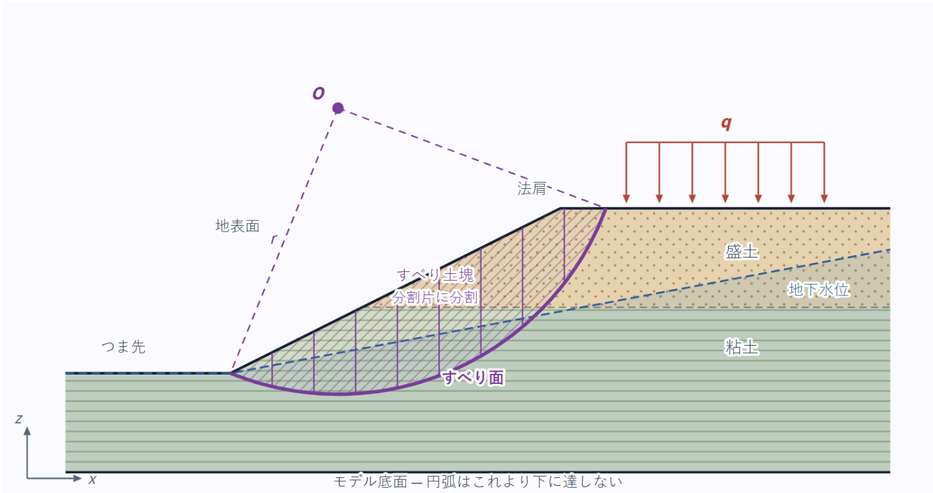
地盤工学の講義スライド・斜面安定

斜面安定：極限平衡（分割法）

講義：極限平衡分割法；1つの円弧すべりと1つの分割片についての詳細な手計算、残りの分割片および項目を表で示す。

分割法
簡便法・Bishop・Spencer
臨界円
水・荷重・地震・亀裂
補強材・Hoek–Brown



はじめに

この講義で学ぶこと

極限平衡の考え方：すべり面上の土塊は、強度が同一の割合で発揮される剛体である。**FS = 強度 / 必要応力**

地塊を**分割片**に分割すること：各分割片の重量W、底面傾斜α、底面長さL、水圧力U

3つの手法（簡便法/Fellenius法、簡易Bishop法、Spencer法）を単一の円弧すべり面および**単一の分割片**について詳細に解くこと

同じ計算を**残りの32分割片**でどのように繰り返すか、および結果の表；臨界円の探索

水・載荷・地震・引張亀裂・補強材（ソイルネイル・アンカー・ジオグリッド）および岩（Hoek–Brown）の影響を

講義の流れ

まず**理論**、次に単一円弧と単一分割片による**手計算**：

1 · **理論**：FS、分割片、3手法

2 · **問題**：単一円、単一分割片

3 · **解答**：分割片22は手計算；残りは**表**

モデル：高さ10 mの2:1斜面、上部に盛土（γ = 18、c' = 5、ϕ' = 30°）、下部に粘土（γ = 17.5、c' = 20、ϕ' = 18°）、水・載荷重・地震なし。力は断面1 m当たりである（kN/m）。

排水、非排水、深さとともに増加

理論

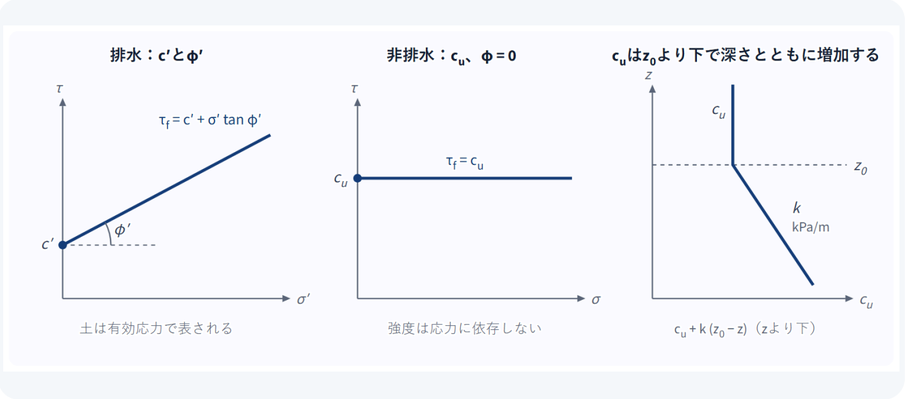
排水条件の地盤のせん断強さは、有効応力 $\sigma' = \sigma - u$で表したMohr–Coulomb包絡線で与えられ、c'とϕ'のパラメータで定義される。

排水が生じ得るよりも速く載荷された飽和粘土では、強さは垂直応力に依存しない**非排水せん断強さ**c_uであり、$\phi = 0$とする。多くの自然粘土ではc_uは深さとともに線形に増加する。

分割片の強さは底面中央のレベルで読む。岩の固有の規準は別であり、排水か非排水かの選択は技術者に委ねられ、解析の最初の仮定を構成する。

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

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



強度／必要応力；円弧中心に関するモーメント

理論

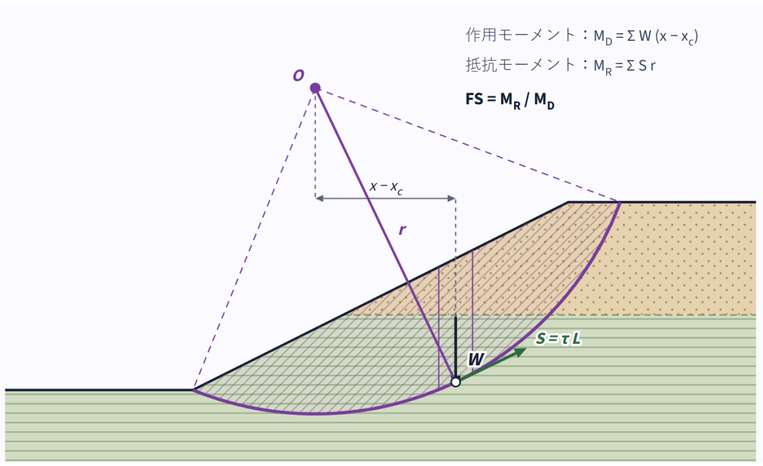
安全率（FS）は、地盤が有するせん断強さと釣合いに必要なせん断応力との比であり、すべり面に沿って各点で同じ値と仮定する。

円形すべり面では支配的なつり合いはO点まわりのモーメントのつり合いである。モーメントを半径で除し、比をFS = Σ R / Σ Dの形で表す。両方の和はいずれもkN/mである。

3つの方法は、各分割片の底面に作用する有効垂直力（N′）の求め方で異なる：簡便法は重量のみから、Bishop法は鉛直方向のつり合いから、Spencer法は力とモーメントの両方のつり合いから求める。

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

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



形状、重量、底面の力

理論

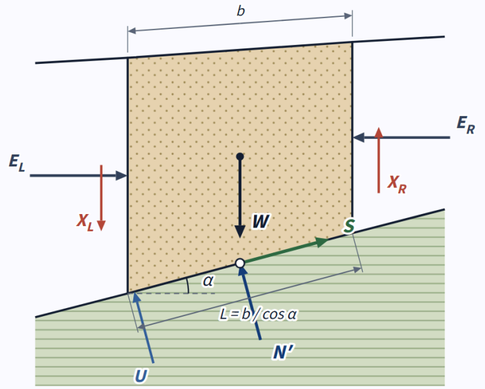
すべり面と地盤表面の間の土塊は、分割片の数または最大分割片幅に応じて鉛直線により分割片に分割される。

