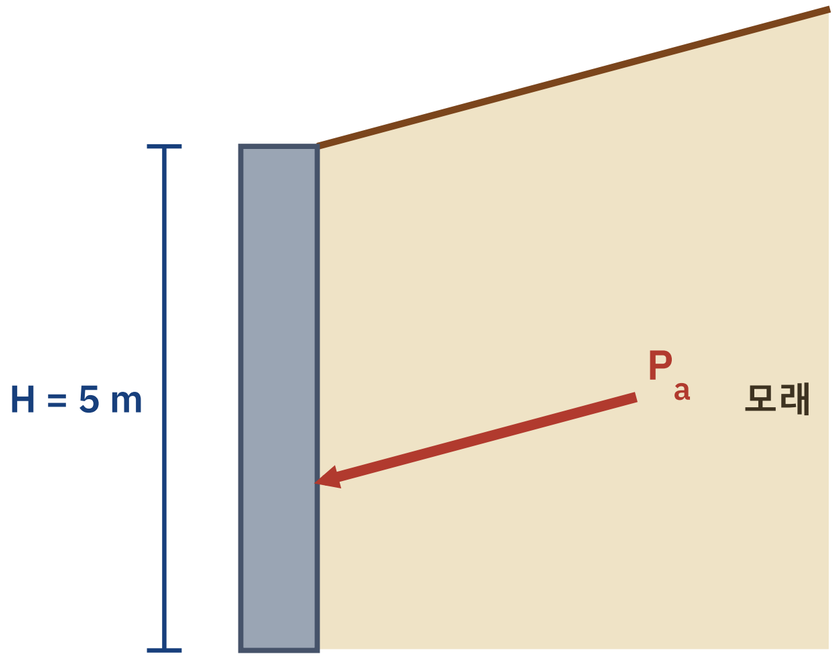
지반공학 강의 자료 · 측방토압

Rankine: 경사 뒤채움과 경사 옹벽

강의: 뒤채움 표면이 경사지거나 벽면이 기울어진 경우의 Rankine 해; 압력이 표면에 평행한 경우, 토압계수 K, 점착력이 있는 뒤채움과 층상 뒤채움; 각 주제별 계산 예제.

경사 뒤채움 | 주동 및 수동 | 경사 벽체 · Chu (1991) | 점성토 뒤채움 | 다층 뒤채움



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 뒤채움 표면이 경사질 때 토압이 **표면과 평행**하다는 것과 K_a, K_p가 α에 따라 변하는 이유
- $K_aK_p = \cos^2\alpha$ 관계식과 **$\alpha \le \varphi'$** 한계
- 경사 옹벽 + 경사 뒤채움에 대한 **Chu (1991)** 해: ψ, $K_{(R)}$, β 및 η
- 힘의 **크기, 방향(β) 및 위치**를 구하고, 수평 성분과 연직 성분을 분리하기
- 점착력이 있는 뒤채움에서 곡선형 압력 분포도와 인장 깊이, 그리고 **비배수 점토**에서 사면의 안정 조건
- 지표면에 평행한 지층에서는 각 지층 고유의 K를 사용하기

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

힘은 벽체 단위 길이당 값이다(kN/m); α와 θ는 도 단위, 압력은 kPa. 벽면 마찰은 없다.

압력은 지표면에 평행하다

이론

벽체 배면의 점착력이 없는 뒤채움 표면이 수평과 α의 각을 이루면 Rankine 압력은 더 이상 수평이 아니다: **표면에 평행**, 즉 α만큼 경사지게 작용하며 여전히 깊이에 따라 선형으로 증가한다:

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

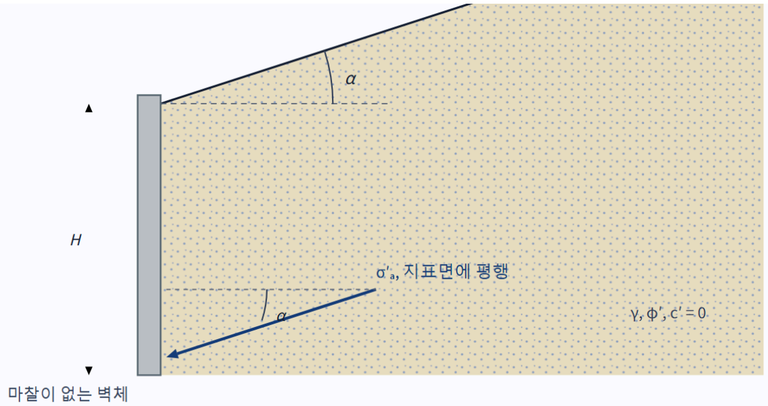
$$K_p = \cos\alpha \frac{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}} \qquad P_p = \tfrac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

두 힘 모두 저면으로부터 **H/3** 높이에 작용하며 수평과 α의 각을 이룬다: $P_h = P\cos\alpha$, $P_v = P\sin\alpha$.

α = 0일 때 식은 $\tan^2(45° \mp \varphi'/2)$로 단순화된다.

곱은 **$K_a K_p = \cos^2\alpha$**이며, α = 0에서는 1이다.

