지반공학 강의 자료 · 측방토압

Rankine 측방토압

강의: 마찰이 없는 연직 벽체에 작용하는 주동 및 수동 토압; 비점성토 및 점성토 뒤채움, 상재하중, 지하수 및 층상 지반; 주제별 계산 예제.

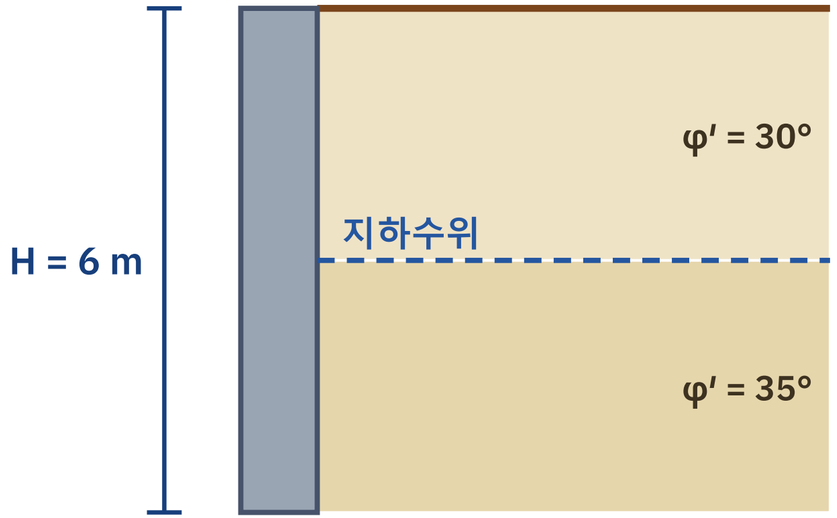
주동 및 수동 상태

$K_a = \tan^2(45° - \varphi'/2)$

상재하중과 지하수

층상 뒤채움

인장균열



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 주동 및 수동 상태의 Mohr 원을 이용하여 $\sigma'_a = K_a\sigma'_o - 2c'\sqrt{K_a}$가 되는 **이유**를 이해하기
- K_a와 K_p 계수를 φ'로부터 계산하고, 정지토압계수 K_0 값과 비교하기
- 비점성 뒤채움에서 압력 삼각형으로부터 **힘**과 **작용 높이**를 구하기
- 상재하중, 지하수 및 지층 경계가 분포도를 어떻게 바꾸는지 확인하기
- c'–φ' 지반과 $\varphi = 0$ 지반에서 **인장 영역**과, 균열을 고려한 힘 / 고려하지 않은 힘의 구분
- 수동저항 산정, 그리고 벽체가 어느 정도 움직여야 하는지 파악

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 벽체의 단위 길이당 값이다(kN/m); 압력의 단위는 kPa이며 모든 응력은 유효응력이다.

소성 평형과 Mohr 원

이론

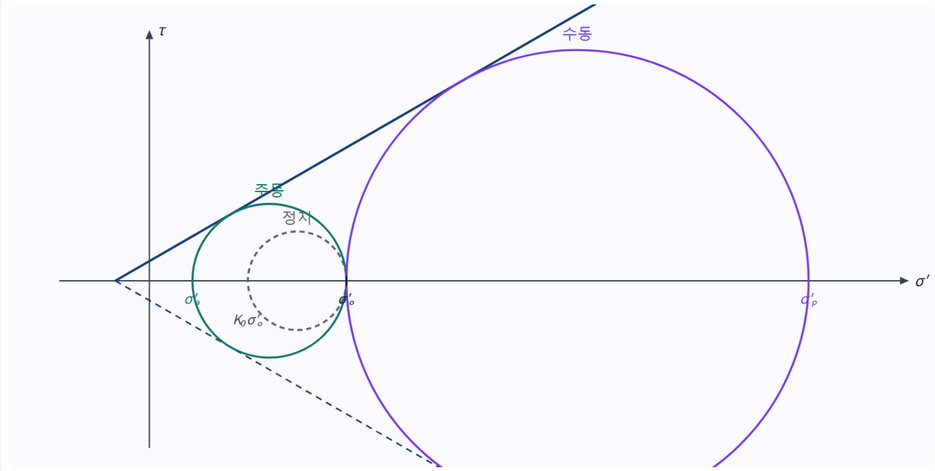
Rankine (1857)은 모든 점이 파괴 직전에 있는 흙 덩어리를 검토하였다. 연직이고 마찰이 없는 벽체가 **지반에서 멀어지면** 수평응력은 정지 상태의 값 $K_0\sigma'_o$에서 감소하고 Mohr 원이 파괴 포락선에 접한다: **주동 상태**. 벽체가 **지반 쪽으로 밀리면** 수평응력은 σ'_o보다 커진다: **수동 상태**.

