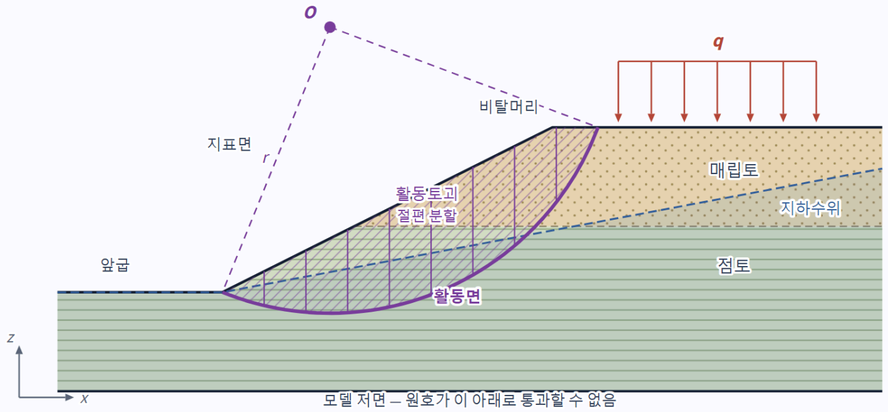
지반공학 강의 자료 · 사면안정

사면안정: 한계평형 (절편)

강의: 한계평형 절편법; 하나의 활동원호와 하나의 절편에 대한 상세한 손계산 풀이, 나머지 절편과 주제는 표로 제시.

절편법 | 보통법 · Bishop · Spencer | 위험 활동원호 | 물 · 하중 · 지진 · 균열 | 보강재 · Hoek–Brown



개요

이 강의에서 다루는 내용

한계평형의 개념: 활동면 위의 토체는 강도가 같은 비율로 발휘되는 강체이며, **FS = 강도 / 요구 응력**

활동 토체를 **절편**으로 분할하기: 각 절편의 중량 W, 저면 경사 α, 저면 길이 L, 수압력 U

세 가지 방법(보통법/Fellenius, 간편 Bishop, Spencer)을 하나의 활동원호와 **하나의 절편**에 대해 상세히 풀이하는 것

같은 계산이 **나머지 32개 절편**에서 어떻게 반복되는지와 결과표; 위험 활동원호의 탐색

물, 하중, 지진, 인장균열, 보강재(네일, 앵커, 지오그리드), 암반(Hoek–Brown)의 영향

강의 흐름

먼저 **이론**, 이어서 원 하나와 절편 하나로 하는 **손계산 풀이**:

1 · **이론**: FS, 절편, 세 가지 방법

2 · **문제**: 하나의 원, 하나의 절편

3 · **풀이**: 절편 22는 수계산, 나머지는 **표**로

모델: 높이 10 m의 2:1 사면; 위쪽은 성토(γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°), 아래쪽은 점토(γ = 17.5, c′ = 20, φ′ = 18°); 물, 하중, 지진은 없다. 힘은 단면 1 m당(kN/m)이다.

배수 조건, 비배수 조건, 깊이에 따라 증가

이론

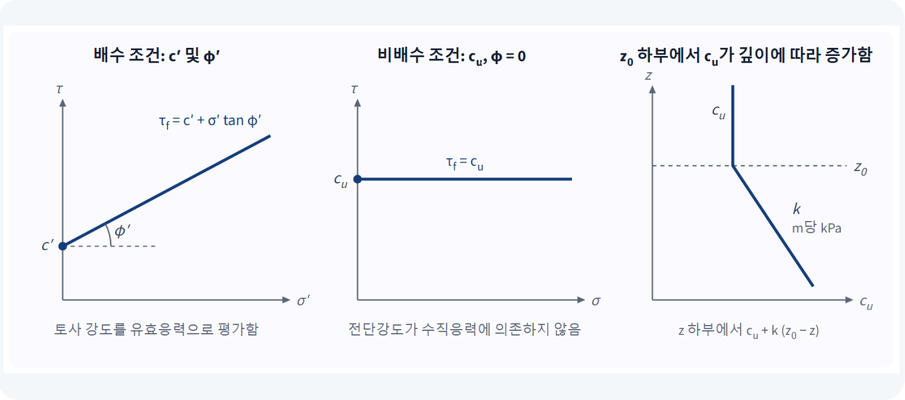
배수 지반의 전단강도는 유효응력 σ′ = σ − u로 표현한 Mohr–Coulomb 파괴포락선으로 주어지며, 매개변수 c′와 φ′로 정의된다.

배수가 일어날 수 있는 속도보다 빠르게 재하되는 포화 점토에서 강도는 수직응력과 무관한 **비배수 강도** c_u이며 φ = 0으로 취한다. 많은 자연 점토에서 c_u는 깊이에 따라 선형으로 증가한다.

절편의 강도는 저면 중점의 높이에서 읽는다. 암반에 고유한 기준은 따로 있으며, 배수 또는 비배수의 선택은 기술자의 몫으로서 해석의 첫 번째 가정이 된다.

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

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



강도 / 필요 응력; 원 중심에 대한 모멘트

이론

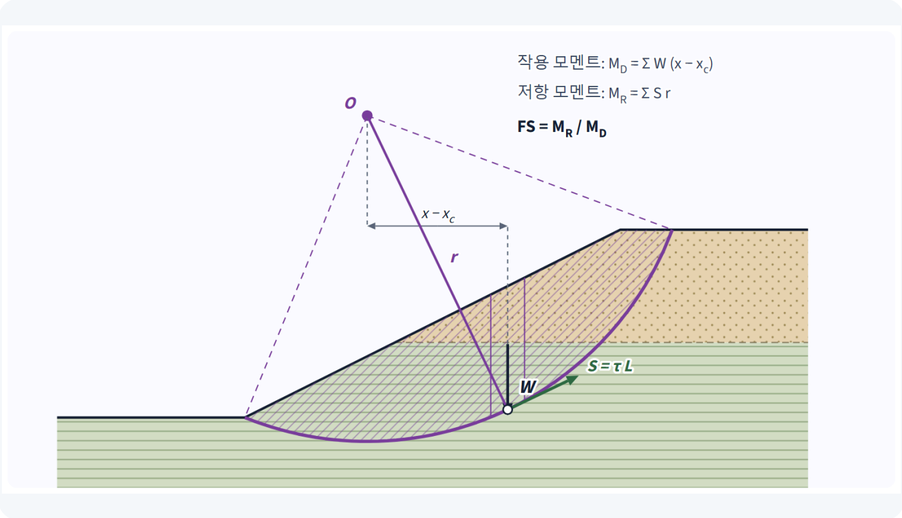
안전율(FS)은 지반이 보유한 전단강도와 평형에 필요한 전단응력의 비이며, 활동면을 따라 모든 점에서 같은 값으로 가정한다.

원호 활동면에서 지배적인 평형은 중심 O에 대한 모멘트 평형이다. 모멘트를 반지름으로 나누어 비를 FS = ΣR / ΣD로 쓰며, 두 합계 모두 kN/m 단위이다.

세 가지 방법은 각 저면에 작용하는 유효 수직력(N′)을 구하는 방식에서 차이가 난다. 단순 절편법은 중량만으로, Bishop 방법은 연직 평형으로, Spencer 방법은 힘과 모멘트 평형을 모두 이용하여 구한다.

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

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



형상, 중량, 저면 작용력

이론

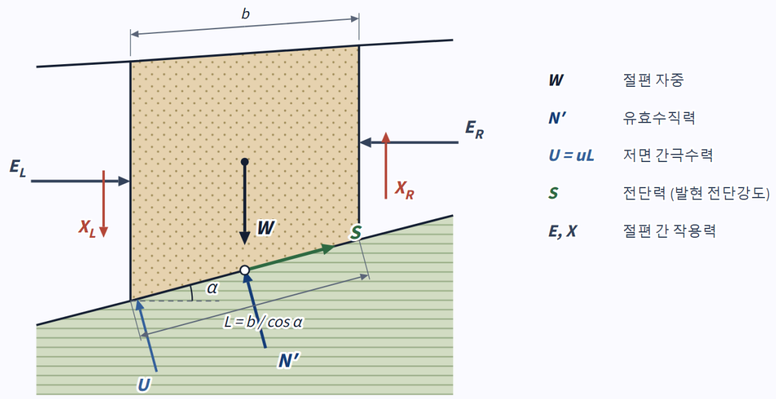
활동면과 지표면 사이의 토체는 절편의 수 또는 최대 절편 폭에 따라 연직선으로 절편들로 분할된다.