경사 성토



K_a와 K_p – α와 φ′

이론

주동 K_a

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

수동 K_p

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

문제

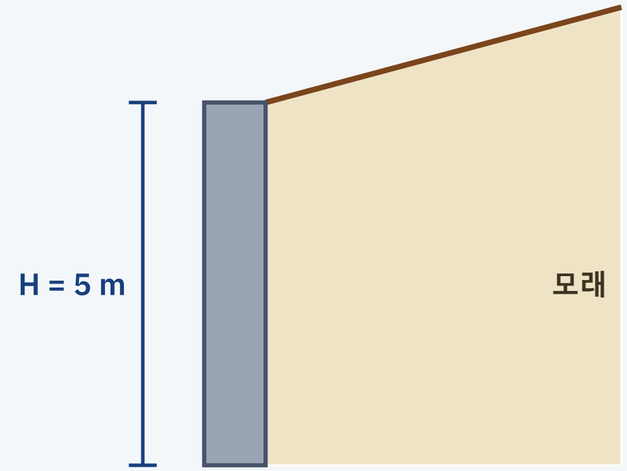
예제

구하는 값

K_a, P_a, 작용 높이와 작용 방향; 수평·수직 성분; 수평 뒤채움과의 비교.

조건

벽체	$H = 5$ m, 수직, 마찰 없음
매립토	건조 모래: $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$, 지표면 경사 $\alpha = 15°$



풀이

풀이

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

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

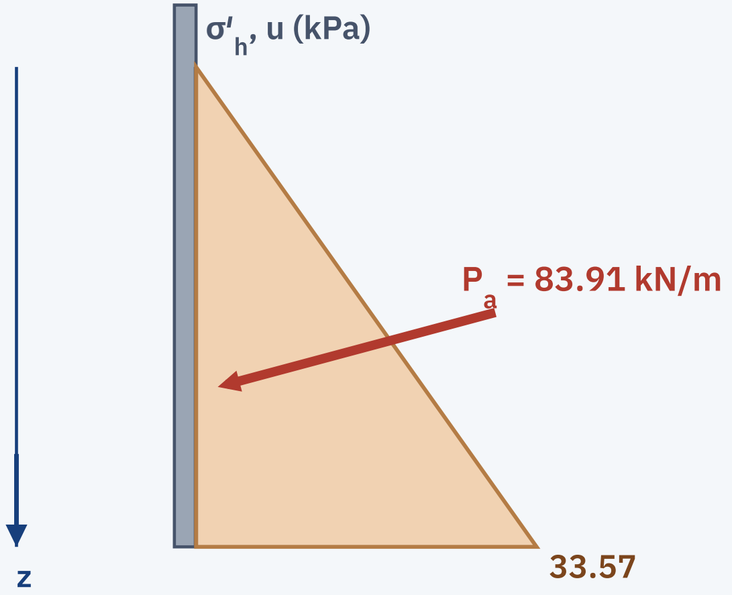
2 저면에서의 압력 (표면과 평행)

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

3 힘, 작용 위치 및 성분

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

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



P_a = **83.91 kN/m**이며 수평과 15°의 각을 이루고, 저면 위 1.67 m에 작용한다. 수평 뒤채움에서는 P_a = 75.00 kN/m였으며, 경사는 합력을 12% 증가시킨다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

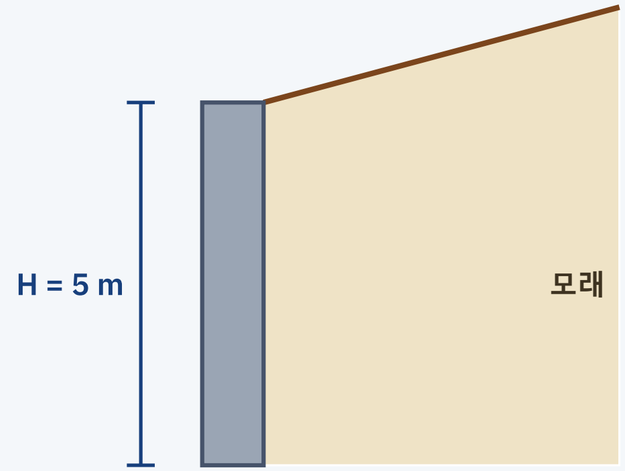
조건

벽체와 뒤채움

예제 1의 벽체와 뒤채움: $H = 5\ \text{m}$, $\gamma = 18\ \text{kN/m}^3$, $\varphi' = 30^\circ$, $\alpha = 15^\circ$

구하는 값

K_p, P_p 및 그 성분; 수평 뒤채움의 수동력과의 비교.



γ = 18 kN/m³, φ′ = 30°, α = 15° (수동)

풀이

풀이

1 계수 (r = 0.4278)

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

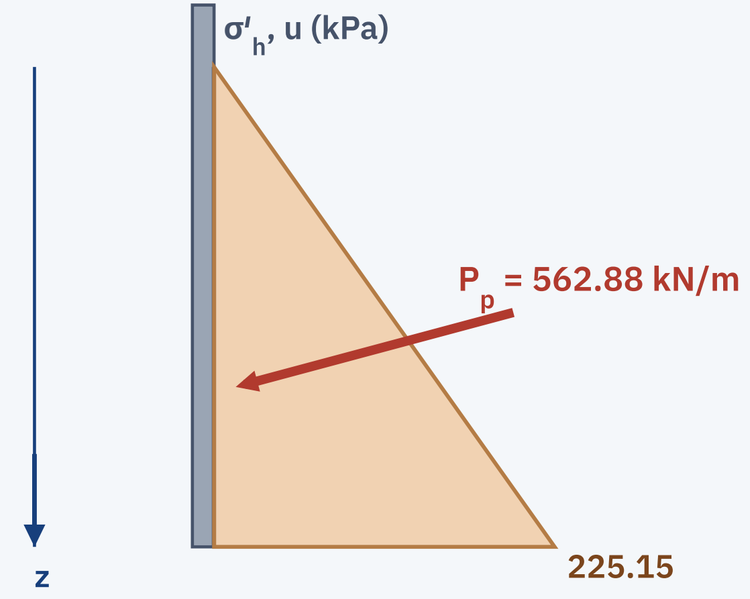
2 저면의 압력과 힘

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

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

3 성분 (수평과 15°)