すべり土塊内の重要な交点はすべて分割片の境界とする。これにより各底面は単一の地盤を通過し、各分割片は単一の種類の荷重を負担する。

分割片中央の鉛直線上において、底面傾斜 α は、すべり円弧の中心が斜面天端側にある場合を正、斜面つま先側にある場合を負とする。

有効垂直力N′ = N − U；負のN′は底面が引張状態にあることを示し、簡便分割法とBishop法ではN′をゼロに保つ。

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



W	分割片の重量
N′	有効垂直力
U = uL	底面の間隙水圧による力
S	せん断力（用いた強度）
E, X	分割片間力

分割片間の力なし

理論

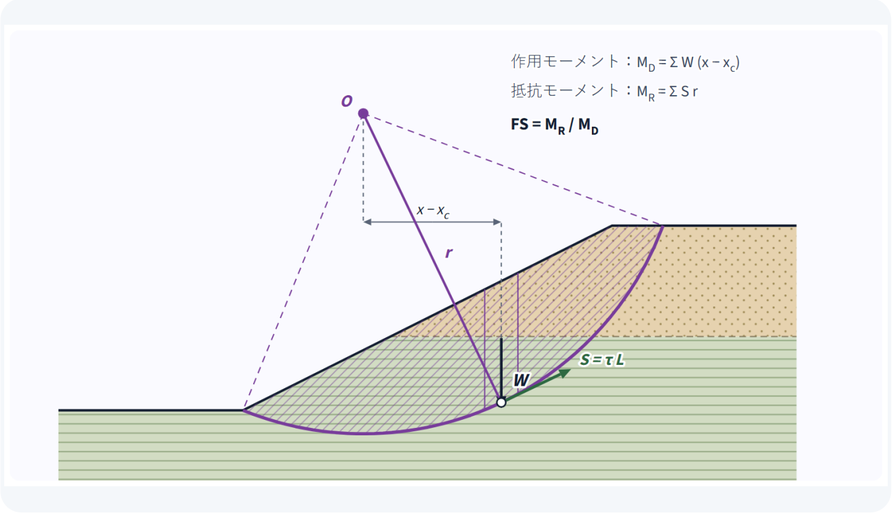
Fellenius（スウェーデン）法では分割片間の力は完全に無視され、各分割片は底面に直角な方向のみでつり合う。

このつり合いにより、垂直力は重量と荷重から求まる。安全率はモーメントの比で得られ、均質地盤ではFS = Σ [c b / cos α + W cos α tan ϕ] / Σ W sin α の関係式に帰着する。

この方法は簡単で安定しており安全側である。誤差は円弧の深さと間隙水圧とともに増大し、深い円弧では他の2手法よりかなり低い結果を与えることがある。

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

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



各分割片の鉛直方向のつり合い；反復計算による解

理論

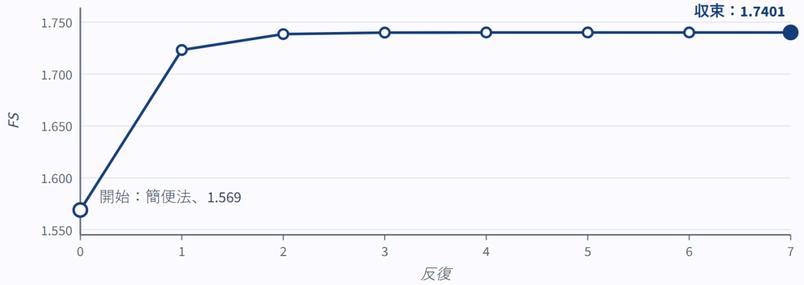
簡便法（Bishop法）では分割片間のせん断力は無視するが、各分割片の鉛直方向のつり合いは満たし、底面のせん断力は発揮されたせん断強さに等しいと仮定する。

FSは方程式の両辺に現れるため、式は簡便法（分割法）の値から始めて反復計算で解く。数手順で十分である。

負の**N′**はゼロに保持し、m_αが0.2未満に低下することは許さない；この制限は深い円弧すべりのつま先部分で重要となる。

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

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



力とモーメントのつり合い；平行な分割片間の力

理論

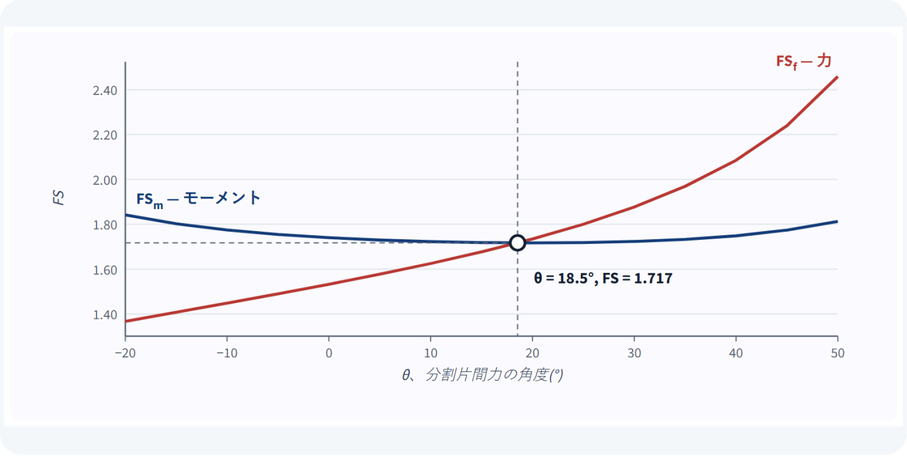
Spencer法は力のつり合いとモーメントのつり合いの両方を満たす；分割片間の力は互いに平行であり、せん断力は垂直力の一定の割合である。

土塊の両端の側面は自由であるため、Σ ΔE = 0が力のつり合いを与え、各角度 θ について安全率FS_fが得られる。

円中心まわりのモーメントは第2の値を与える。FS_m = Σ [c L + N′ tan ϕ] / Σ D。$FS_f(\theta)$と$FS_m(\theta)$は単一の角度で交差し、これが解を構成する。

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

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



何を満たし、何を無視するか

理論

手法	分割片間の力	力のつり合い	モーメントのつり合い	表面	FS（同じ円）
簡便法（Fellenius）	なし	底面法線のみ	✓	円	**1.569**
簡易Bishop	法線方向のみ（せん断なし）	分割片あたりの鉛直	✓	円	**1.740**
Spencer	平行：$X = E \tan\theta$	水平＋鉛直	✓	各面	**1.717**

簡便分割法は手計算で照査でき、かつ安全側の既定の手法である；その結果は3手法の中で最も小さい。

Bishop法は円弧すべり面に対して通常の選択肢であり、その結果は円弧すべり面上のSpencer法の結果と数%しか異ならない。

Spencer法は全力の釣合いを満足し、円弧以外のすべり面に用いられる；計算負荷が最も大きい手法であり、一部の円弧では解が見つからない。

問題

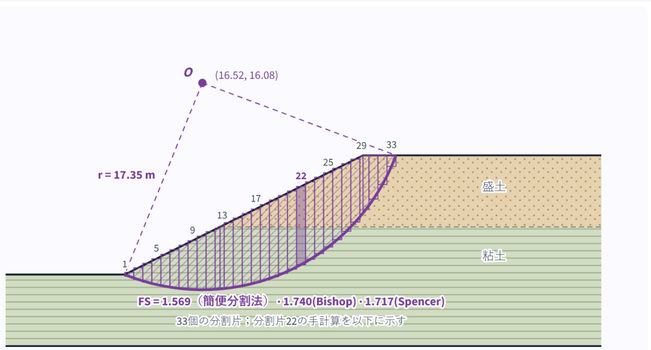
例題

与条件

断面	**地表面$(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ m；底面$z=-6$ m；$z=4$ mの上方は盛土、下方は粘土**
地盤（土）	**盛土$\gamma=18$ kN/m³、$c'=5$ kPa、$\varphi'=30^\circ$；粘土$\gamma=17.5$ kN/m³、$c'=20$ kPa、$\varphi'=18^\circ$；水・載荷・地震なし**
円弧すべり	**中心$x_c=16.52$ m、$z_c=16.08$ m；半径$r=17.35$ m（限界円、検索で見つかったものを参照）**