토체 내의 모든 주요 교차점은 반드시 절편 경계가 된다. 따라서 각 저면은 하나의 지층 안을 지나고 각 절편은 한 종류의 하중만 받는다.

절편 중앙 수직선에서의 저면 경사 α는 원호 중심을 기준으로 사면 상단 쪽에서 양(+), 사면 하단 쪽에서 음(–)으로 취한다.

유효 수직력 N′ = N – U; N′ 값이 음수이면 저면이 인장 상태임을 나타내며, 단순 절편법과 Bishop 방법에서는 N′ 값을 0으로 유지한다.

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



절편 간 힘 없음

이론

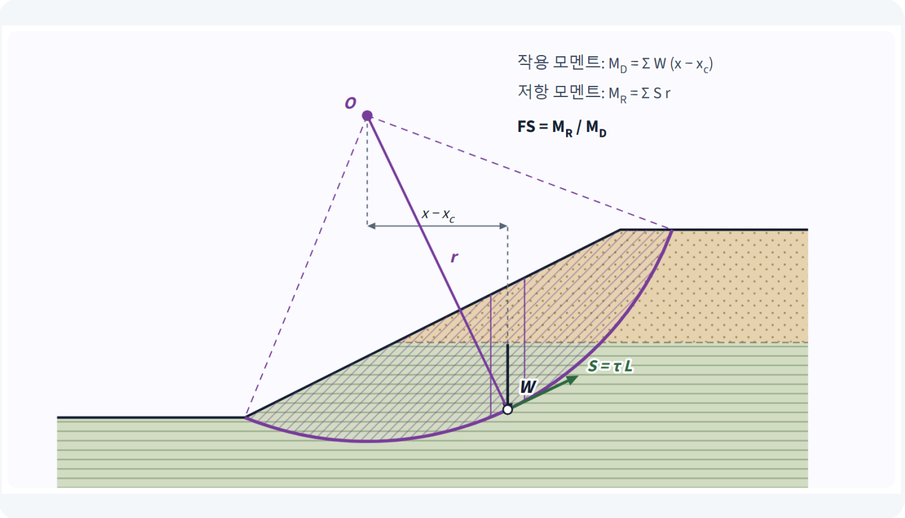
Fellenius(스웨덴) 방법에서는 절편 간 힘을 완전히 무시하며, 각 절편은 저면에 수직인 방향으로만 평형을 이룬다.

이 평형식은 수직력을 자중과 하중으로부터 제공하며, 안전율은 모멘트 비로 구하고 균질한 지반에서는 FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α 관계식으로 정리된다.

이 방법은 단순하고 안정적이며 안전 측이다. 오차는 원호의 깊이와 간극수압에 따라 증가하며, 깊은 원호에서는 다른 두 방법보다 상당히 낮은 결과를 줄 수 있다.

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

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



각 절편의 수직 평형; 반복 해법

이론

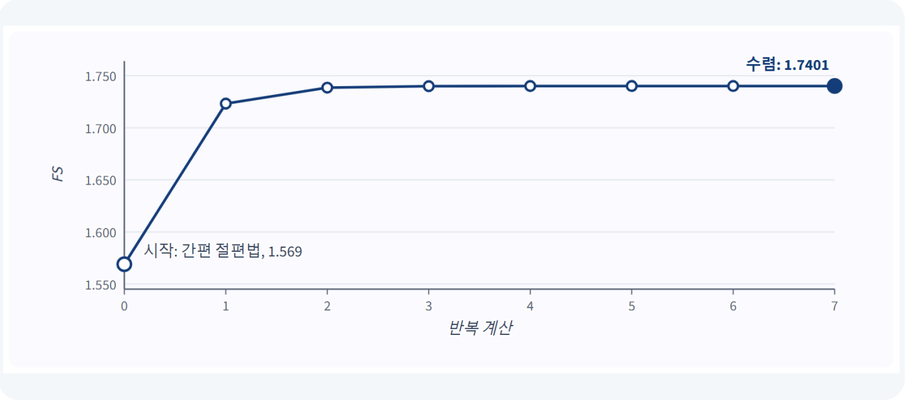
간편 Bishop법에서는 절편 간 전단력을 무시하지만 각 절편의 연직 평형은 만족시키며, 저면의 전단력은 발휘된 강도와 같다고 취한다.

FS가 방정식의 양변에 모두 나타나므로, 이 방정식은 단순 절편법의 값에서 출발하여 반복 계산으로 푼다. 몇 단계면 충분하다.

음의 **N′**은 0으로 유지하고 $\mathbf{m_\alpha}$가 0.2 아래로 떨어지는 것은 허용하지 않는다; 이 제한은 깊은 원호의 사면 하단 구간에서 중요하다.

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

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



힘 및 모멘트 평형; 평행한 절편간 힘

이론

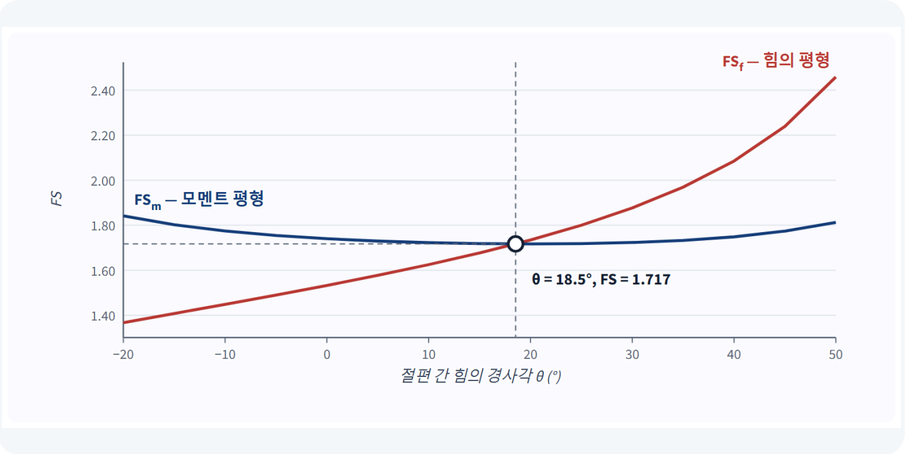
Spencer 방법은 힘의 평형과 모멘트 평형을 모두 만족한다; 절편 간 힘은 서로 평행하며 전단력은 수직력의 일정한 비율이다.

활동 토체 양 끝의 측면이 자유이므로 ΣΔE = 0이 힘의 평형을 주며, 각 θ에 대해 안전율 FS_f가 얻어진다.

원 중심에 대한 모멘트는 두 번째 값을 제공한다: FS_m = Σ[c L + N′ tan φ] / Σ D; $FS_f(\theta)$와 $FS_m(\theta)$는 단일 각도에서 교차하며, 이것이 해가 된다.

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

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



충족하는 것과 무시하는 것

이론

방법	절편 간 힘	힘의 평형	모멘트 평형	표면	FS (동일 원호)
보통법 (Fellenius)	없음	저면 수직력만	✓	원	**1.569**
단순 Bishop	법선 성분만 (전단 없음)	절편당 수직	✓	원	**1.740**
Spencer	평행: X = E tanθ	수평 + 연직	✓	각 면	**1.717**

단순 절편법은 손계산으로 검토할 수 있고 보수적인 기본 방법이며, 그 결과는 세 방법 중 가장 낮다.

Bishop 방법은 원호 활동면에 대한 통상적인 선택이며, 그 결과는 원호 활동면에서 Spencer 방법의 결과와 몇 퍼센트밖에 차이가 나지 않는다.

Spencer 방법은 모든 평형 조건을 만족하며 원형이 아닌 활동면에 사용된다; 계산 부담이 가장 큰 방법이며 일부 활동원호에서는 해가 존재하지 않는다.