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



P_p = **562.9 kN/m**. 뒤채움이 수평인 경우 675.0 kN/m였다: 경사는 수동저항을 17% **감소**시킨다(주동력은 증가하는 반면). $K_aK_p = 0.9330 = \cos^2 15°$ 검증이 성립한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

α ≤ φ′ 조건

이론

근호를 포함한 식은 **cos²α ≥ cos²φ′**, 즉 α ≤ φ′일 때만 실수값이다. φ′보다 급한 사면은 비점성 지반에서 스스로 유지되지 못한다. 한계에서 근호의 값은 0이 되고 두 계수는 모두 같은 값에 접근한다:

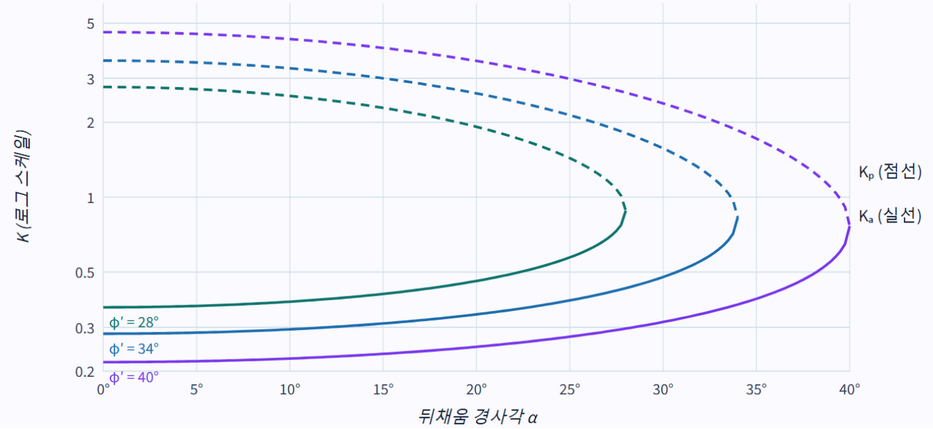
$$\alpha = \varphi' : \qquad K_a = K_p = \cos\varphi'$$

α가 커질수록 K_a는 증가하고 K_p는 감소하며, 둘은 α = φ′에서 한 값으로 합쳐진다(주동 상태와 수동 상태를 구별할 수 없게 된다).

이는 지반이 자연 사면각(안식각) 상태에 있는 경우이다: 뒤채움은 이미 파괴 직전에 있으며 옹벽이 움직여도 토압은 변하지 않는다.

α > φ′인 경우 해가 존재하지 않으며 모듈이 경고를 표시한다.

K – α (로그 눈금; φ′ = 28°, 34°, 40°)



문제

예제

조건

지반	**비점성 모래,** $\varphi' = 32^\circ$
경사	$\alpha = 0^\circ,\ 10^\circ,\ 20^\circ,\ 30^\circ,\ 32^\circ$ **(및** 33°**)**

구하는 값

각 경사에 대한 K_a, K_p 및 이들의 곱; 한계에서의 값; α = 33°일 때의 결과.

풀이

풀이

1 각 경사에 대한 식 ($\varphi' = 32°$; $\cos 32° = 0.8480$)

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

2 한계: $\alpha = \varphi' = 32°$와 $\alpha = 33°$

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

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

α가 커질수록 K_a는 0.307 → 0.574, K_p는 3.25 → 1.306으로 변하며, 모든 α에서 $K_aK_p = \cos^2\alpha$이다. $\alpha = \varphi' = 32°$에서 두 계수는 모두 $\cos\varphi' = 0.848$과 같아지고, $\alpha = 33°$에서는 **해가 존재하지 않는다**(사면이 한계보다 급함).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

경사 벽면과 경사 뒤채움: 주동

이론

벽체 면이 연직에서 θ만큼, 뒤채움 표면이 수평에서 α만큼 기울어진 경우(둘 다 그림과 같이 양(+)의 값이며 벽면 마찰은 없음), Chu(1991)의 해로 힘의 **크기와 방향**을 구한다:

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

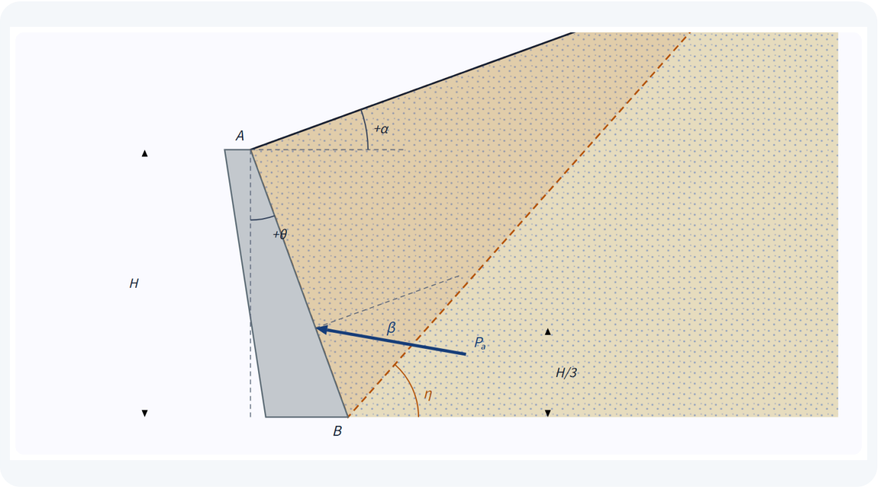
$$K_{a(R)} = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' - 2\sin\varphi'\cos\psi_a}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha + \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

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

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

β: 힘이 벽체 면의 법선과 이루는 각; 힘은 저면으로부터 **H/3** 위에 작용한다. **η**: 활동 쐐기의 저면 BC가 수평과 이루는 각.