求めるもの

円が地盤と交わるx_aおよびx_bの点、最下点、および**分割**。



解答

解答

1 円と地表面の交点：$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

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

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

2 最下点と分割

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

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

円弧はx = 10.00（つま先）と32.77 m（頂部）の間で地盤を横切る；x = 10、18、30 mの境界でさらに3つの分割片を分割する：**33分割片**。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

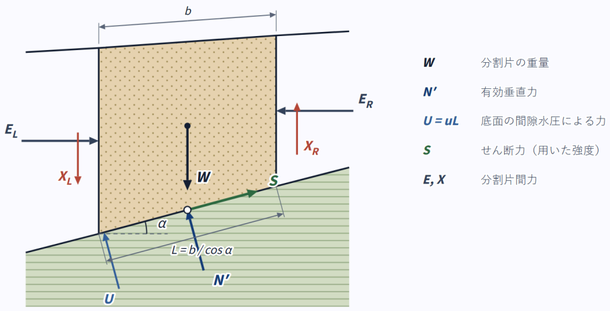
例題

与条件

分割片	**例題1の円弧の22番目の分割片：中点$x_m = 24.800$ m、幅$b = 0.759$ m**
地盤	**盛土$\gamma = 18$ kN/m³（$z > 4$ m）、粘土$\gamma = 17.5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18°$（基礎は粘土中）、$u = 0$**

求めるもの

分割片の**α**、**L**、**W**の値。**N′**、**R**および**D**（簡便法）。



解答 (1/2)

解答

1 底面勾配と長さ

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

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

2 柱の高さと重量（盛土＋粘土）

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

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

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

分割片22は**最も重い分割片**である（W = 88.52 kN/m）；底面は28.5°傾斜し、粘土中に留まる（c′ = 20 kPa、ϕ' = 18°）。

解答 (2/2)

解答

3 法線力と抵抗（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 滑動を生じさせる作用

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

分割片22：**R = 42.55** kN/m、**D = 42.25** kN/m。各分割片のRとDは**同じ3手順**で求める；安全率はそれらの総和の比である：**FS = ΣR/ΣD**（以降のページに表を示す）。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

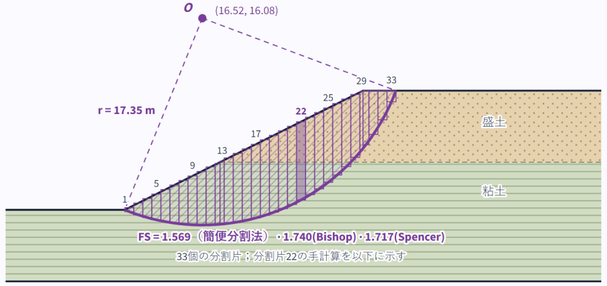
例題

与条件

分割片	**例題1の円、33分割片；各分割片は例題2の三つの手順で解く**
手法	**簡便法（Fellenius）：分割片間の力はなし**

求めるもの

すべての分割片の表：**W, N′, R, D**およびそれらの合計。**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 合計と安全率

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

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

この円弧に対する簡便法の結果は**FS = 1.569**である。つま先側の分割片（$\alpha < 0$）では底面がすべりに対して傾斜しているため、Dは負となりΣDを減少させる。分割片22は表の22行目であり、手計算の値と一致する。

ΣR/ΣD：**抵抗**の駆動効果に対する比；FS > 1ならこの円弧に沿ったすべりは予想されない。

簡便法は最も低い値を与える；BishopとSpencerは同じ円弧でより高くなる（続く例題）。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

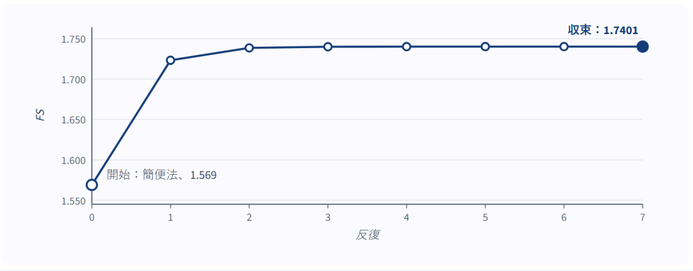
例題

与条件

分割片と円弧	**例題2の22番目の分割片と例題1の円弧。初期値は例題3の$FS_0 = 1.569$**
手法	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

求めるもの

分割片22について**m_α**、**N′**、**R**。円弧全体について**反復計算**と**FS**。



解答 (1/4)

解答

1 第1回反復計算（FS_0 = 簡便法の値 = 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 収束値にて（FS = 1.7401）

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

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

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

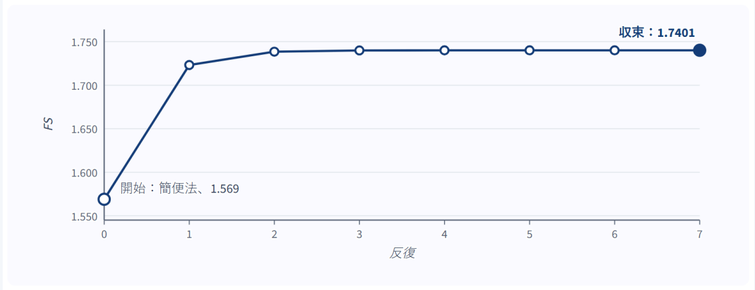
分割片22の垂直力は簡便法の77.79から**86.56** kN/mに増加する（分割片間の鉛直つり合い）。抵抗は42.55 → **45.40** kN/mとなる。同じ手順を33の分割片で繰り返す。

解答 (3/4)

解答

2 各反復でΣRを再計算し、$FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$とする。

反復回数 k	FS_k	差
0（簡便法）	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



7回の反復で**FS = 1.740**；ΣR = 1,115.97、ΣD = 641.34 kN/m。簡便法（1.569）より10.9%高い。

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**

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

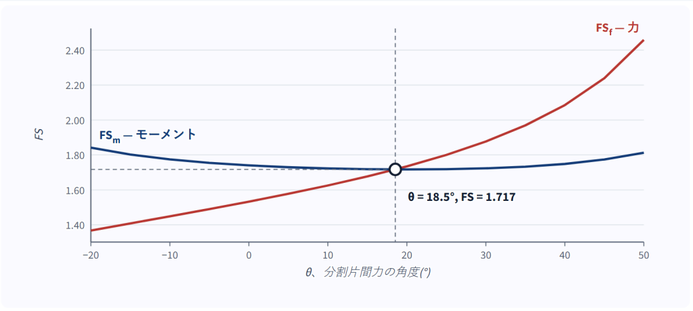
例題

与条件

分割片と円弧	**例題2の22番目の分割片、例題1の円弧；分割片間の力は平行、$X = E\tan\theta$**
すべり面の角度	$\theta = 18.54°$（**下の2曲線が交差する角度**）、$FS = 1.717$