문제

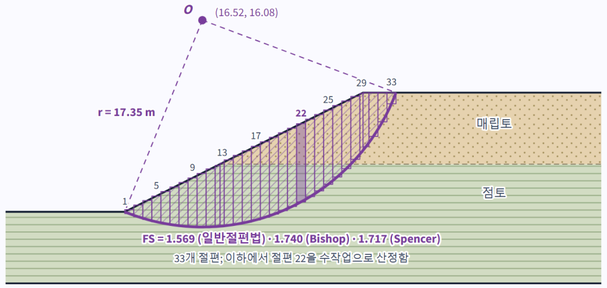
예제

조건

단면	**지표면 $(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ m; 저면 $z=-6$ m; $z=4$ m보다 위는 매립토, 아래는 점토**
지반	**매립토 $\gamma=18$ kN/m³, $c'=5$ kPa, $\varphi'=30°$; 점토 $\gamma=17.5$ kN/m³, $c'=20$ kPa, $\varphi'=18°$; 물, 하중, 지진 없음**
활동원호	**중심 $x_c=16.52$ m, $z_c=16.08$ m; 반지름 $r=17.35$ m (위험 활동원호, 탐색에서 구한 값 참조)**

구하는 값

원이 지반과 교차하는 x_a점과 x_b점, 최저점 및 **절편 분할**.



풀이

풀이

1 원과 지표면의 교점: $(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

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

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

2 최저점과 절편 분할

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

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

원호는 x = 10.00(사면 선단)과 32.77 m(상단) 사이에서 활동 토체를 가로지르며, x = 10, 18 및 30 m의 경계가 3개의 절편을 추가로 나눈다: **33개 절편**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

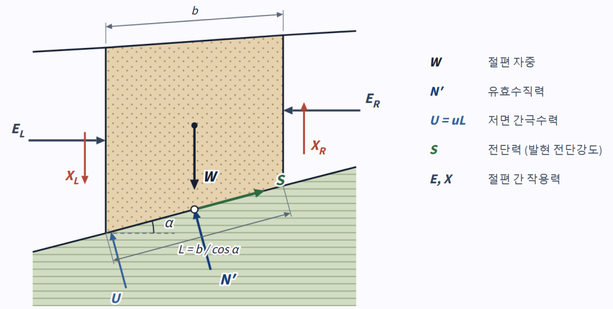
예제

조건

절편	**예제 1에 있는 원의 22번째 절편: 중점 $x_m = 24.800$ m, 폭 $b = 0.759$ m**
지반	**매립토 $\gamma = 18$ kN/m³ ($z > 4$ m); 점토 $\gamma = 17.5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18°$ (저면은 점토에 위치); $u = 0$**

구하는 값

절편의 **α**, **L**, **W** 값; **N′**, **R** 및 **D** (보통법).



풀이 (1/2)

풀이

1 저면 경사와 길이

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

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

2 기둥 높이와 중량 (매립토 + 점토)

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

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

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

절편 22는 **가장 무거운 절편**이다(W = 88.52 kN/m); 저면은 28.5° 기울어져 있으며 점토에 놓인다(c′ = 20 kPa, φ′ = 18°).

풀이 (2/2)

풀이

3 수직력과 저항력 (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 활동 유발 작용

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

절편 22: **R = 42.55** kN/m, **D = 42.25** kN/m. 각 절편의 R과 D 값은 **동일한 세 단계**로 구하며, 안전율은 각 합계의 비이다: **FS = ΣR/ΣD** (표는 이후 페이지에 수록).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

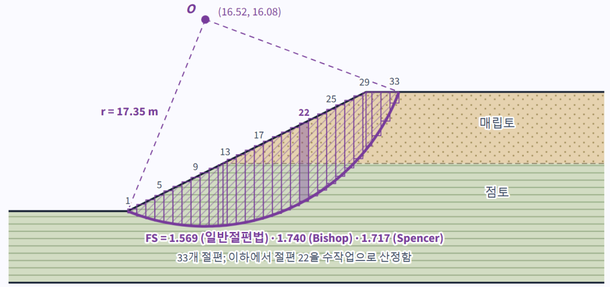
예제

조건

절편	**예제 1의 원, 33개 절편; 각 절편은 예제 2의 세 단계로 풀이한다**
방법	**보통법 (Fellenius): 절편 간 힘 없음**

구하는 값

전 절편의 표: **W, N′, R, D** 및 합계; **FS = ΣR / ΣD**.



풀이 (1/3)

풀이

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

풀이 (2/3)

풀이

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**

풀이 (3/3)

풀이

1 합계와 안전율

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

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

이 활동원호에 대해 일반 절편법으로 **FS = 1.569**이다. 사면 선단 쪽 절편(α < 0)에서는 절편 저면이 활동 방향과 반대로 기울어 있다. D는 음수이며 ΣD를 감소시킨다. 절편 22는 표의 22번째 행이며 손계산 값과 일치한다.

ΣR/ΣD: **저항**과 작용의 비; FS > 1이면 이 원호를 따른 활동은 예상되지 않는다.

보통 절편법이 가장 낮은 값을 주며, Bishop과 Spencer는 같은 원호에서 더 높다(다음 예제).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

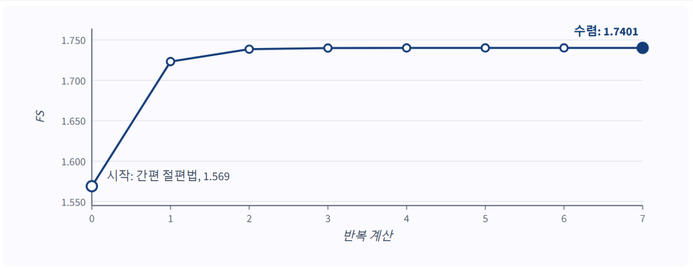
예제

조건

절편과 원호	**예제 2의 22번째 절편과 예제 1의 원; 초기값은 예제 3의 $FS_0 = 1.569$**
방법	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

구하는 값

절편 22에 대한 **m_α**, **N′**, **R**; 원 전체에 대한 **반복계산**과 **FS**.



풀이 (1/4)

풀이

1 첫 번째 반복 (FS_0 = 보통 절편법의 값 = 1.5690)

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

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

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

풀이 (2/4)

풀이

2 수렴값 적용 (FS = 1.7401)

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

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

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

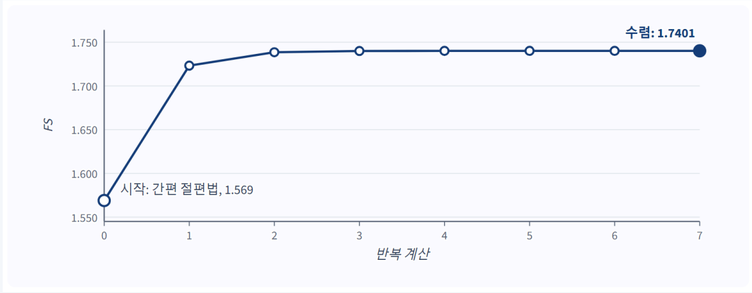
절편 22의 수직력은 보통 절편법의 77.79에서 **86.56** kN/m로 증가한다(절편 간 연직 평형); 저항력은 42.55 → **45.40** kN/m. 같은 단계가 33개 절편에서 반복된다.

풀이 (3/4)

풀이

2 매 반복마다 ΣR을 다시 계산하며, $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

반복 k	FS_k	차이
0 (일반)	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



7회 반복에서 **FS = 1.740**; ΣR = 1,115.97, ΣD = 641.34 kN/m. 보통 절편법(1.569)보다 10.9% 높다.