θ = 0이면 경사 뒤채움에 대한 $K_{a(R)}$ 식(식 1)이 되고, β는 α로 환원된다.



수동 상태에서의 부호 변화

이론

수동 상태에서는 동일한 기하 조건에 대해 부호가 바뀐다:

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

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

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

합력은 저면에서 H/3 높이에 작용한다. 벽면과 지표면은 90° − |α − θ|의 각으로 만나며, 이 각이 닫히면 벽체가 사면을 따라 연장되어 벽면에 작용하는 것은 그 위 지반의 중량이 된다. 모듈은 |α − θ| ≤ 75°인 경우만 적용한다.

문제

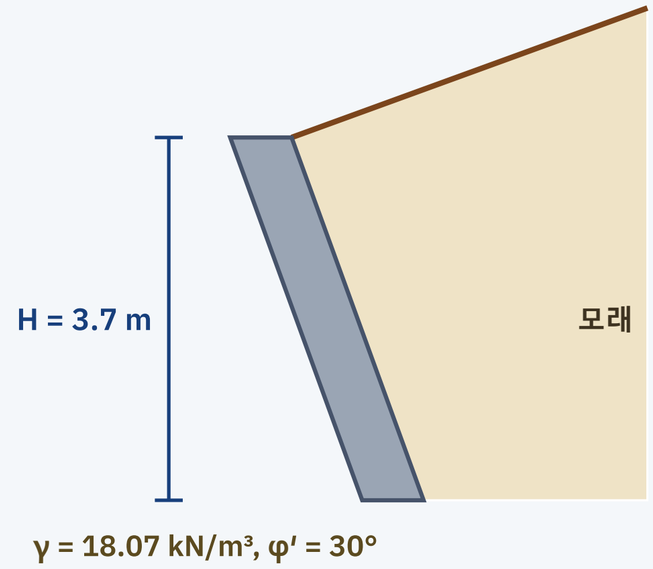
예제

조건

벽체	**마찰 없음; 벽면이 연직선에서 $\theta = +20^\circ$ 경사; $H = 3.658$ m (12 ft)**
매립토	**건조 모래: $\gamma = 18.07$ kN/m^3 (115 pcf), $\varphi' = 30^\circ$; 지표면 경사 $\alpha = +20^\circ$**

구하는 값

ψ_a, $K_{a(R)}$, P_a, β, η 및 작용 높이. 모듈의 초기 모델은 이 옹벽이다.



풀이 (1/2)

풀이

1 보조각과 ψ_a

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

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

2 계수 $K_{a(R)}$

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

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

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

풀이 (2/2)

풀이

3 힘과 위치

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

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

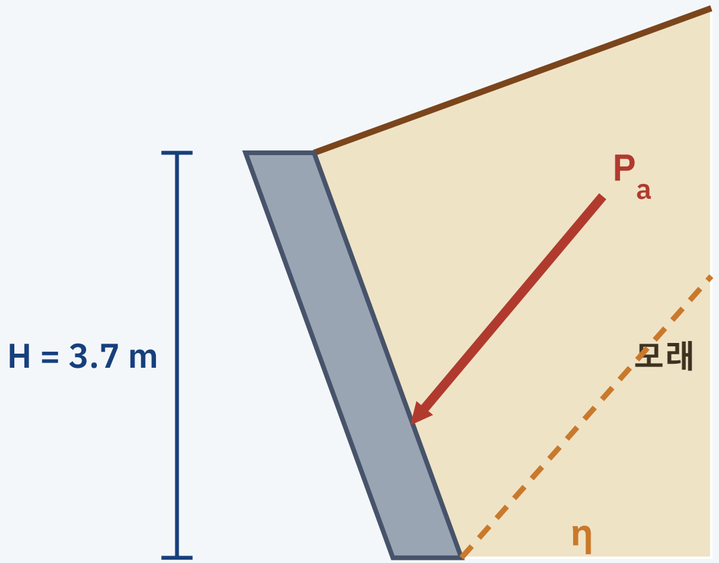
4 주향 β와 쐐기각 η

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

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

5 성분 (면에 수직 및 면에 평행)

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



P_a = **93.79 kN/m**(미국 단위계로 6,424 lb/ft), 벽면 법선에서 **30.0°**, 저면으로부터 H/3 = 1.22 m 위에 작용한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

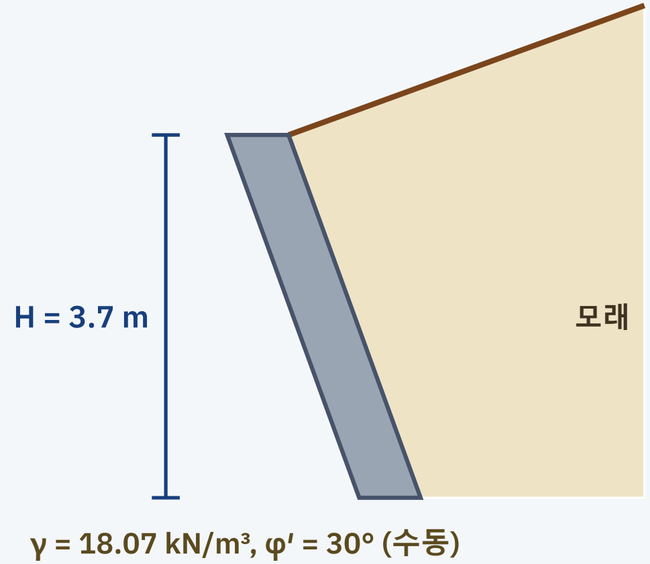
예제

구하는 값

ψ_p, $K_{p(R)}$, P_p, β 및 η; 주동 상태와의 비교.