求めるもの

分割片22について**ΔE**、**N′**、**R**、**E**および**X**；θ–FS曲線と円弧全体。



解答 (1/4)

解答

1 分割片の法線力の差 ΔE（θ = 18.54°、tan θ = 0.3354、FS = 1.717）

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

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

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

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

解答 (2/4)

解答

2 法線力、抵抗および分割片間の力

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

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

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

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

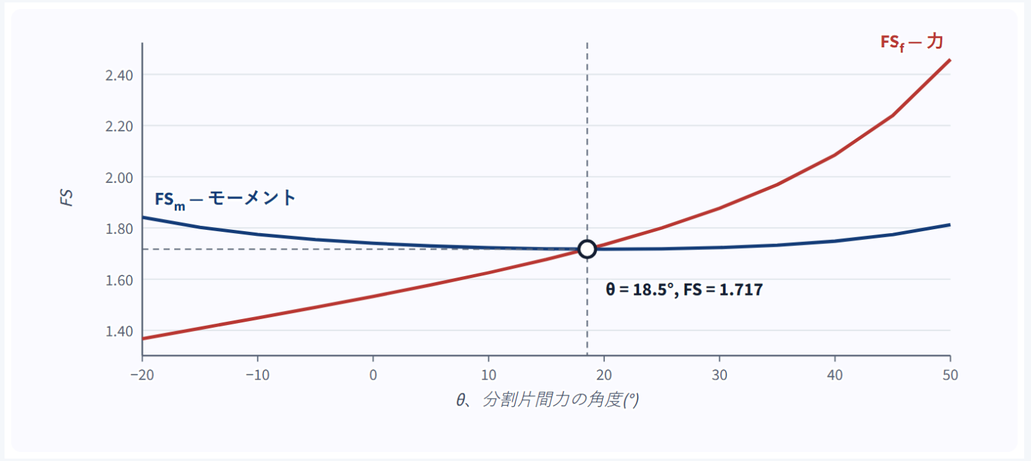
Spencer法では分割片22の垂直力は**80.76** kN/mである（簡便法77.79、Bishop法86.56）；分割片間力としてつま先側へE = 254.69 kN/mが作用する。

解答 (3/4)

解答

3 各θについてFS_f（Σ ΔE = 0）とFS_m（モーメント）。交点が解である。

θ (°)	FS_m（モーメント）	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（つま先）	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°; Σ R = 1,101.18, Σ D = 641.34 → **FS = 1.717**. E_{max} = 281.9 kN/m.

GeoTervaで解答を確認する ↗

重量、間隙水圧、斜面内の水

理論

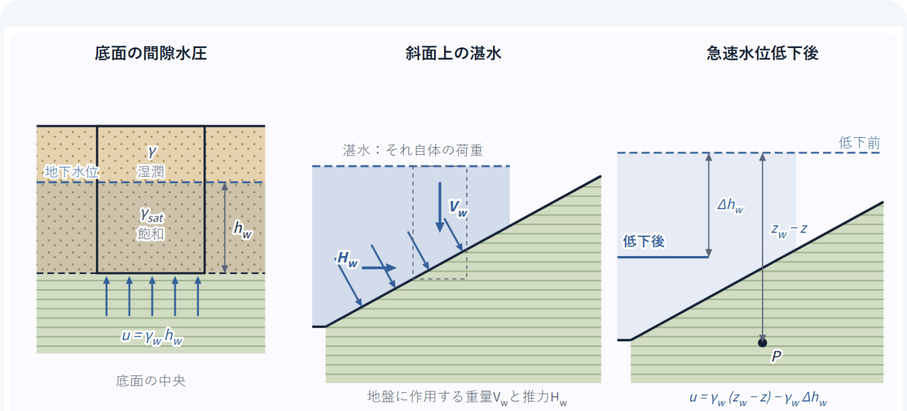
水は3通りの形で解析に取り込まれる：飽和土の重量、各分割片の底面で強さを低減する間隙水圧、および斜面のその位置にそれ自体の荷重として作用する水である。

地下水位線より下方では間隙水圧は静水圧である；浸透流を解析しないため、傾斜した地下水位は流線網への近似であり、水中単位体積重量は決して用いない。

間隙水圧が上載荷重に対する比として既知である場合、地盤にr_uの比を与える；これは施工段階の盛土または軟弱粘土上の盛土に対して該当する。

斜面前面の水が排水可能なため急速に低下すると支持が失われ、間隙水圧は保持され、安全率は水位低下直後の最小値に対応する。

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



問題

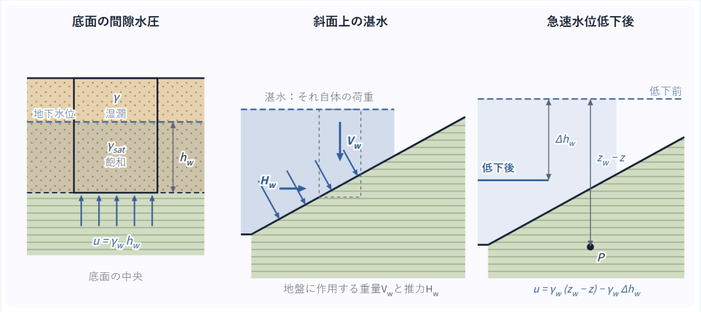
例題

与条件

水位線	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ m、**静水圧；$\gamma_w = 9.81$ kN/m³；飽和単位体積重量は盛土20、粘土19.5 kN/m³**
分割片	**同一円弧；$x_m = 24.800$ mにおける分割片（水がある場合は33番目ではなく24番目の分割片となる）**

求めるもの

分割片における**z_w**、**h_w**、**u**、**U**；新しい**W**、**N′**、**R**、**D**；円弧全体に対する**FS**。



解答 (1/2)

解答

1 水高さと間隙水圧

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

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

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

2 重量：水面より上は湿潤、下は飽和

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

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

水は重量を乾燥時の88.52 kN/mから**92.14** kN/mへ増加させるとともに、底面に**U = 20.23** kN/mの水圧力を生じさせる。

解答 (2/2)

解答

3 有効垂直力、抵抗、滑動を生じさせる作用（分割片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 全円（36分割片、同一円弧）と乾燥状態との比較

手法	ΣU	ΣR	ΣD	FS (水)	FS（乾燥）
簡便法	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

同じ円弧に対して、水はFSを1.569 → **1.343**（簡便法）に低下させる。水位線を考慮して臨界円弧を再探索すると、より浅くなり**1.255 / 1.568 / 1.564**となる（簡便法 / Bishop / Spencer）。