풀이 (4/4)

풀이

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**

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

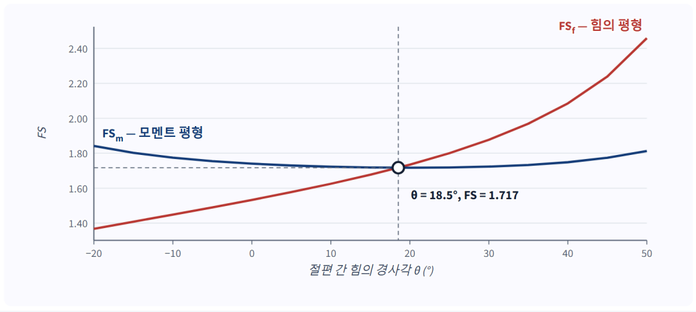
예제

조건

절편과 원호	**예제 2의 22번째 절편, 예제 1의 원; 절편 간 힘은 평행, $X = E\tan\theta$**
해의 각도	$\theta = 18.54^\circ$ **(아래 두 곡선이 교차하는 각도),** $FS = 1.717$

구하는 값

절편 22에 대한 **ΔE**, **N′**, **R**, **E** 및 **X**; θ–FS 곡선과 원호 전체.



풀이 (1/4)

풀이

1 절편의 법선력 차이 ΔE (θ = 18.54°, tan θ = 0.3354, FS = 1.717)

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

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

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

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

풀이 (2/4)

풀이

2 수직력, 저항력 및 절편 간 힘

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

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

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

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

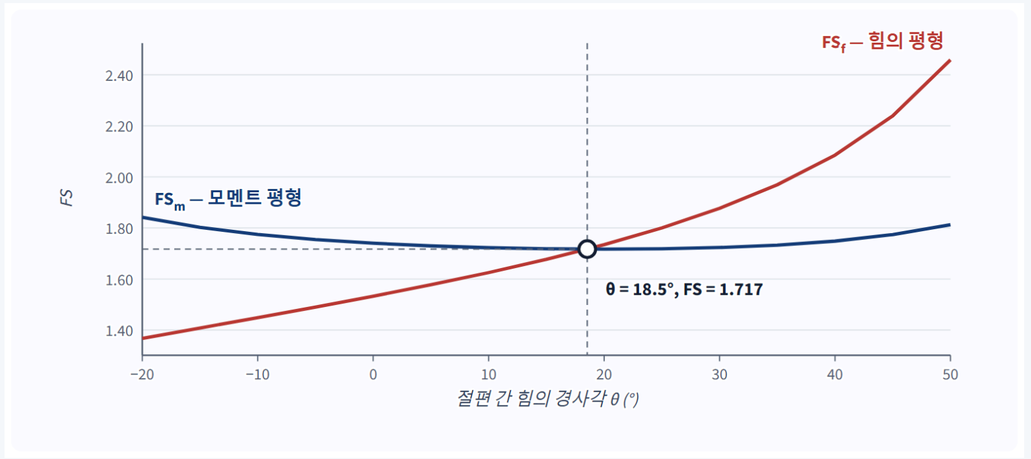
Spencer 방법에서 절편 22의 수직력은 **80.76** kN/m이다(단순 절편법 77.79, Bishop 86.56). 절편 간 힘으로 사면 선단 쪽에 E = 254.69 kN/m가 작용한다.

풀이 (3/4)

풀이

3 각 θ에 대한 FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) 및 FS_m (모멘트); 교점이 해이다

θ (°)	FS_m (모멘트)	FS_f (힘)
-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**



풀이 (4/4)

풀이

No	ΔE	E (하단)	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.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

중량, 간극수압, 사면 내 물

이론

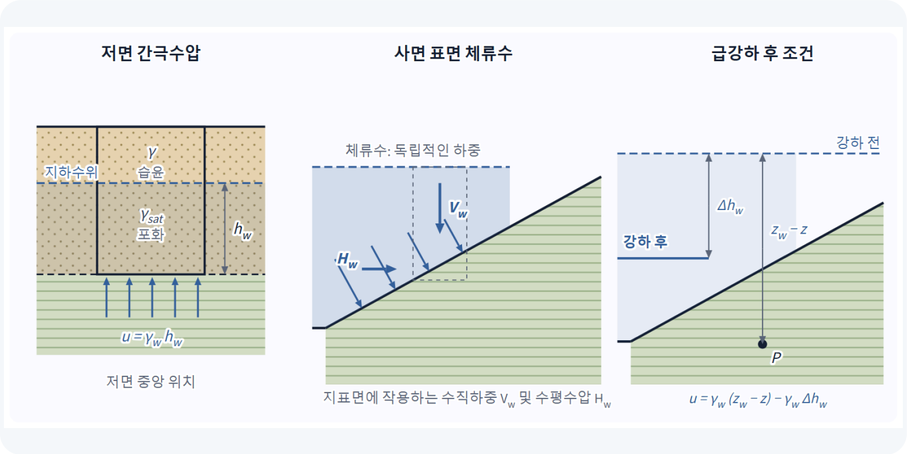
물은 해석에 세 가지 방식으로 포함된다: 포화 지반의 중량, 각 절편 저면에서 강도를 감소시키는 간극수압, 그리고 사면 위에 물이 있을 때 그 위치에 작용하는 독립된 하중.

지하수면 아래의 간극수압은 정수압으로 한다. 침투를 해석하지 않으므로 경사진 지하수위는 유선망에 대한 근사이며, 수중단위중량은 어떤 경우에도 사용하지 않는다.

간극수압이 상재압의 비율로 알려져 있을 때 지반에 r_u 값이 부여된다. 이는 시공 단계의 성토나 연약 점토 위의 성토에 해당한다.

사면 앞의 수위가 배수로 인해 급강하하면 물에 의한 지지가 사라지고, 간극수압은 그대로 유지되어 안전율은 수위 강하 직후의 최저값에 해당한다.

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



문제

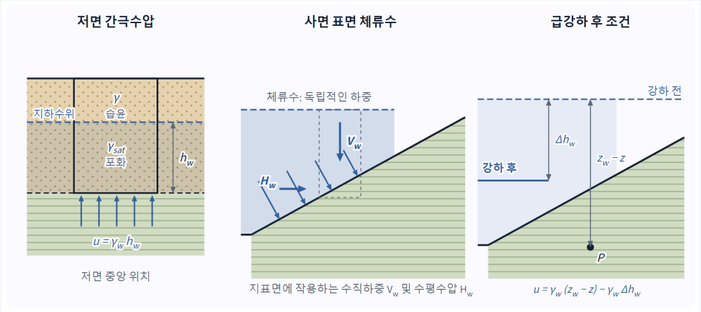
예제

조건

수위선	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ m, 정수압; $\gamma_w = 9.81$ kN/m³; 포화단위중량은 매립토 20, 점토 19.5 kN/m³
절편	같은 원호; $x_m = 24.800$ m 위치의 절편 (물이 있으면 33번째가 아니라 24번째 절편이 된다)

구하는 값

절편에서 z_w, h_w, u, U; 새로운 W, N', R, D; 원 전체의 **FS**.



풀이 (1/2)

풀이

1 물의 높이와 간극수압

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

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

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

2 중량: 수면 위는 습윤, 수면 아래는 포화

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

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

물은 중량을 건조 상태의 88.52 kN/m에서 **92.14** kN/m로 증가시킬 뿐 아니라 저면에 **U = 20.23** kN/m의 수압력도 발생시킨다.

풀이 (2/2)

풀이

3 유효수직력, 저항력, 활동 유발 작용 (절편 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 전체 원호 (36개 절편, 동일한 원호) 및 건조 조건과의 비교

방법	ΣU	ΣR	ΣD	FS (물)	FS (건조)
일반	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

동일한 원호에서 물은 FS를 1.569 → **1.343**(보통법)으로 낮추며, 수위선을 고려하여 위험 활동원호를 다시 탐색하면 더 얕아지고 **1.255 / 1.568 / 1.564**가 된다(보통법 / Bishop / Spencer).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

띠하중과 집중하중; 연직, 수직, 경사

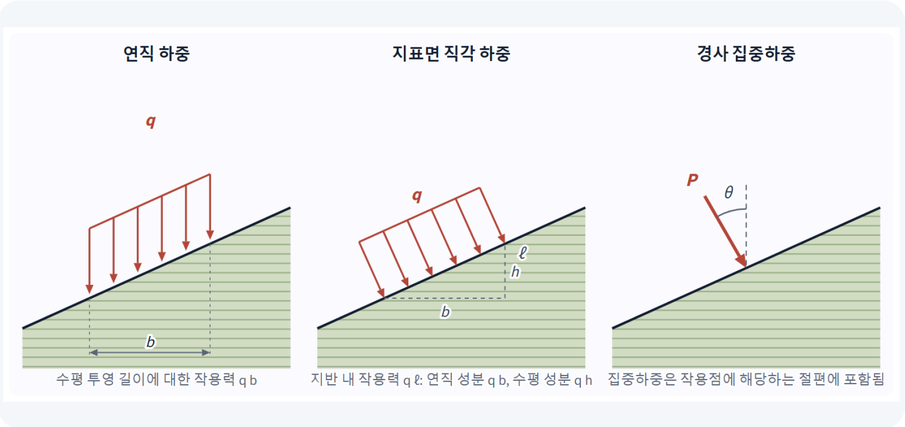
이론

연직 또는 경사로 작용하는 띠하중은 수평 투영면을 기준으로 취하며, 수평 폭이 b인 부분에 작용하는 힘은 q b이다.