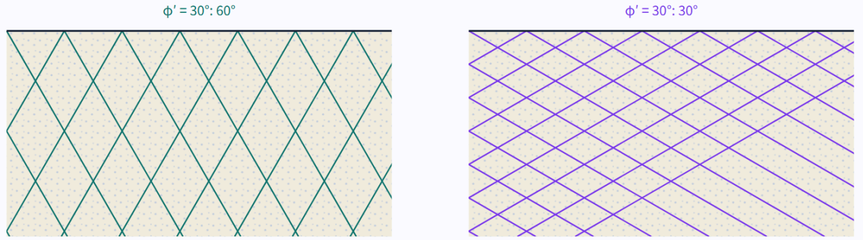
$$\sigma'_a = \sigma'_o \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) - 2c' \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

σ'_o는 연직 유효응력(구속압력)이며, 벽체 배면에서 최대 주응력은 주동 상태에서는 연직 방향, 수동 상태에서는 수평 방향이다.

활동면은 주동 상태에서 수평면과 45° + φ′/2, 수동 상태에서 45° − φ′/2의 각을 이룬다.





주동: 수평면 기준 45° + ϕ′/2 경사의 파괴면

수동: 수평면 기준 45° − ϕ′/2 경사의 파괴면

K_a와 K_p 계수

이론

Mohr 원의 기하학적 관계로부터 두 계수가 정의되며, 서로 역수이다:

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) = \frac{1}{K_a}$$

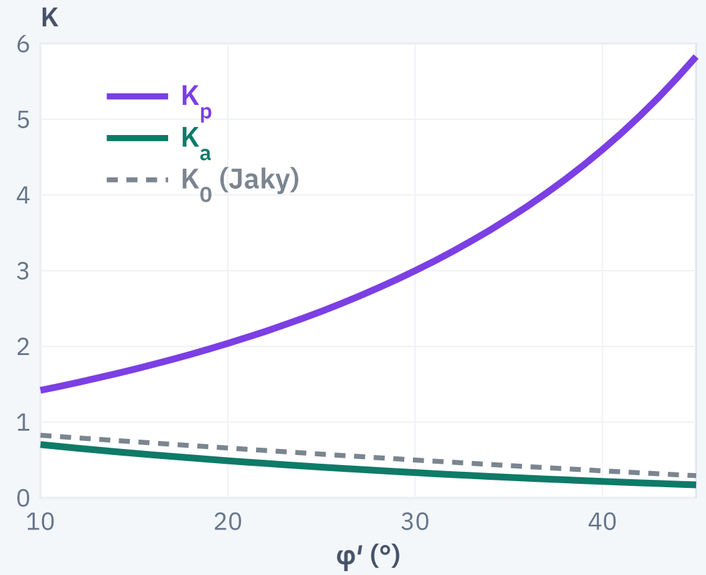
$$\sigma'_a = K_a\sigma'_o - 2c'\sqrt{K_a} \qquad \sigma'_p = K_p\sigma'_o + 2c'\sqrt{K_p}$$

φ′	25°	30°	35°	40°
K_a	0.406	0.333	0.271	0.217
K_p	2.464	3.000	3.690	4.599
K_0 (Jaky)	0.577	0.500	0.426	0.357

$K_a < K_0 < K_p$: 벽체가 움직이기 전의 정지토압은 두 한계 사이에 있다.