조건

벽체와 뒤채움	**예제 4의 옹벽과 뒤채움:** $\theta = +20^\circ$, $\alpha = +20^\circ$, $\varphi' = 30^\circ$, $\gamma = 18.07\ \text{kN/m}^3$, $H = 3.658\ \text{m}$



풀이

풀이

1 ψ_p와 $K_{p(R)}$

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

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

2 힘, 방향 및 쐐기각

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

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

P_p = **350.7 kN/m**, β = 7.7°; 같은 벽체의 주동력은 93.79 kN/m였다(비 3.7). 수동에서는 힘이 벽면에 거의 수직이며(β가 작음), 주동에서는 약 30° 기울어져 있다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

벽면 경사 θ가 힘을 어떻게 변화시키는가?

이론

뒤채움 경사를 일정하게 두고(α = 20°, φ′ = 30°) 벽면만 회전시키면 $K_{a(R)}$ 및 β가 변한다:

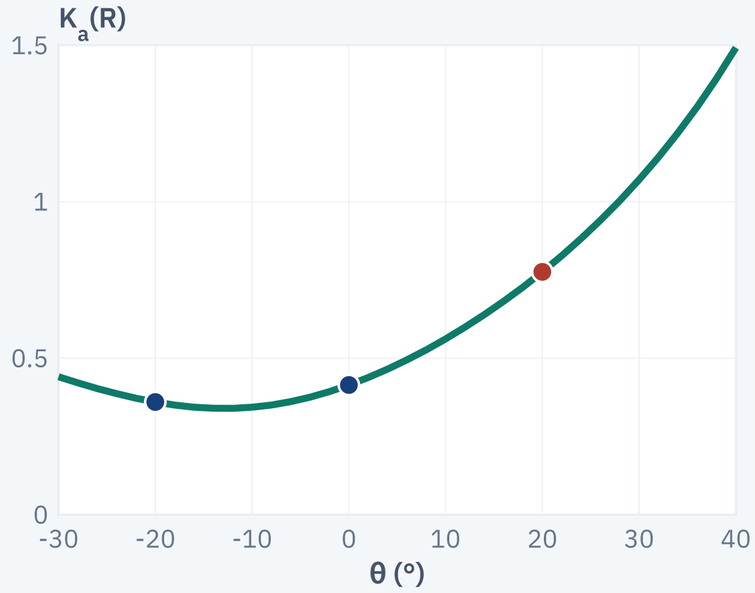
θ	$K_{a(R)}$	β
−20°	0.360	-15.5°
0°	0.414	20.0°
+20°	0.776	30.0°

θ가 양수이면(벽면이 뒤채움 위쪽으로 기울면) 뒤채움이 벽면 위에 놓이게 되어 힘이 커지고, 음수이면 작아진다.

θ = 0이고 α = 20°이면 β = α = 20°이며, 힘은 지표면과 평행하다.

$K_{(R)}$에는 힘의 **벽면에 평행한 성분과 수직인 성분**이 함께 포함되며, 수평 성분만 구할 때는 P cos(β + θ)를 사용한다.

$K_{a(R)}$ – θ (α = 20°, φ′ = 30°)



Mazindrani와 Ganjali (1997)

이론

연직이고 마찰이 없는 벽체 뒤에서 지표면이 α로 경사진 c′–φ′ 지반의 깊이별 주동압력:

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

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

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

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

K'_a는 $c'/\gamma z$를 통해 깊이에 의존한다: 압력은 **선형이 아니다**; 지표면 위쪽에서는 음수이며, 인장균열 깊이 z_c는 경사와 무관하다.

수동 상태에서는 근호 앞의 부호가 +가 된다. α = 0 → Rankine($\sigma'_a = K_a\gamma z - 2c'\sqrt{K_a}$); c′ = 0 → 식 1.

균열을 고려한 계산에서는 z_c 아래 구간을, 균열이 없는 경우에는 전체 높이를 적분하며, θ = 0인 경우에만 성립한다.

지표면에 평행한 압력

비점성토의 경우와 마찬가지로 압력은 표면과 **평행**하게, 즉 수평과 α의 각을 이루며 작용한다; 힘의 옹벽 면에 수직인 성분은 P cos α이다.

문제

예제

조건

벽체	$H = 5$ m, 수직, 마찰 없음
매립토	$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 25°$, $c' = 10$ kPa; 지표면 경사 $\alpha = 10°$

구하는 값

z_c, 저면의 토압, 인장균열이 있는 경우와 없는 경우의 P_a와 작용 높이; 수평 뒤채움과의 비교.