표면에 수직으로 작용하는 하중은 표면 길이에 대해 취하며, 길이 ℓ인 구간에 작용하는 힘은 q ℓ이고 그 연직 성분은 q b, 수평 성분은 q h이다.

각 절편은 하중 중 자신의 양 가장자리 사이에 놓이는 부분을 수평 폭에 따라 배분하여 부담하며, 집중하중은 그 작용점을 포함하는 절편에 속한다.

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



수평 투영 길이에 대한 작용력 q b　지반 내 작용력 q ℓ: 연직 성분 q b, 수평 성분 q h　집중하중은 작용점에 해당하는 절편에 포함됨

절편의 도심에 작용하는 관성력

이론

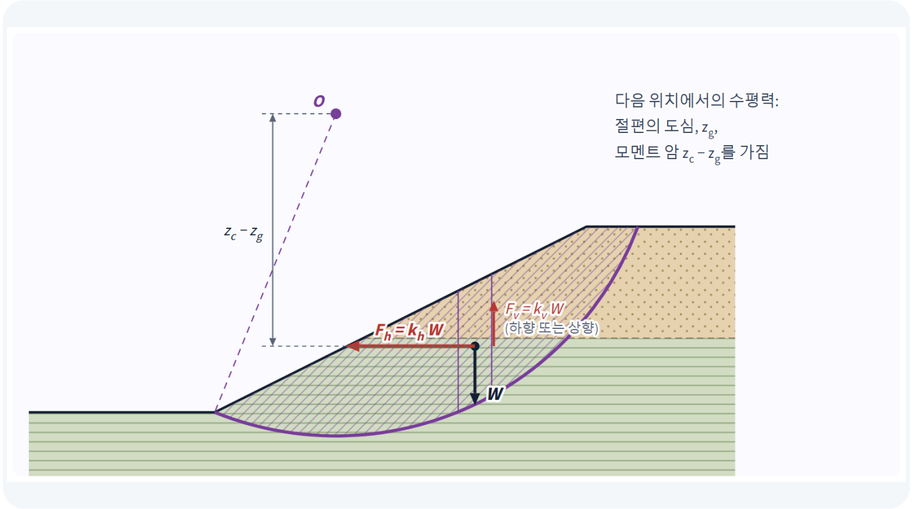
의사정적 방법에서는 지진 진동을 활동 토체에 가해지며 g의 비율로 표현되는 일정한 가속도로 나타낸다.

각 절편에서 지반 질량(W_{soil})의 관성력은, 절편 위에 쌓인 물은 이 힘을 부담하지 않으므로, 절편 내 지반의 습윤 부분과 포화 부분으로부터 구한 무게중심(z_g)에 작용시킨다.

임계 경우 옵션에서는 수평 양방향과 연직 양방향을 모두 시도하여 가장 낮은 안전율을 채택한다. 계수는 사용자가 입력하며, 정적 안전율과 **의사정적** 안전율을 함께 보고한다.

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

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



문제

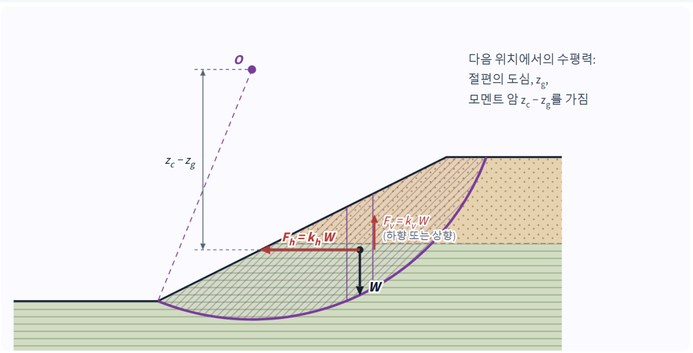
예제

조건

지진	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **수평력은 사면 하단 방향 (위험 방향)**
절편과 원호	**예제 2의 절편 22와 원; 도심은 모멘트 팔 z_g 산정에 필요하다**

구하는 값

절편 22의 **F_h, N′, R, D**; 원호 전체에 대해 세 가지 방법에 의한 **$FS_{earthquake}$**.



풀이 (1/2)

풀이

1 관성력과 모멘트 팔

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

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

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

2 수직력, 저항력, 활동 유발 작용

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

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

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

활동을 일으키는 작용력은 42.25 → **51.39** kN/m(+22%)로 증가하고, 저항력은 42.55 → **40.49** kN/m로 감소한다: 수평력은 수직력을 줄이고 활동 모멘트를 추가한다.

풀이 (2/2)

풀이

3 같은 원호에서의 세 가지 방법 (k_h = 0.15, k_v = 0)

방법	ΣR	ΣD	FS (정적)	FS (지진)
일반	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 = 0.15에서 FS는 약 27% 감소한다(일반 조건 1.569 → **1.152**). 지진 작용 시에는 위험 활동원호도 달라진다: 이 페이지의 모델(k_h = 0.15, k_v = 0.05, 임계 방향)에서 탐색 결과는 1.138 / 1.265 / 1.250이 된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

균열 및 심부의 물

이론

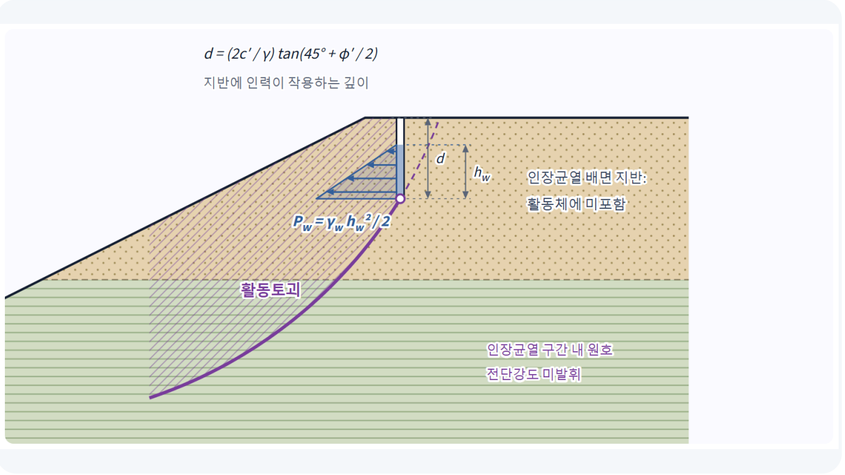
인장균열 깊이는 d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2)로 구하며, 비배수 조건에서는 이 깊이가 $2c_u/\gamma$가 된다.

인장균열이 작용하는 경우 활동면은 활동하는 토체의 깊이가 균열 깊이와 같아지는 점에서 끝난다. 균열 뒤쪽의 지반은 활동 토체에 포함되지 않으며, 원호 중 균열 내부에 있는 부분은 저항을 부담하지 않는다.

인장균열 속에 h_w 높이까지 차 있는 물은 정수압에 의한 힘으로 작용한다. 물이 찬 인장균열은 안전율을 낮추며, 이 조건은 더 자주 간과된다.