K_p는 φ′에 따라 급격히 증가한다: φ′ = 40°에서 수동토압은 주동토압의 20배를 넘는다.

K_a, K_p 및 K_0 – φ′



문제

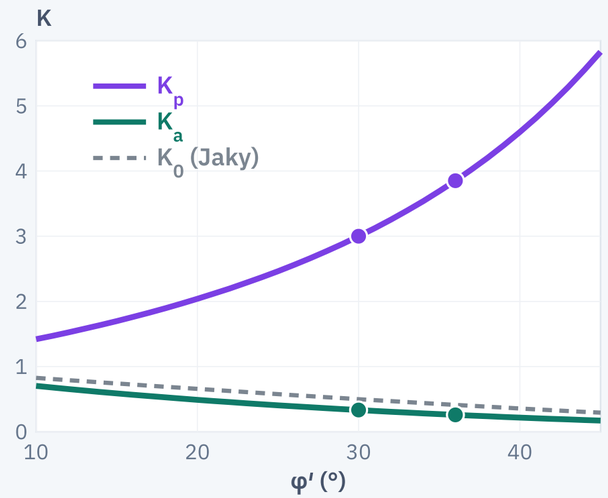
예제

조건

지반	**점착력이 없는 모래, $c' = 0$; 두 가지 경우: $\varphi' = 36°$ 및 $\varphi' = 30°$**
벽체	**연직, 마찰 없음; 뒤채움 표면은 수평**

구하는 값

K_a, K_p 및 Jaky 식에 따른 **K_0**; 세 값의 순서를 확인하라.



풀이

풀이

1 φ′ = 36°

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 18^\circ) = \tan^2 27^\circ = \mathbf{0.2596} \qquad K_p = \tan^2 63^\circ = \frac{1}{K_a} = \mathbf{3.852}$$

2 φ′ = 30°

$$K_a = \frac{1-\sin 30^\circ}{1+\sin 30^\circ} = \frac{0.5}{1.5} = \mathbf{0.3333} \qquad K_p = \frac{1+\sin 30^\circ}{1-\sin 30^\circ} = \mathbf{3}$$

3 정지토압계수 (Jaky): $K_0 = 1 - \sin\varphi'$

$$\varphi' = 36^\circ:\ K_0 = 1 - 0.5878 = \mathbf{0.4122} \qquad \varphi' = 30^\circ:\ K_0 = 1 - 0.5 = \mathbf{0.50}$$

두 지반 모두 **$K_a < K_0 < K_p$**이며 $K_a \cdot K_p = 1$이다. φ′가 30°에서 36°로 커지면 K_a는 0.333 → 0.260, K_p는 3.00 → 3.85가 된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

압력 삼각형, 힘 및 작용 높이

이론

c′ = 0이고 지표면이 수평인 뒤채움에서는 압력이 깊이에 따라 **선형으로** 증가하며 선도는 삼각형이다. 벽체 단위길이당 작용하는 힘은 삼각형의 면적이고, 작용점은 도심(저면으로부터 H/3 위)이다:

$$\sigma'_a = K_a \gamma z \qquad P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma H^2 \qquad \bar{z} = \tfrac{H}{3}$$

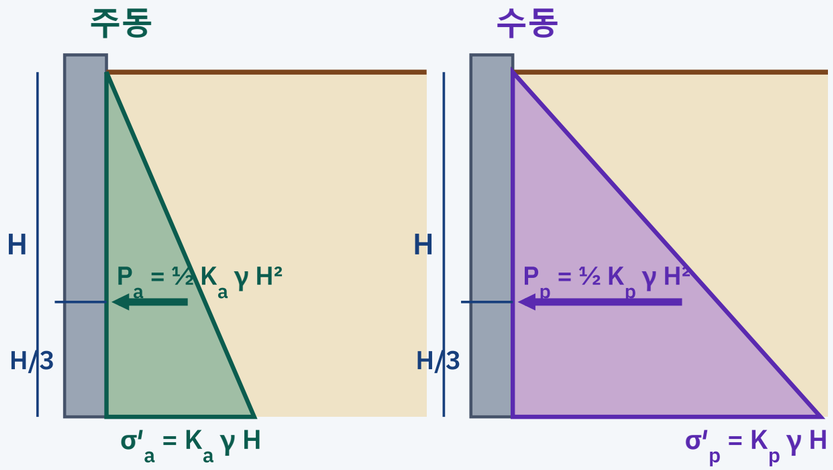
$$\sigma'_p = K_p \gamma z \qquad P_p = \tfrac{1}{2} K_p \gamma H^2 \qquad \bar{z} = \tfrac{H}{3}$$