GeoTervaで解答を確認する ↗

帯状荷重と集中荷重；鉛直、直角、傾斜

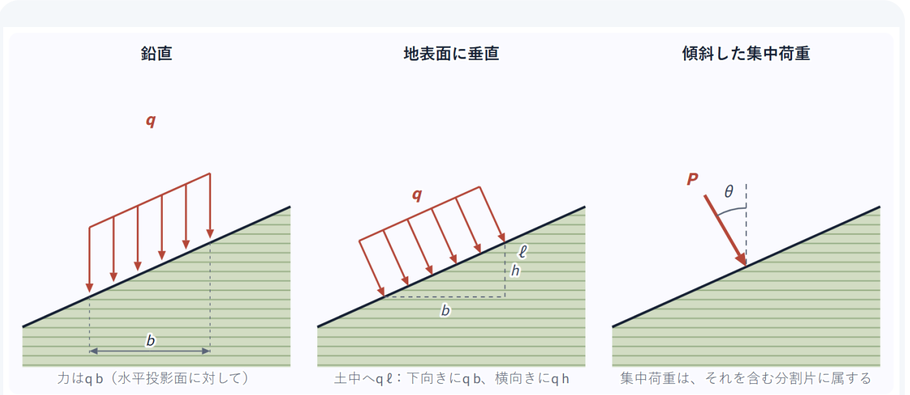
理論

鉛直または傾斜して作用する帯状荷重は水平投影上でとられ、水平幅bの部分に働く力はq bである。

面に垂直に作用する荷重は面の長さにわたってとる；長さℓの区間における力はq ℓであり、鉛直成分はq b、水平成分はq hである。

各分割片は、荷重のうちその両端の間に入る部分を水平幅に応じて分担して受け持ち、集中荷重はその作用点を含む分割片に帰属する。

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



分割片の重心における慣性力

理論

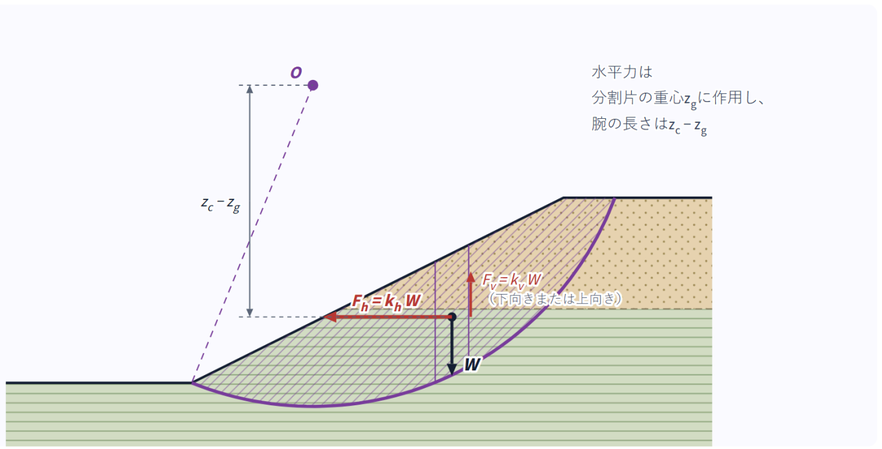
震度法のアプローチでは、地震動はすべり土塊に作用する一定の加速度で表され、gの割合として表される。

各分割片において、地盤質量の慣性力（W_{soil}）は、分割片上に集積した水がこの力を担わないため、分割片内の地盤の湿潤部および飽和部から求めた重心（z_g）に作用させる。

限界状態のオプションでは、水平方向および鉛直方向の両方向を検討し、最小の安全率を採用する；係数はユーザーが与え、静的および**震度法**のFSを併せて報告する。

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

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



問題

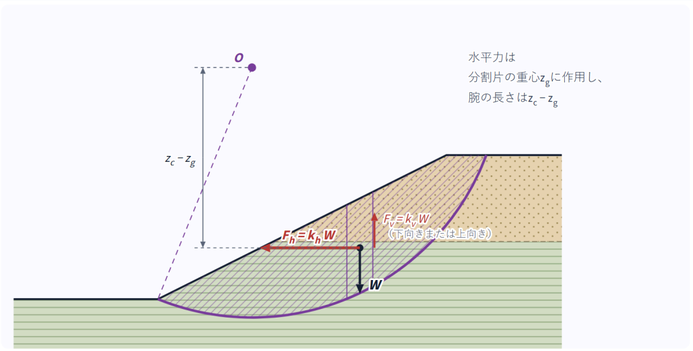
例題

与条件

地震	$k_h = 0.15$、$k_v = 0$；**水平力はつま先方向（限界方向）**
分割片と円弧	**例題2における分割片22と円弧：重心は腕の長さz_gに必要である**

求めるもの

分割片22において**F_h, N′, R, D**；円弧全体について3手法により**$FS_{地震}$**を求める。



解答 (1/2)

解答

1 慣性力と腕の長さ

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

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

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

2 法線力、抵抗、滑動力

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

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

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

滑動効果は42.25 → **51.39** kN/m（+22%）、抵抗は42.55 → **40.49** kN/m：水平力は法線力を減少させ、滑動モーメントを付加する。

解答 (2/2)

解答

3 同一円弧上での3手法（$k_h = 0.15$、$k_v = 0$）

手法	ΣR	ΣD	FS（静的）	FS（地震）
簡便法	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**

$k_h = 0.15$はFSを約27%低下させる（通常 1.569 → **1.152**）。地震作用時には臨界円も変化する：ページ上のモデル（$k_h = 0.15$、$k_v = 0.05$、臨界方向）では探索結果は1.138 / 1.265 / 1.250となる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

引張亀裂内と深部の水

理論

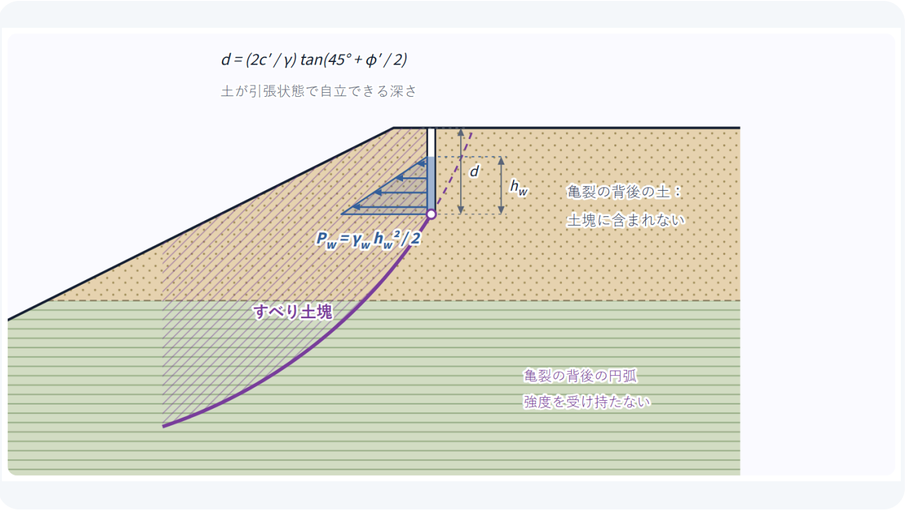
引張亀裂の深さはd = 2c′/γ·tan(45° + ϕ′/2)で求められる。非排水状態ではこの深さは$2c_u/\gamma$となる。

亀裂が有効な場合、すべり面はすべり土塊の深さが亀裂深さに等しくなる点で終端する；亀裂背後の地盤はすべり土塊に含まれず、円弧の亀裂内に含まれる部分は抵抗を負担しない。

亀裂内に高さ h_w まで滞留する水は静水圧の力で圧力を及ぼす；水で満たされた亀裂は安全率を低下させ、この状態は見落とされやすい。

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

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



問題

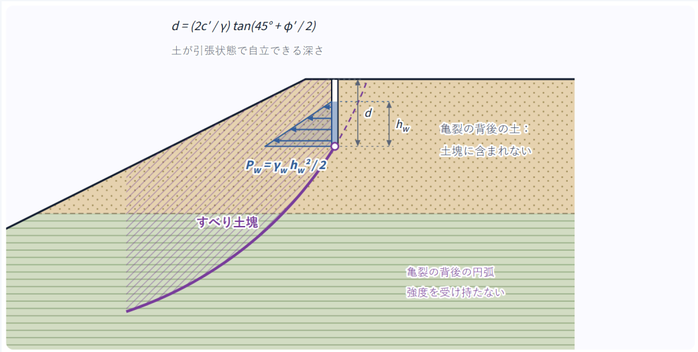
例題

与条件

亀裂	上部、$d = 2$ mの深さの鉛直亀裂（モデルの初期値）；乾燥状態と水で満たされた状態（$h_w = 2$ m）の2つのケース
円形	例題1の円；亀裂の下端で終わる

