	Spencer
初始模型（静力）	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+向边坡内部升高的地下水位	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ 20 kPa条形荷载，x = 25 – 32 m	16.25; 15.44	16.66	35	**1.400**	**1.585**	**1.556**
+ 地震，kh 0.15，kv 0.05（最不利）	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ 四根土钉，长14 m	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**

普通条分法的结果始终最低；Bishop法与Spencer法结果相近（对圆弧滑裂面，相差仅百分之几）。

水和地震使FS下降最多（分别为1.255和1.138，普通条分法）；设置四根土钉后FS提高到1.753。设置土钉后，Bishop法和Spencer法的FS均超过2.0。



基本假定

模型的假定及其未涉及的内容

模型假定为平面应变：取无限长边坡的一米宽度，各方向强度相同（各向同性岩体准则除外），且在运动开始前土体为刚性。

水的处理：采用指定线以下的静水压力，或采用以上覆土重为基准的r_u比值；不进行渗流分析，水位骤降时取$\bar{B} = 1$，即按瞬时降落考虑。

对于**土条**，所有量均取土条中线处的值，负的有效法向力取为零；地震按拟静力系数处理，忽略坡面积水的惯性力。

Spencer法假定土条间力在整个滑动体中以同一个角度相互平行；三种方法均满足力矩平衡，而力的平衡仅Spencer法满足。

搜索在初始滑裂面附近找出安全系数最小的滑裂面；但并未证明它是所有滑裂面中的最小者。

不支持的内容

三维效应（滑动体端部、边坡宽度）

变形、渐进破坏、应变软化

渗流和固结：孔隙水压力为给定值，不作计算

动力分析(Newmark)：拟静力计算只是一种验算

结论：给出FS；合适的取值由工程师和规范确定

小结

要点回顾

FS = ΣR/ΣD；R = cL + N′ tan φ′，D = W sin α（对圆心取矩）。三种方法的区别仅在于如何求得**N′**

土条22（算例）：α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → 普通条分法N′ = 77.79, R = 42.55, D = 42.25；Bishop法N′ = 86.56, R = 45.40；Spencer法N′ = 80.76, R = 43.51 kN/m

同一圆弧：**1.569（普通条分法）· 1.740（Bishop法）· 1.717（Spencer法）**；最危险圆弧是在15 × 15 × 12的网格上试算4650个圆弧后求得的

水：$u = \gamma_w h_w$使N′减小；**地震**：F_h使法向力减小，并增加力矩；**拉裂缝中的水**使ΣD增加P_w产生的力矩

筋材：被动式筋材（土钉、土工格栅）计入抗力一侧，主动式筋材（锚杆）从滑动力一侧扣除；**Hoek–Brown**：每个土条底面处取切线c_i、φ_i

参考文献

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, 4, 445–463.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26.

Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79–93.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley.

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, 83–123.

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

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, 1, 267–273.

Balmer, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Proceedings ASTM, 52, 1260–1271.

Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. (2015). Soil Nail Walls — Reference Manual. Geotechnical Engineering Circular No. 7, FHWA-NHI-14-007.

Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). Ground Anchors and Anchored Systems. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Geotechnical Engineering Circular No. 11, FHWA-NHI-10-024.

注

全部数值算例均由模块自身的计算库生成；模块给出相同的数值。模块页面中的工程算例模型也是该剖面（10 m高的2:1边坡，填土上覆黏土）。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

绘制自己的剖面，或从DXF文件读入；输入土层、水、荷载、地震和筋材。模块搜索最危险圆弧滑裂面，给出三种方法的安全系数、土条表、分步解答和报告。

打开模块→　理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。