힘은 **H²**에 비례하여 증가한다: 옹벽 높이를 2배로 늘리면 힘은 4배가 된다.

힘은 벽체에 수직이며 수평이다 (마찰 없는 벽체, δ′ = 0).

단위: γ가 kN/m³ 단위, H가 m 단위이면 P는 kN/m 단위이다.

두 가지 한계상태



문제

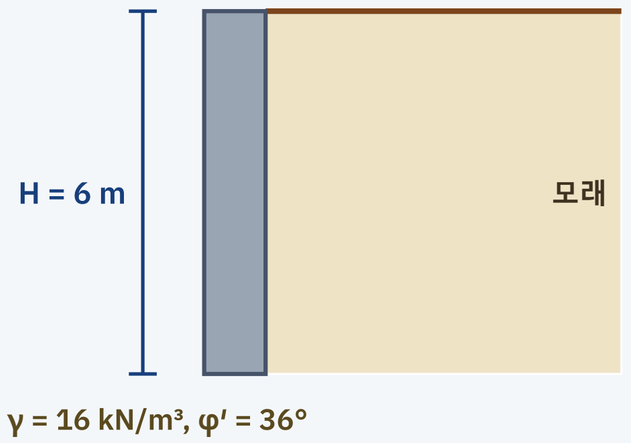
예제

구하는 값

주동 및 **수동** 힘 P_a, P_p와 그 작용 높이; 또한 정지토압에 의한 힘 P_0.

조건

벽체	$H = 6$ m, 수직, 마찰 없음; 뒤채움 표면은 수평
지반	건조 모래: $\gamma = 16$ kN/m^3, $\varphi' = 36°$, $c' = 0$



풀이

풀이

1 계수 (예제 1): $K_a = 0.2596$, $K_p = 3.852$

$$\sigma'_a(6) = K_a \gamma H = 0.2596(16)(6) = \mathbf{24.92}\ \text{kPa}$$

2 주동 합력 (삼각형의 면적)

$$P_a = \tfrac{1}{2}\sigma'_a(6)\,H = \tfrac{1}{2}(24.92)(6) = \mathbf{74.77}\ \text{kN/m}$$

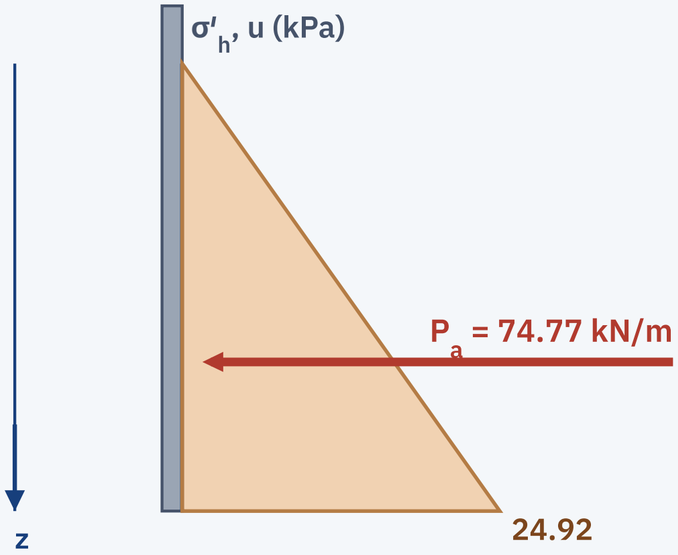
$$\bar{z} = \tfrac{6}{3} = \mathbf{2.0\ m}$$