求めるもの

亀裂のx位置。P_w、z_f、D_{crack}。3つの方法によるFS。



解答 (1/2)

解答

1 引張亀裂の位置：円弧が標高z = 10 − 2 = 8 mに達する地点で終わる

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

2 亀裂内の水（h_w = 2 m）：力とモーメント

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

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

Rankine深さは盛土で0.96 m、粘土で3.15 mである。モジュールは引張亀裂深さを技術者が入力した値（ここでは2 m）で扱う。水で満たされた亀裂はΣDに**8.38** kN/mを加える。

解答 (2/2)

解答

3 亀裂なし、乾燥亀裂および水で満たされた亀裂（同一円弧；亀裂内に34分割片）

手法	FS 引張亀裂なし	ΣR	ΣD（乾燥）	FS 乾燥亀裂	ΣD（水）	FS 水で満たされた亀裂
簡便法	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**

乾いた亀裂はFSをほとんど変えない（上記の駆動質量とすべり面上の抵抗がともに変化する：1.569 → 1.585）；**水で満たされた亀裂**は低下させる（1.564）。亀裂内の水は最も忘れられやすいケースである。

GeoTervaで解答を確認する ↗

中心の格子、半径、細分化

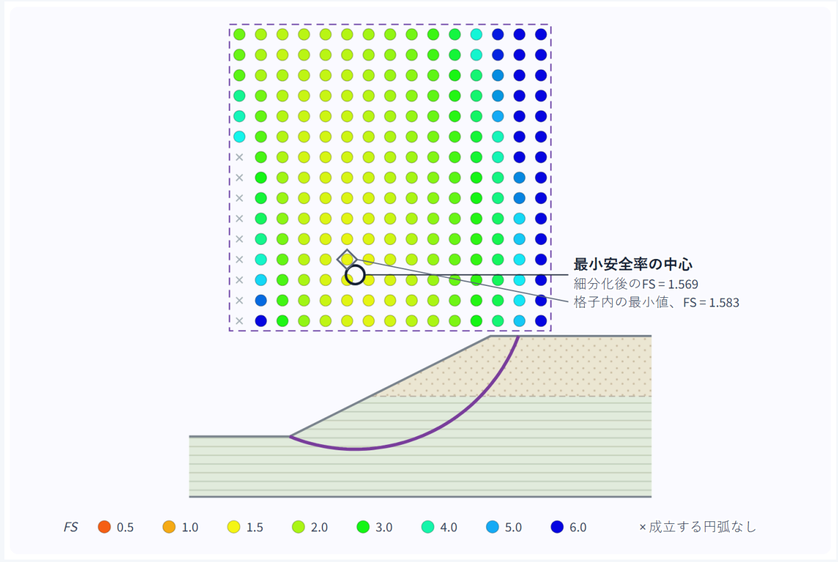
理論

臨界円の探索は、斜面に配置した$n_x \times n_z$点の中心格子について行い、各中心で等間隔の半径の組を試す。

各円を分割片に分けて解き、各中心に対して得られた最小の安全率を対応する半径とともに保存する。計算例では 15 × 15 の中心と 12 の半径で 4650 個の円を試行した。

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

計算モデル	値
格子（$n_x \times n_z \times$ 半径）	15 × 15 × 12
試行円／採用円	4,650 / 3,487
格子のうち最小のもの	FS = 1.583
細分化後	**FS = 1.569**
臨界円	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



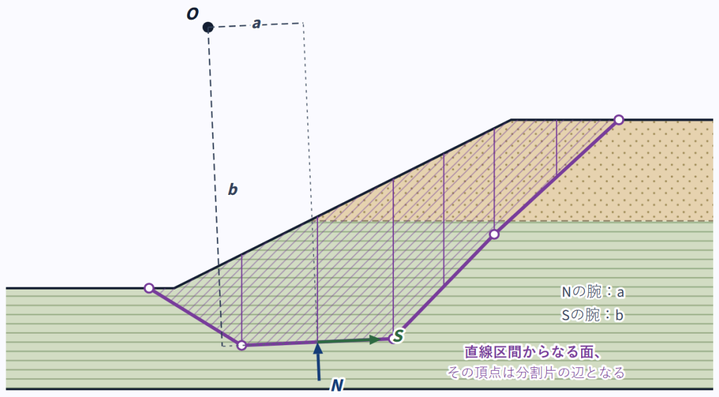
折れ線、Spencerのみ

理論

非円形のすべり面は、斜面天端から下降し斜面つま先に向かって上昇するくさびで弱層に沿うことがあり、両端が地表面にある多角形の面である。

複数の直線からなるすべり面では、モーメントの式はすべり土塊のつま先上方に選んだ点Oのまわりで立てる。Nの腕の長さはa、Sの腕の長さはbである。

安全率が最小となる面はn分割の折れ線として探索する；運動は面が許容範囲にとどまる場合にのみ維持され、凸性の制約はジグザグ面へ向かうことを防ぐ。



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

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

受働要素と主働要素のFSへの寄与

理論

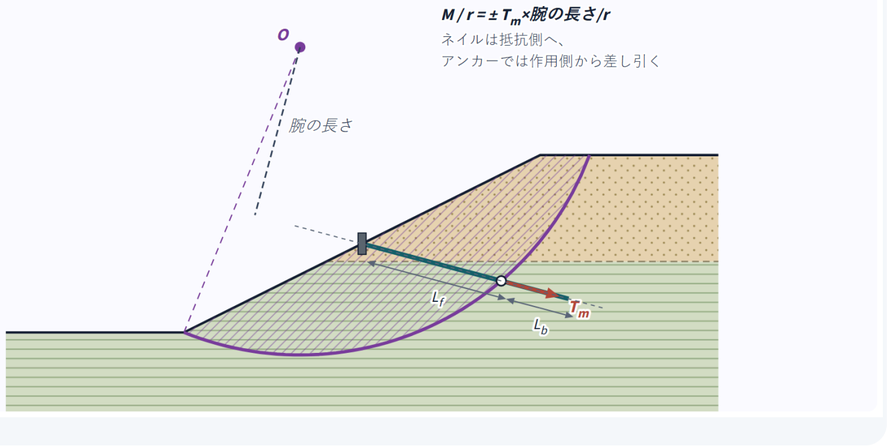
補強材はすべり面を横切る線であり、円弧と交わる点までのすべり面の前方の長さをL_f、この点より後方の定着長をL_bで表す。