풀이 (1/2)

풀이

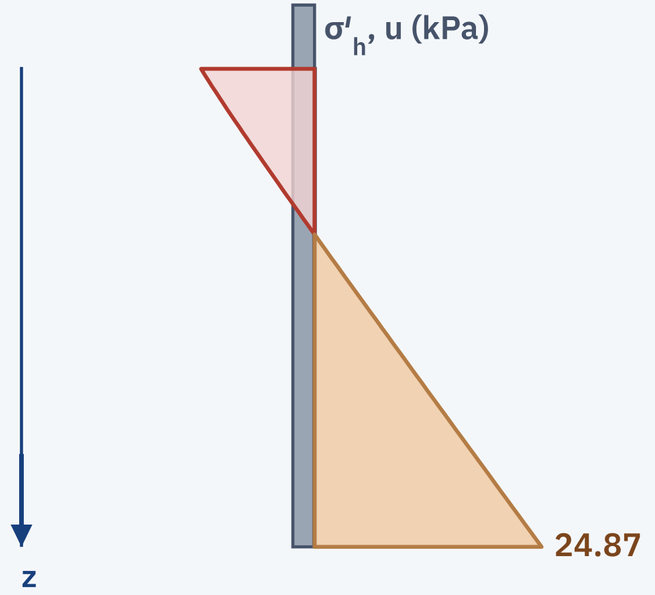
1 인장균열 깊이 (경사와 무관)

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

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

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

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



풀이 (2/2)

풀이

3 균열을 고려한 힘 (z_c에서 H까지 곡선 분포도의 면적, 수치 적분)

$$P_a = \int_{z_c}^{H} \sigma'_a \, dz = \mathbf{40.33}\ \text{kN/m}\ (\text{지표면에 평행, } 10°)$$

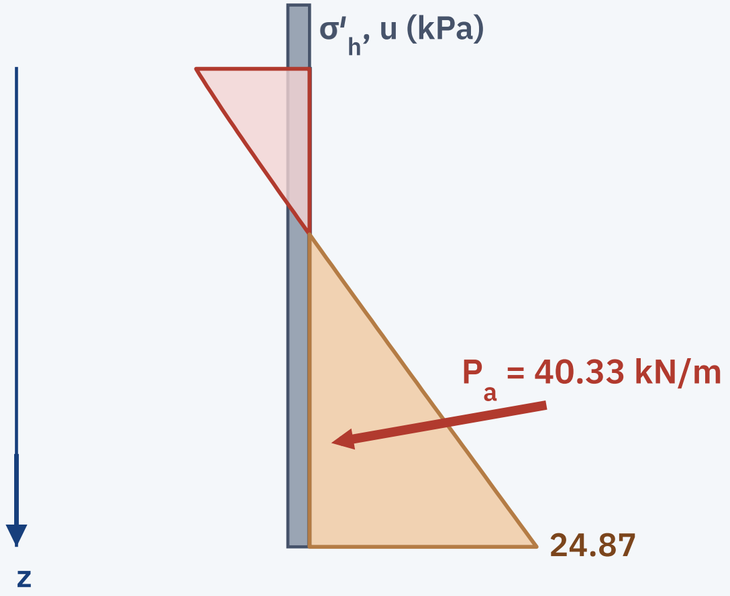
$$\bar{z} = 1.08\ \text{m}\ (\text{저면에서})$$

4 비교

균열 없음: $P_a = 29.16$ kN/m

수평 뒤채움: $P_a = \frac{1}{2}(23.79)(3.256) = 38.72$ kN/m

균열이 있는 경우의 합력은 **40.33 kN/m**로, 균열이 없는 경우보다 38% 크다. 수평 뒤채움(38.72 kN/m)과 비교하면 경사는 합력을 4% 증가시켰다. 균열이 있는 값이 설계값이다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

지표면에 평행한 지층

이론

뒤채움이 **지표면에 평행한** 층들로 이루어져 있으면(옹벽 배면의 연직 시추공이 어디서나 같은 두께를 관통한다), 각 층은 위 지반의 중량 $\sigma'_v = \Sigma \gamma_i h_i$ 하에서 자신의 γ, φ′, c′ 값으로 평가한다:

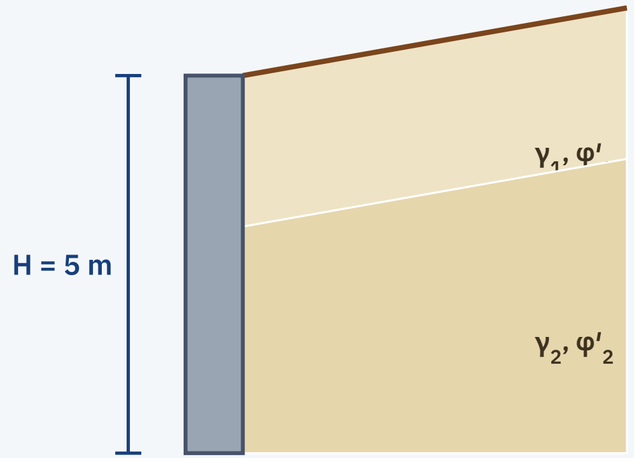
$$\sigma' = \sigma'_v \frac{K_{(R)} \cos\theta}{1 + \tan\theta \tan\alpha} \qquad \theta = 0 : \ \sigma' = \sigma'_v K_{(R)}$$

지층 경계에서 K가 변하므로 압력이 **급변한다**; 각 지층의 힘은 벽면에 수직인 성분 N_i와 평행한 성분 T_i로 분해된다; $P = \sqrt{(N^2 + T^2)}$, $\beta = \tan^{-1}(T/N)$.

상재하중 q는 지표면에서 무게 q/cos α의 층처럼 σ'_v에 더해지며, **수위** 아래에서는 γ′를 사용하고 u는 벽체에 수직으로 작용한다.

이는 모듈이 Chu와 Mazindrani–Ganjali의 해를 다층 지반으로 확장한 것이다 (문헌에는 닫힌 형태의 다층 해가 없다). 단일 지층에서는 닫힌 형태의 해와 10^{-8} 이내로 일치한다.