3 수동력

$$P_p = \tfrac{1}{2}K_p \gamma H^2 = \tfrac{1}{2}(3.852)(16)(36) = \mathbf{1{,}109.3}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z} = \tfrac{6}{3} = \mathbf{2.0\ m}$$

P_a = **74.77 kN/m**, P_p = **1,109.3 kN/m**이며, 두 합력 모두 저면으로부터 2.0 m 위에 작용한다. 수동저항은 주동토압 합력의 **14.8배**이고, P_0 = 118.72 kN/m인 정지토압 합력은 두 값 사이에 있다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

분포도를 변화시키는 두 가지 영향

이론

등분포 상재하중 q는 모든 깊이에 같은 압력을 더한다: 직사각형이 추가된다. **지하수위** 아래에서는 유효응력을 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$로 계산하고, 별도로 수압 $u = \gamma_w(z - H_1)$을 **전체 값으로** 더한다:

$$P_a = K_a q H + \tfrac{1}{2} K_a \gamma H_1^2 + K_a \gamma H_1 H_2 + \tfrac{1}{2}\left(K_a \gamma' + \gamma_w\right) H_2^2$$

성분	힘	모멘트 팔 (저면 기준)
상재하중 (직사각형)	$K_a\, q\, H$	$H/2$
상부 삼각형	$\tfrac{1}{2} K_a\, \gamma\, H_1^2$	$H_2 + H_1/3$
하부 직사각형	$K_a\, \gamma\, H_1\, H_2$	$H_2/2$
하부 삼각형 (유효)	$\tfrac{1}{2} K_a\, \gamma'\, H_2^2$	$H_2/3$
수압	$\tfrac{1}{2} \gamma_w\, H_2^2$	$H_2/3$

구성 요소의 모멘트를 저면 점에 대해 취하면 합력의 작용 높이를 구할 수 있다: $\bar{z} = \Sigma P_i z_i \,/\, \Sigma P_i$.

수동력은 같은 성분을 사용하되 K_p를 적용하여 구하며, 수압은 동일하다.

물의 영향이 큰 이유

수압은 **내부마찰각에 의존하지 않는다**: K_a 대신 1을 곱한다. 수중 구간에서는 $\gamma' \approx \gamma_{sat}/2$이므로 유효토압은 작아지지만, 수압이 이를 상쇄하고도 남는다.

문제

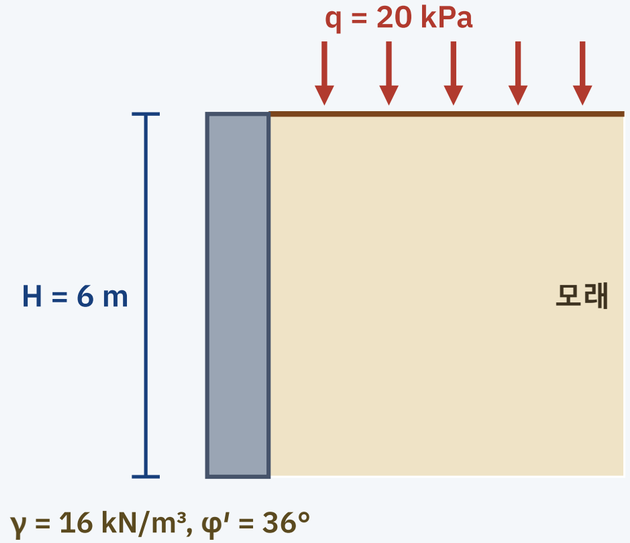
예제

조건

벽체와 지반	**예제 2의 벽체:** $H = 6$ m, $\gamma = 16$ kN/m^3, $\varphi' = 36°$, **건조**
상재하중	**뒤채움 표면의 등분포하중** $q = 20$ kPa

구하는 값

P_a와 $\bar{z}$; 상재하중의 영향.