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

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



문제

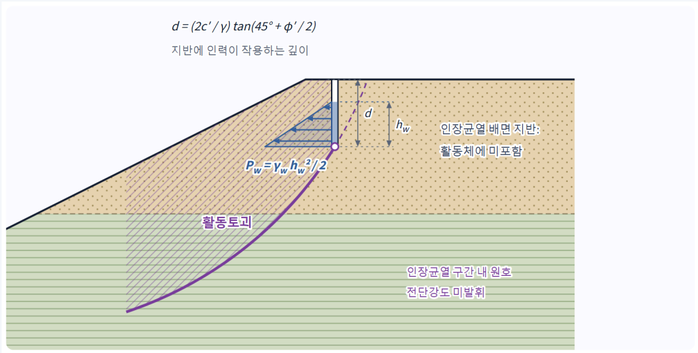
예제

조건

균열	상단에 깊이 $d = 2$ m의 연직 균열(모델의 초기값); 건조 상태와 물이 찬 상태($h_w = 2$ m)의 두 경우
원	예제 1의 원호; 균열 하단에서 끝난다

구하는 값

균열의 **x** 위치; P_w, z_f, D_{crack}; 세 가지 방법에 의한 **FS**.



풀이 (1/2)

풀이

1 균열의 위치: 균열은 원호가 표고 z = 10 − 2 = 8 m에 이르는 지점에서 끝난다

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

2 균열 내 물 (h_w = 2 m): 힘과 모멘트

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

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

Rankine 깊이는 매립토에서 0.96 m, 점토에서 3.15 m이다. 모듈은 인장균열 깊이를 엔지니어가 입력한 값(여기서는 2 m)으로 사용한다. 물이 찬 균열은 ΣD에 **8.38** kN/m를 더한다.

풀이 (2/2)

풀이

3 균열 없음, 건조 균열, 물이 찬 균열 (동일한 원; 균열에서 34개 절편)

방법	균열 없는 FS	ΣR	ΣD (건조)	FS 건조 균열	ΣD (물)	FS 물이 찬 균열
일반	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**

마른 균열은 FS를 거의 변화시키지 않는다(상부의 활동 토체와 원호상의 저항이 함께 줄어든다: 1.569 → 1.585); **물이 찬 균열**은 FS를 낮춘다(1.564). 균열 속의 물은 가장 자주 간과되는 경우이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

중심 격자, 반경, 격자 세분화

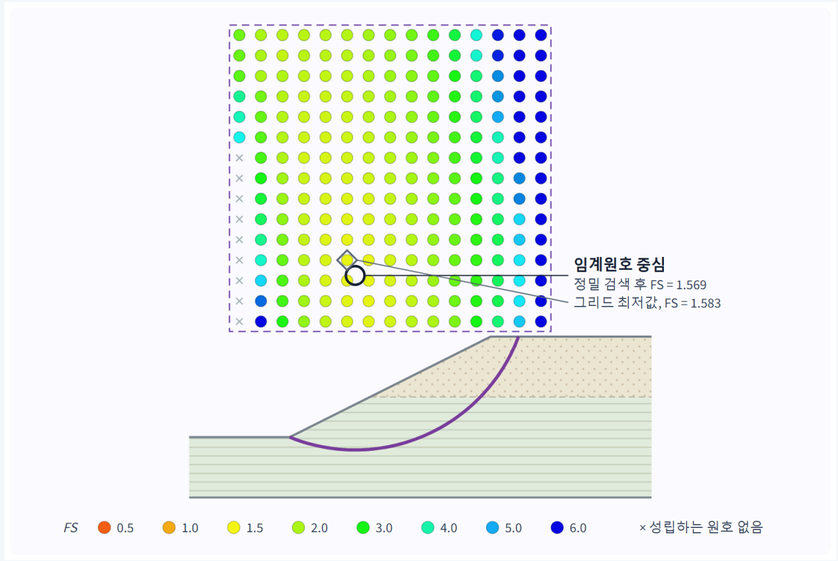
이론

위험 활동원호 탐색은 사면 위에 배치한 $n_x \times n_z$개 점의 중심 격자 위에서 수행하며, 각 중심에서 등간격의 반지름 집합을 시험한다.

각 원호를 절편으로 나누어 해석하며, 각 중심에 대해 구한 최소 안전율을 해당 반지름과 함께 저장한다. 계산 예제 모델에서는 15 × 15 중심과 12개 반지름으로 4650개의 원호를 검토하였다.

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

풀이 모델	값
격자 ($n_x \times n_z \times$ 반경)	15 × 15 × 12
시도한 원호 / 채택한 원호	4,650 / 3,487
격자 중 최저값	FS = 1.583
세분화 후	**FS = 1.569**
위험 활동원호	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



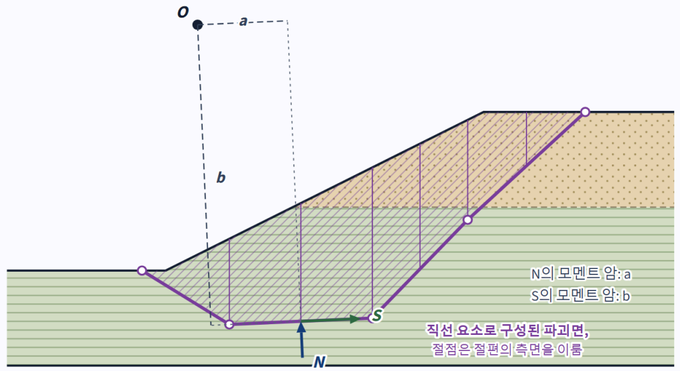
꺾인 선, Spencer만

이론

비원형 활동면은 사면 정상에서 내려가 사면 선단을 향해 올라오는 쐐기들로 이루어져 약한 지층을 따라갈 수 있으며, 양 끝이 지표면에 있는 다각형 형태의 면이다.

다중 직선 활동면에서 모멘트 방정식은 활동 토체의 선단 위에 잡은 점 O에 대하여 작성하며, N의 모멘트 팔은 a, S의 모멘트 팔은 b이다.

안전율이 가장 낮은 면은 n개 구간의 꺾은선 형태로 탐색한다. 탐색 이동은 면이 허용 가능한 상태로 남아 있을 때에만 유지되며, 볼록성 제약은 지그재그 형태의 면으로 치우치는 것을 막는다.



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

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

수동 부재와 능동 부재의 FS 기여도

이론

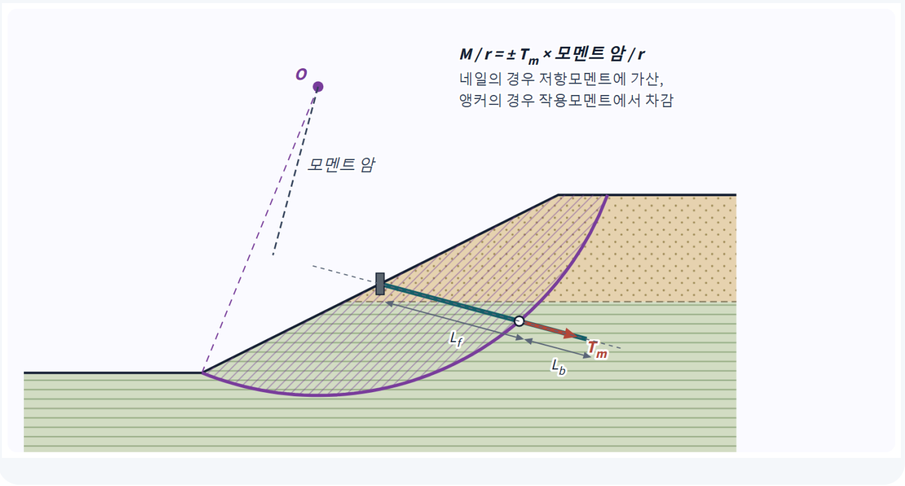
보강재는 활동면을 가로지르는 선이며, 활동원호와 교차하는 점까지의 활동면 앞쪽 길이를 L_f, 그 점 뒤쪽의 정착 길이를 L_b로 표시한다.

수동 요소(소일네일, 지오그리드)의 모멘트는 저항 쪽에 더하고, 능동 요소(앵커)는 움직임 이전에 하중을 부담하므로 그 모멘트를 활동 쪽에서 뺀다.

같은 힘이라면 능동 요소가 수동 요소보다 안전율을 더 많이 높이며, 힘은 정적 조건과 의사정적 조건에서 동일하게 취했다.