受働要素（ソイルネイル、ジオグリッド）のモーメントは抵抗側に加算する。能動要素（アンカー）は移動前に荷重を負担するため、そのモーメントは駆動側から減算する。

同じ力に対して、能動要素は受動要素よりも安全率を大きく増加させる。力は静的および震度法の場合で同一としている。

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

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



3つの値のうち最小のもの

理論

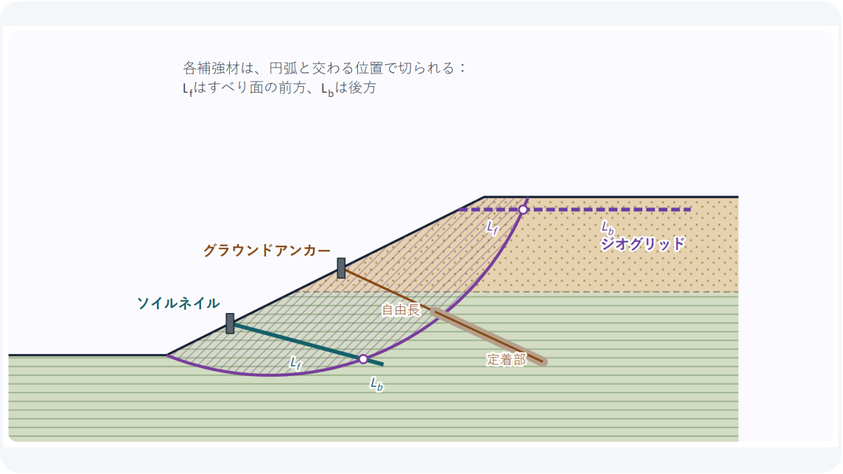
ソイルネイルの引張力は$T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$、すなわち3つの値の最小値である。

ソイルネイルは受動的な要素である：地盤質量が移動するにつれて機能し、Sh間隔で除したソイルネイルの力は$T_m = T/S_h$で表される。

先端が円弧の外側にあるか、先端が土塊の内部にあるソイルネイルは、その円弧に対して力を負担しない。

自由長部では付着は生じない；アンカーは根固め部が保持し、アンカーがすべり円を横切って伝達する力は3つの値の最小値である：**$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**。

アンカーは能動的要素である：荷重は地塊が移動する前からテンドンに存在し、Spencer の方程式ではアンカーは所与の力であり、そこでは**FS** で除されない。



ソイルネイル：$$T = \min\left[T_t,\ q_u \pi D_h L_b,\ q_u \pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

アンカー：$$T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u \pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

設計強度、引抜き、接合部

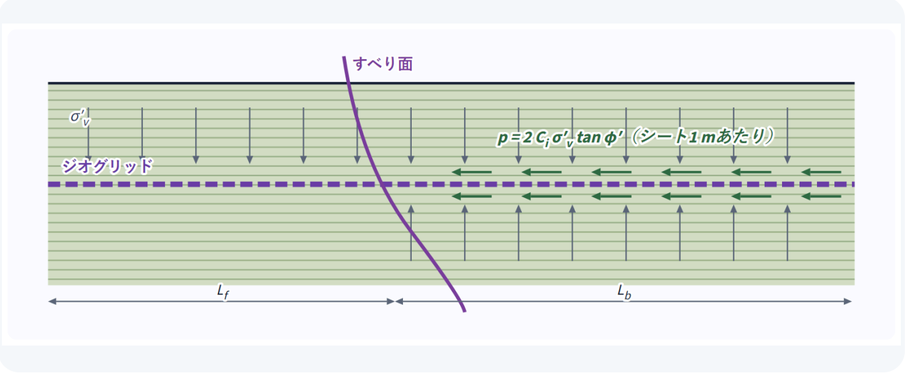
理論

ジオグリッドは、長さL、断面1 m当たりの長期設計強度T_d、地盤とジオグリッドの相互作用係数C_i、および壁面材に接続したときの接続強度T_cで定義される。

長さ1 m当たりの引抜き抵抗は、有効上載圧 σ'_vの下で両面の摩擦によって生じる。ジオグリッドは受動的な要素であり、シート面内で作用する。

σ'_vは、載荷板の上の地盤の重量から――地下水位以下では飽和単位体積重量を用いて――間隙水圧を差し引くことで求められる；地表載荷は安全側として考慮していない。

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



問題

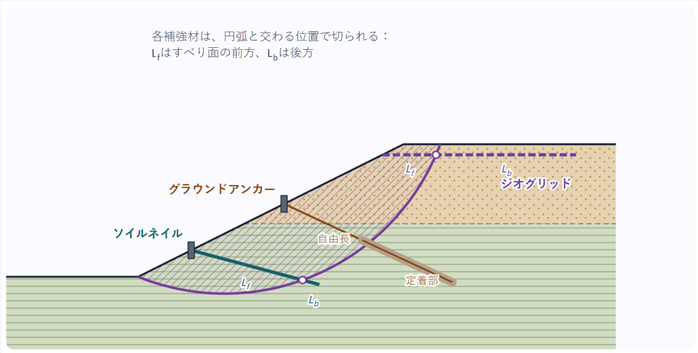
例題

与条件

ソイルネイル	**4本のソイルネイル、頭部は$x = 14, 18, 22, 26$ m（地表）、15° 傾斜、$L = 14$ m；$T_t = 250$ kN、$q_u = 120$ kPa、$D_h = 120$ mm、$S_h = 1.5$ m**
円形	**補強材モデルで探索が求めた円弧：中心$(18.29;\ 13.90)$、$r = 18.18$ m**

求めるもの

各土ソイルネイルについてL_f、L_b、TおよびT_m；モーメントへの寄与；**FS**。



解答 (1/2)

解答

1 付着強度（単位長さ）とグラウンドアンカー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 円中心に関する力のモーメント

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

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

アンカーN3は地塊を保持する**81.96** kN/mの荷重を負担する。そのモーメントはΣRに30.09 kN/mを加える（受働要素）。

解答 (2/2)

解答

3 4本のソイルネイルの力（同一手法）

ソイルネイル	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	支配的	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	先端が土塊内部：荷重を支持しない	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	背面の抜出し	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	背面の抜出し	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	背面の抜出し	156.12	31.82

4 補強材モデル：探索で見つかった円上のFS

手法	補強材なし（掘削）	ソイルネイル付き
簡便法	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

ソイルネイルはFSを約12%増加させる（簡便法 1.569 → 1.753；Bishop 1.740 → 2.018）。

GeoTervaで解答を確認する ↗

曲線状の強度包絡線と各底面における接線

理論

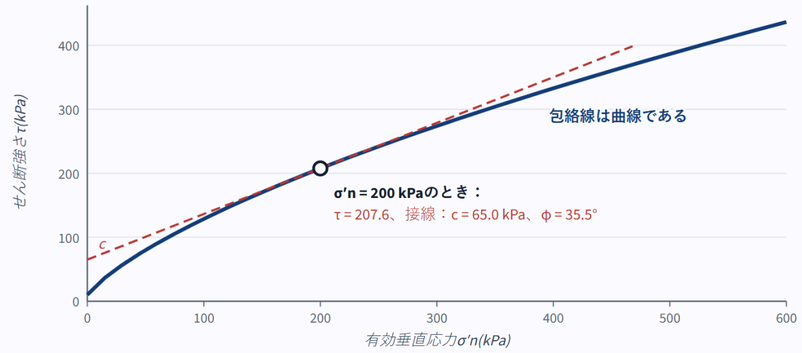
一般化Hoek–Brown規準では岩盤は σ_{ci}、GSI、m_iおよびDで定義される；乱されていない岩盤ではD=0、激しい発破やゆるみがある場合はD=1とする。

分割片底面のせん断強さは垂直応力に依存するため、曲線状の包絡線はBalmerの関係式により $\tau - \sigma'_n$ 平面上に変換される；接線は底面におけるc_iとϕ_iの値を与える。