지표면에 평행한 지층



문제

예제

조건

벽체	$H = 5$ m, 수직, 마찰 없음
매립토	지표면 경사 $\alpha = 10°$; 지표면에 평행한 두 지층 (연직 두께)
지층 1 (2 m)	$\gamma = 17$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$
지층 2 (3 m)	$\gamma = 19$ kN/m^3, $\varphi' = 35°$

구하는 값

각 지층에서 압력, **P**, **N**, **T** 및 작용 높이.

풀이 (1/2)

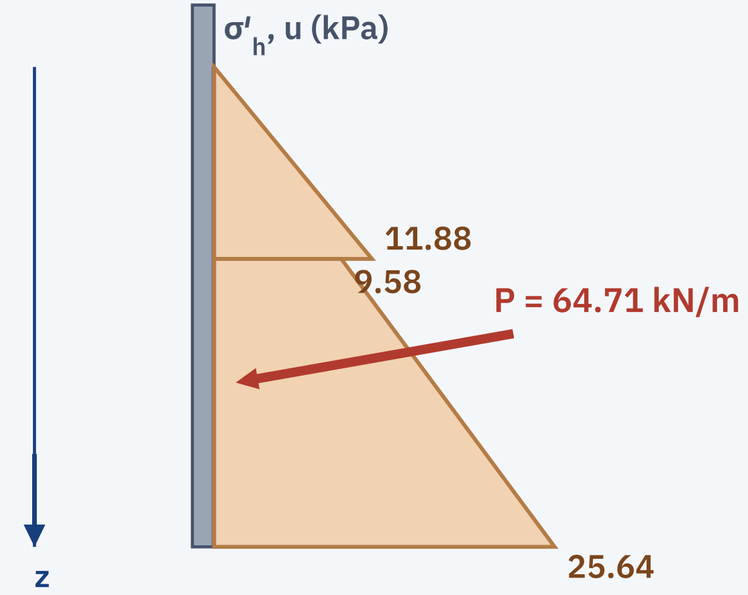
풀이

1 계수 (α = 10°)

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

2 연직응력: 경계에서 17(2) = 34; 저면에서 34 + 19(3) = 91 kPa

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



풀이 (2/2)

풀이

3 힘 (지표면에 평행): 상부 삼각형 · 하부 직사각형 · 하부 삼각형

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

4 성분과 작용 높이

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

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

P = **64.71 kN/m**, 벽면에 수직인 성분 N = 63.73 kN/m이며, 저면으로부터 1.71 m 위에 작용한다. 경계에서 압력은 11.88 → 9.58 kPa로 **감소하는데**, 이는 아래 지층의 φ′ 값이 더 크기 때문이며 σ'_v는 연속이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

사면의 안정 조건

이론

비배수 점토($\varphi_u = 0$, c_u, 전응력)도 같은 관계식이며, $\varphi' = 0$, $c' = c_u$로 취한다:

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

해는 **사면이 자립하는 동안**에만 존재한다: 지표면에 평행한 평면의 전단응력은 점착력을 초과할 수 없다:

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

모듈은 이 조건을 벽체 저면까지 검토하며, 벽체가 z_{max}보다 높으면 계산이 중단된다.

$\alpha = 0$일 때 $\sigma_a = \gamma z - 2c_u$, 인장균열 깊이 $2c_u/\gamma$.

한계가 존재하는 이유

경사진 지표면 아래에서는 지표면에 평행한 모든 면의 전단응력이 깊이에 따라 증가하며, 점토는 이 응력을 c_u까지만 부담할 수 있다. 더 깊은 곳에서는 사면이 자중으로 활동한다.

문제

예제

조건

매립토	**포화 점토, 비배수:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $c_u = 20$ **kPa; 지표면 경사** $\alpha = 15^\circ$
벽체	$H = 4$ **m (및 5 m), 연직, 마찰 없음**

구하는 값

z_{max}, z_c, 저면의 압력 및 균열을 고려한 P_a; H = 5 m에서는 어떻게 되는가?

풀이 (1/2)

풀이

1 안정 한계와 인장 깊이

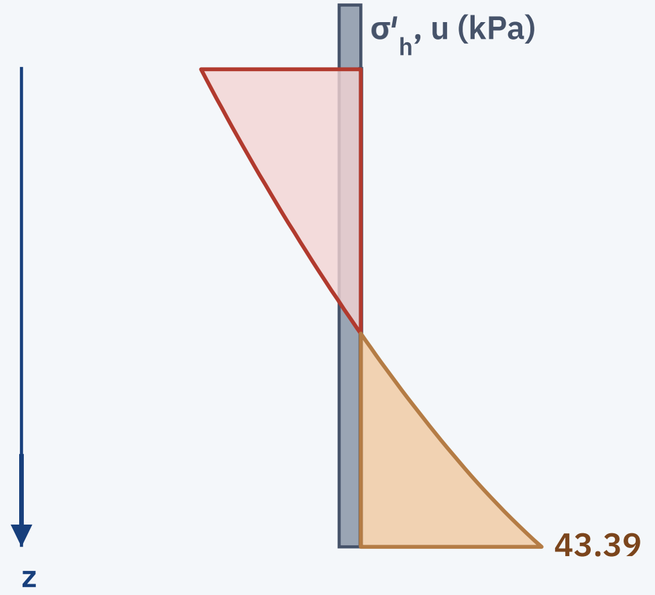
$$z_{max} = \frac{20}{18 \sin 15^\circ \cos 15^\circ} = \mathbf{4.44}\ \text{m}$$

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

2 H = 4 m: τ(4) = 18(4) sin15° cos15° = 18.0 ≤ 20 kPa: 사면이 안정하다; 저면에서 r = 20/(18·4) = 0.2778

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

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



풀이 (2/2)

풀이

3 인장균열을 고려한 힘 (z_c에서 4 m까지)