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

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



세 값 중 최솟값

이론

소일 네일의 인장력 T는 세 값 중 가장 작은 값이다: $T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$.

소일네일은 수동 부재이다: 토체가 움직임에 따라 비로소 작동하며, 수평 간격 Sh로 나눈 네일력은 $T_m = T/S_h$로 표현한다.

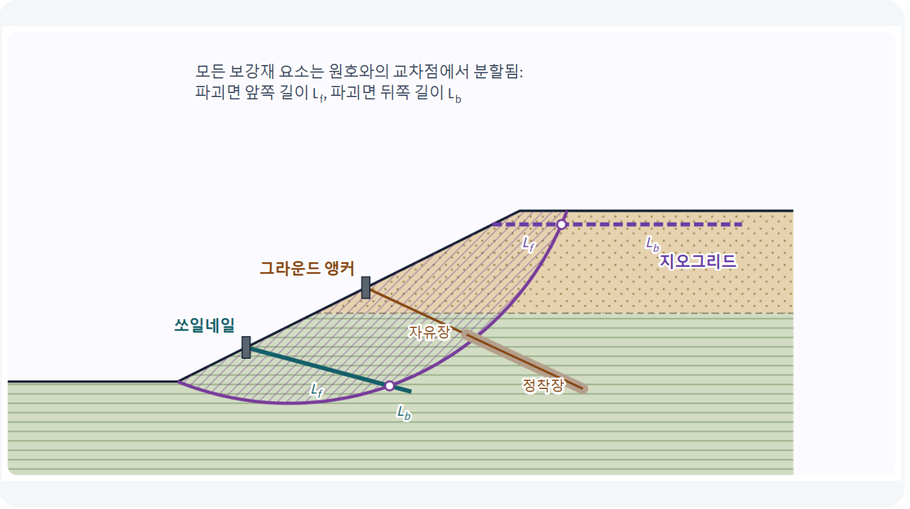
머리가 원 밖에 있거나 끝이 토체 내부에 있는 네일은 그 원에 대해 힘을 전달하지 않는다.

자유장에서는 부착이 형성되지 않으며, 앵커는 정착장이 지지한다. 앵커가 활동원호를 가로지르면서 전달하는 힘은 다음 세 값 중 가장 작은 값이다: **$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**.

앵커는 능동 부재이다: 하중은 토체가 움직이기 전에 이미 긴장재에 존재하며, Spencer 방정식에서 앵커는 주어진 힘이다. 이 힘은 **FS** 값으로 나누지 않는다.

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

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



설계강도, 인발, 연결부

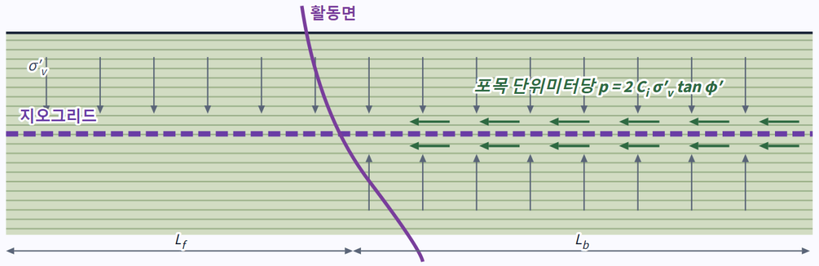
이론

지오그리드는 길이 L, 단면 1 m당 장기 설계강도 T_d, 지반과 지오그리드 사이의 상호작용 계수 C_i, 그리고 전면재에 연결될 때의 연결강도 T_c로 정의된다.

길이 1 m당 인발 저항은 유효상재응력 σ'_v 하에서 양면의 마찰에서 비롯되며, 지오그리드는 수동적 요소로서 시트 평면 방향으로 작용한다.

σ'_v는 판 위 지반의 중량(지하수위 아래에서는 포화단위중량 적용)에서 간극수압을 뺀 값으로 구하며, 지표면 하중은 안전 측으로 고려하지 않았다.

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



문제

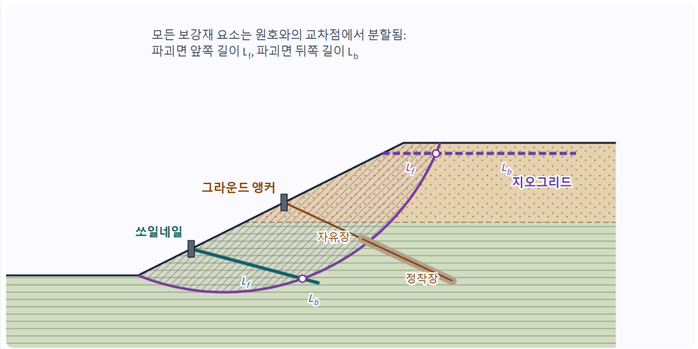
예제

조건

네일	**네일 4개, 머리 위치 $x = 14, 18, 22, 26$ m (지표면), 경사 15°, $L = 14$ m; $T_t = 250$ kN, $q_u = 120$ kPa, $D_h = 120$ mm, $S_h = 1.5$ m**
원	**소일네일 보강 모델에서 탐색으로 찾은 원: 중심 $(18.29;\ 13.90)$, $r = 18.18$ m**

구하는 값

각 네일에 대한 **L_f, L_b, T, T_m**; 모멘트 기여분; **FS**.



풀이 (1/2)

풀이

1 부착강도 (단위 길이당) 및 네일 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 원의 중심에 대한 힘의 모멘트

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

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

네일 N3은 활동 토체를 붙들며 **81.96** kN/m의 하중을 지지하고, 그 모멘트는 ΣR에 30.09 kN/m를 더한다(수동 요소).

풀이 (2/2)

풀이

3 네 개 네일의 힘 (동일한 방법)

네일	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	지배 조건	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	선단이 지반 내부에 위치: 하중 부담 없음	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	후방 인발	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	후방 인발	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	후방 인발	156.12	31.82

4 네일 보강 모델: 탐색에서 찾은 원호의 FS

방법	네일 없음 (초기 굴착)	네일 보강
일반	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

네일은 FS를 약 12% 증가시킨다 (보통법 1.569 → 1.753; Bishop 1.740 → 2.018).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

곡선형 강도 포락선과 각 저면에서의 접선

이론

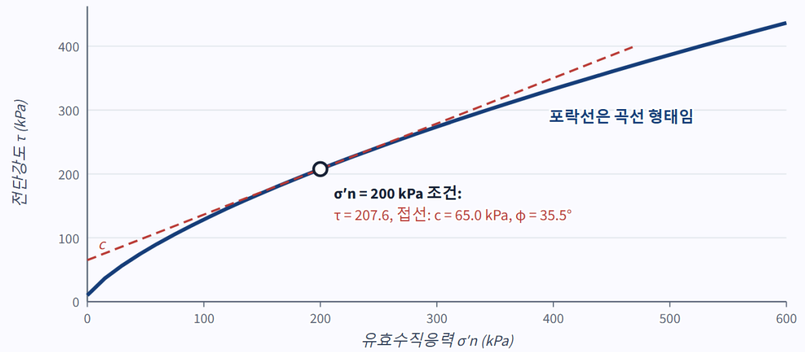
일반화된 Hoek–Brown 기준에서 암반은 σ_{ci}, GSI, m_i, D로 정의한다. 교란되지 않은 암반에는 D=0을, 강한 발파나 이완이 있는 경우에는 D=1을 취한다.

절편 저면의 전단강도는 수직응력에 의존하므로 곡선형 파괴포락선을 Balmer 관계식으로 τ–σ′n 평면으로 변환하며, 접선이 저면에서 ci와 φi의 값을 준다.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

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

$$d = \frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i$$



문제

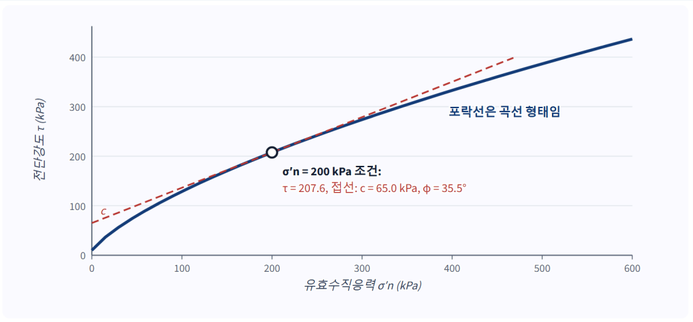
예제

조건

암반	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30$**,** $m_i = 8$**,** $D = 0$
저면	**유효수직응력** $\sigma'_n = 200$ **kPa**

구하는 값

m_b, **s, a**; 이 응력에서의 **τ**, φ_i 및 c_i.