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

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

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



問題

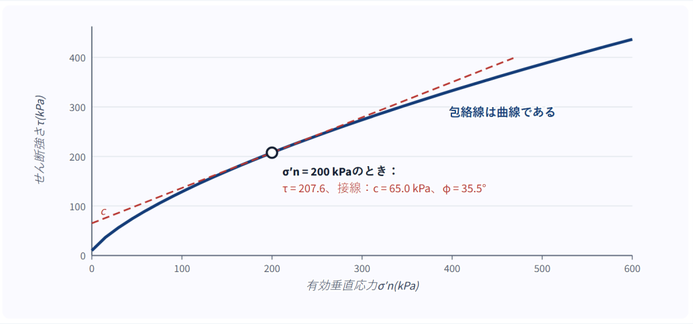
例題

与条件

岩盤	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30, m_i = 8, D = 0$
底面	**有効法線応力** $\sigma'_n = 200$ **kPa**

求めるもの

m_b, s, a。この応力における τ、ϕ_iおよびc_i。



解答 (1/2)

解答

1 岩盤定数

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

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

2 σ'_n = 200 kPaに対して σ'_3 = 93.05 kPa（反復計算により求める）

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

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

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

解答 (2/2)

解答

3 せん断強さと等価Mohr–Coulombパラメータ

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

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

この底面では岩はMohr–Coulombのように**c_i = 65.0 kPa、ϕ_i = 35.5°**で挙動する（τ = 207.6 kPa）。応力が変化すればこれらの値も変化する：各分割片はそれぞれ自身のcとϕを用いる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

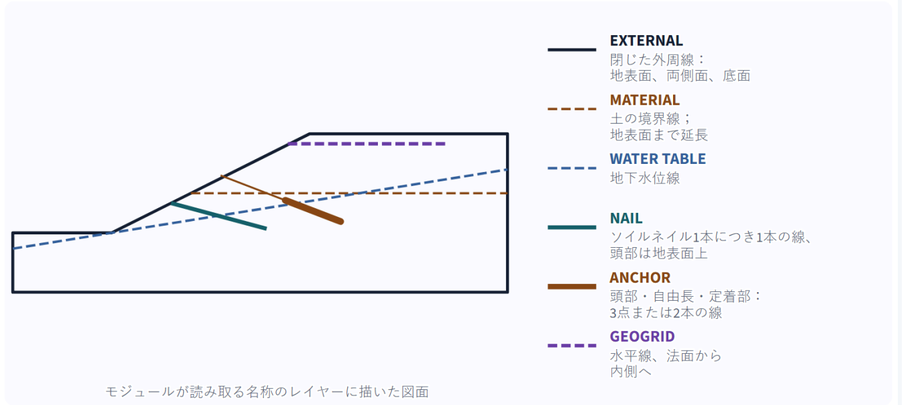
層名による読み取り

理論

DXF断面のレイヤ名は、大文字・小文字、空白、ハイフン、アンダースコアの違いを区別せずに読み込む。**EXTERNAL**は地表面、両側面および底面を1本の閉じたポリラインとして与える。

MATERIALは地盤間の線である。断面内で終わる線は地盤表面に沿って延長し、2つの境界の間の各領域に別々の地盤を割り当てる。

WATER TABLEは地下水位線である。**NAIL**、**ANCHOR**および**GEOGRID**は補強材であり、図に示されていない単位体積重量、強度、耐力、荷重および地震はモデルタブで入力する。

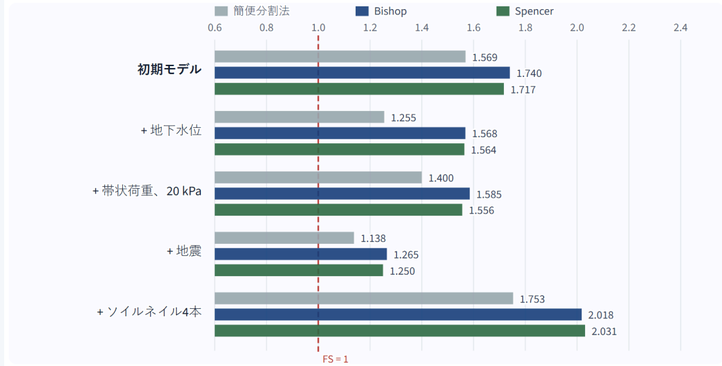


モジュールが読み取る名称のレイヤーに描いた図面

結果一覧表

同一断面、5つのモデル、3つの手法

モデル（何かを追加し、円弧を再探索する）	中心 (x_c; z_c)	r (m)	分割片	簡便法	Bishop	Spencer
開いた時点のモデル（静的）	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ 斜面内部へ向かって上昇する地下水位	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ 20 kPaの帯状荷重、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（危険）	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ 4本の地盤ソイルネイル、長さ14 m	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



簡便法は常に最も小さい；BishopとSpencerは互いに近い（円弧すべりでは数%の差）。

水と地震がFSを最も低下させる（それぞれ1.255と1.138、簡便法）；4本の土ソイルネイルはFSを1.753に高める。土ソイルネイルがある場合、BishopとSpencerは2.0を超える。

仮定

モデルが仮定することと仮定しないこと

モデルは平面ひずみを仮定する：無限に長い斜面の1 m、各方向で同じ強度（等方性岩の規準を除く）、および運動が始まるまで剛な地盤を仮定する。

水については、ある線より下で静水圧または上載荷重のr_u比を用いる。浸透流解析は行わず、急降下では$\bar{B} = 1$として瞬間的な水位低下を仮定する。

分割片についてはすべての量を分割片の中央鉛直線上でとり、負の有効垂直力は零に保つ；地震は震度法の係数で扱い、地表面に集積する水の慣性は無視する。

Spencer法は分割片間力を土塊全体について単一の角度で互いに平行と仮定する。モーメントのつり合いは3手法すべてで満たされるが、力のつり合いはSpencer法のみで満たされる。

探索は初期すべり面の近傍で最小の安全率をもつ面を見つける。それがすべての面の中で最小であることは証明されていない。

対象外の事項

三次元的影響（すべりの端部、斜面の幅）

変形、進行性破壊、ひずみ軟化

浸透と圧密：間隙水圧は与条件であり、計算しない

動的解析（Newmark）：震度法計算は照査である

規定：FSは与えられ、十分な値は技術者と仕様書が定める。

まとめ

ポイントのまとめ

FS = ΣR/ΣD；R = cL + N′ tan ϕ'、D = W sin α（円弧中心に関するモーメント）。3つの方法は**N′**の求め方のみが異なる

分割片 22（例）：α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → 簡便法 N′ = 77.79, R = 42.55, D = 42.25；Bishop N′ = 86.56, R = 45.40；Spencer N′ = 80.76, R = 43.51 kN/m

同一円弧：**1.569（簡便法）・1.740（Bishop）・1.717（Spencer）**。臨界円弧は 15 × 15 × 12 のグリッドで 4650 個の円弧を試行して求めた

水：u = $\gamma_w h_w$によりN′が減少する；**地震**：F_hは法線力を減少させ、モーメントを付加する；**亀裂中の水**はP_wのモーメントをΣD′に付加する

補強材：受動的（ソイルネイル、ジオグリッド）は抵抗側に、能動的（アンカー）はすべり側から差し引く。
Hoek–Brown：各底面で接線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.

注記

数値例はすべてモジュール自身の計算ライブラリで作成されている；モジュールは同じ値を与える。モジュールページの計算例モデルもこの断面である（高さ10 mの2:1斜面、盛土上の粘土）。

GeoTerva

オンライン地盤工学計算

理論から実務へ

独自の断面を描くかDXFから読み込み、地盤、水、荷重、地震および補強材を入力する。モジュールは臨界円を探索し、3手法の安全率、分割片の表、手順ごとの解答およびレポートを出力する。

モジュールを開く →

理論ページ →

スマートフォンで開く

お試しモジュールは登録不要です。

講義で使用したい場合：info@geoterva.com