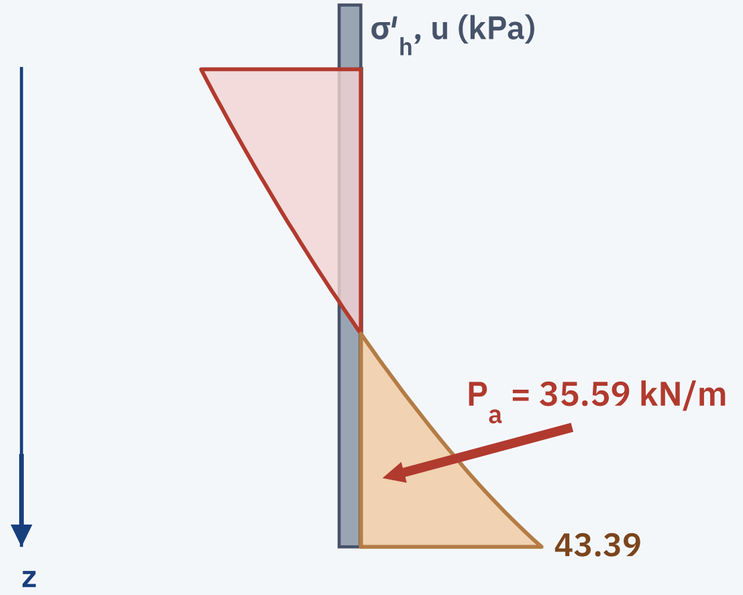
$$P_a = \int_{z_c}^{H} \sigma_a \, dz = \mathbf{35.59}\ \text{kN/m (수평면과 15°)}$$

$\bar{z} = 0.57$ m 균열 없음: $P_a = -9.37$ kN/m

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

$$\tau(5) = 18(5)\sin 15^\circ \cos 15^\circ = 22.5 > c_u \ \Rightarrow$$ 사면 파괴

H = 4 m에서 인장균열을 고려한 P_a = **35.59 kN/m**이다. 균열을 고려하지 않은 힘은 음수(−9.37 kN/m)이므로 균열 가정이 결정적이다. z_{max} = 4.44 m이므로 5 m 벽체에는 해가 없다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

풀이의 범위

이론

벽체는 마찰이 없다. Chu 해에서 압력은 벽체 법선에 대해 β의 각도로 작용하는 것으로 주어진다(β는 지반 자체의 응력 상태에서만 유래하며 벽체–지반 마찰에 의한 것이 아니다). 마찰이 있는 벽체는 Coulomb 모듈을 참조한다.

뒤채움재는 한 방향으로 일정하게 경사진 평면이며 지층은 지표면과 평행하다. 지표면 경사의 변화, 소단 또는 꺾인 지표면은 이 해에 포함되지 않는다.

점성토 뒤채움은 연직 벽체(θ = 0)에 대해서만 Mazindrani–Ganjali의 해로 제시된다. 인장균열은 z_c까지 발생하는 것으로 가정하며, 물이 찬 균열은 별도로 고려해야 한다.

기하 조건: 벽면과 지표면이 최소 15°의 각도로 만나야 한다 ($|\alpha - \theta| \le 75°$). 그렇지 않으면 벽면에 작용하는 압력은 측방토압이 아니라 위에 있는 지반의 중량이다.

지진과 **벽면마찰이 있는 벽체**는 이 모듈의 범위를 벗어난다(Mononobe–Okabe, Coulomb).

요약

핵심 정리

경사 뒤채움 ($\alpha \le \varphi'$): 압력은 지표면에 **평행**하며, $K_a = \cos\alpha\,(\cos\alpha - r)/(\cos\alpha + r)$, K_p는 부호가 반대이다. $P = \tfrac{1}{2}K\gamma H^2$은 저면에서 $H/3$ 높이에 작용하고 수평과 α를 이룬다

$K_aK_p = \cos^2\alpha$; α가 커질수록 K_a는 증가하고 K_p는 감소하며, $\alpha = \varphi'$에서 둘 다 $\cos\varphi'$가 되고, $\alpha > \varphi'$이면 해가 없다

Chu (1991): $\psi_a = \sin^{-1}(\sin\alpha/\sin\varphi') - \alpha + 2\theta$; $K_{a(R)}$, β 및 η는 닫힌 형태의 식; 힘은 벽면 법선에서 β만큼 기울어져 있다

벽체 경사 θ가 양(+)이면 힘이 증가하고 음(−)이면 감소한다; 수동토압의 경우 $\psi_p = \sin^{-1}(\ldots) + \alpha - 2\theta$

점성토 뒤채움에서 K'_a는 깊이에 따라 변하며 압력 분포는 곡선이다; $z_c = (2c'/\gamma)\sqrt{((1+\sin\varphi')/(1-\sin\varphi'))}$ 식은 경사와 무관하다; 인장균열을 고려한 합력이 기준이 된다

다층 뒤채움: $\sigma' = \sigma'_v K_{(R)}$; 경계에서 불연속, $P = \sqrt{(N^2 + T^2)}$

비배수 점토: $z_{max} = c_u/(\gamma \sin\alpha \cos\alpha)$를 초과하면 사면은 자중으로 활동하며 해가 존재하지 않는다

참고문헌

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

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

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

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

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈이 동일한 값을 제공한다. 모듈의 초기 예제는 예제 4의 옹벽(H = 3.658 m, γ = 18.07 kN/m³)이다.

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

실제 옹벽의 벽면 경사, 뒤채움 경사, 지층, 지하수를 GeoTerva에 입력하면 모듈이 힘과 그 방향, 작용 높이를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com