풀이 (1/2)

풀이

1 암반 상수

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

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

2 σ'_n = 200 kPa일 때 σ'_3 = 93.05 kPa (반복계산으로 구한다)

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

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

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

풀이 (2/2)

풀이

3 전단강도와 등가 Mohr–Coulomb 매개변수

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

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

이 저면에서 암반은 Mohr–Coulomb과 같이 **c_i = 65.0 kPa, φ_i = 35.5°**로 거동하며(τ = 207.6 kPa), 응력이 변하면 이 값들도 변한다. 각 절편은 자신의 c와 φ를 사용한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

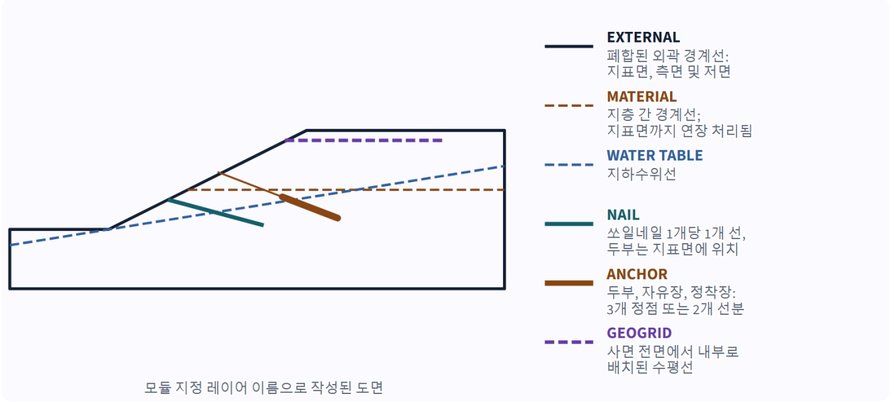
지층 이름에 따른 판독

이론

DXF 단면의 레이어 이름은 대소문자, 공백, 하이픈 및 밑줄의 차이를 구분하지 않고 읽는다. **EXTERNAL**은 지표면, 양 측면 및 저면을 하나의 닫힌 폴리라인으로 제공한다.

MATERIAL 선은 지층 사이를 구분하는 선이다; 단면 내에서 끝나는 선은 지표면을 따라 연장되며 두 경계 사이의 각 영역에 별도의 지반이 지정된다.

WATER TABLE은 지하수위선이고, **NAIL**, **ANCHOR**, **GEOGRID**는 보강재이며, 도면에 나타나지 않는 단위중량, 강도, 용량, 하중, 지진은 모델 탭에서 입력한다.

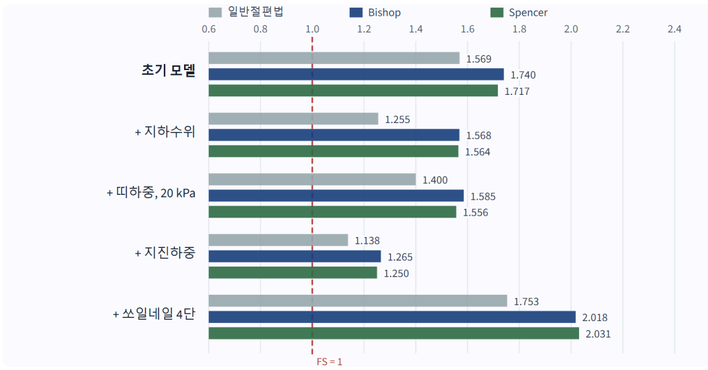


모듈 지정 레이어 이름으로 작성된 도면

결과표

동일 단면, 다섯 가지 모델, 세 가지 방법

모델 (요소 추가 후 원호 재탐색)	중심 (x_c; z_c)	r (m)	절편	일반	Bishop	Spencer
초기 모델 (정적)	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ 사면 안쪽으로 올라가는 지하수위	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ 20 kPa 띠하중, x = 25 – 32 m	16.25; 15.44	16.66	35	**1.400**	**1.585**	**1.556**
+ 지진, kh 0.15, kv 0.05 (위험측)	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ 쏘일네일 네 개, 길이 14 m	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



보통 절편법이 항상 가장 낮으며, Bishop과 Spencer는 서로 가깝다(원호의 경우 차이는 수 퍼센트 정도).

물과 지진이 FS를 가장 크게 낮추며(1.255와 1.138, 보통 절편법), 네 개의 네일은 FS를 1.753으로 높인다. 네일을 설치하면 Bishop과 Spencer 모두 2.0을 넘는다.

가정사항

모델이 가정하는 사항과 다루지 않는 사항

모델은 평면변형률을 가정한다: 무한히 긴 사면의 1 m 구간, 모든 방향에서 동일한 강도(등방성 암반 기준 제외), 활동이 시작되기 전까지 강체로 거동하는 지반으로 본다.

물은 어떤 선 아래의 정수압 또는 상재하중에 대한 r_u 비를 사용하며, 침투 해석은 수행하지 않고 수위 급강하 시에는 $\bar{B} = 1$로 즉시 강하를 가정한다.

절편에 대해 모든 물리량은 절편 중앙의 연직선에서 취하고, 음의 유효수직력은 0으로 유지한다. 지진은 의사정적 계수로 다루며, 지표면에 고인 물의 관성력은 무시한다.

Spencer 방법은 절편 간 힘이 전체 활동 토체에 대해 단일 각도로 서로 평행하다고 가정하며, 모멘트 평형은 세 방법 모두에서, 힘의 평형은 Spencer 방법에서만 만족한다.

탐색은 초기 활동면 부근에서 안전율이 가장 낮은 활동면을 찾으며, 이것이 모든 활동면 중 가장 낮다는 것은 증명되어 있지 않다.

수행하지 않는 사항

- 3차원 효과 (활동의 끝단, 사면의 폭)
- 변형, 진행성 파괴, 변형률 연화
- 침투 및 압밀: 간극수압은 주어지며 계산하지 않는다
- 동적 해석 (Newmark): 의사정적 계산은 검토 수단이다
- 규정: FS는 제시되며 적정 값은 기술자와 시방서가 정한다

요약

핵심 정리

FS = ΣR/ΣD; R = cL + N′ tan φ′, D = W sin α (원의 중심에 대한 모멘트). 세 방법은 **N′** 값을 구하는 방식만 다르다

절편 22 (예제): α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → 보통법 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

같은 원호: **1.569(보통법) · 1.740(Bishop) · 1.717(Spencer)**; 위험 활동원호는 15 × 15 × 12 격자에서 4650개의 원을 시도하여 찾았다

물: $u = \gamma_w h_w$에 의해 N′이 감소한다. **지진**: F_h는 법선력을 감소시키고 모멘트를 추가한다. **인장균열 속의 물**은 ΣD에 P_w의 모멘트를 추가한다

보강재: 수동형(네일, 지오그리드)은 저항 측에 반영하고, 능동형(앵커)은 활동 측에서 차감한다; **Hoek–Brown**: 각 저면에서 접선 c_i, φ_i

참고문헌

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.

참고

수치 예제는 모두 모듈의 자체 계산 라이브러리로 산출하였으며, 모듈도 동일한 값을 제공한다. 모듈 페이지의 계산 예제 모델 역시 이 단면이다(높이 10 m의 2:1 사면, 매립토 위의 점토).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

단면을 직접 그리거나 DXF에서 불러오고 지반, 지하수, 하중, 지진, 보강재를 입력하면, 모듈이 위험 활동원호를 탐색하여 세 가지 방법의 안전율, 절편 표, 단계별 풀이, 보고서를 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com