풀이

풀이

1 압력: 지표면에서 $K_a q$, 저면에서 $K_a q + K_a \gamma H$

$$\sigma'_a(0) = 0.2596(20) = 5.19 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_a(6) = 5.19 + 24.92 = \mathbf{30.12} \text{ kPa}$$

2 힘: 직사각형 (모멘트 팔 3.0 m) + 삼각형 (모멘트 팔 2.0 m)

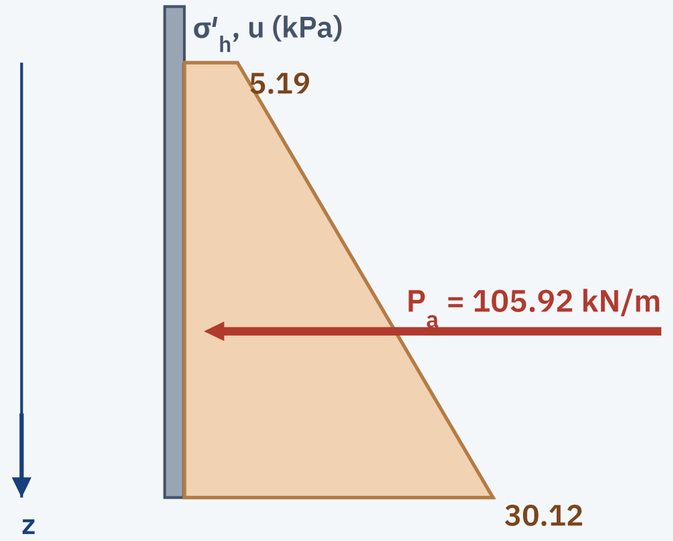
$$P_q = K_a q H = 5.19(6) = 31.15 \text{ kN/m}$$

$$P_\gamma = \tfrac{1}{2} K_a \gamma H^2 = 74.77 \text{ kN/m}$$

3 합력과 작용 높이

$$P_a = 31.15 + 74.77 = \mathbf{105.92} \text{ kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{31.15(3) + 74.77(2)}{105.92} = \mathbf{2.29} \text{ m}$$



상재하중 힘에 의해 31.15 kN/m (42%)만큼 증가하였으며, 작용점은 **2.00 m에서 2.29 m로** 상승하였다 (직사각형 분포의 모멘트 팔은 H/2).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

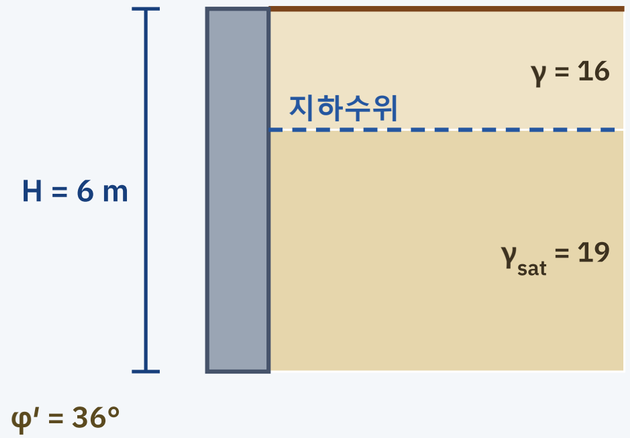
예제

구하는 값

토압과 수압에 의한 **총 힘**과 작용 높이; 물의 영향.

조건

벽체	$H = 6$ m, 수직; 지표면이 수평인 모래 뒤채움, 상재하중 없음
지반	상부 $\gamma = 16$ kN/m^3 (건조); 지하수위는 깊이 2 m에 위치; 하부 $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3; $\varphi' = 36°$



풀이

풀이

1 유효응력 (z = 2 및 6 m)

$$\sigma'_o(2) = 16(2) = 32 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_o(6) = 32 + 4(19 - 9.81) = 68.76 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_a(6) = K_a \sigma'_o(6) = \mathbf{17.85} \text{ kPa}$$

2 저면의 수압: $u = \gamma_w(6 - 2)$

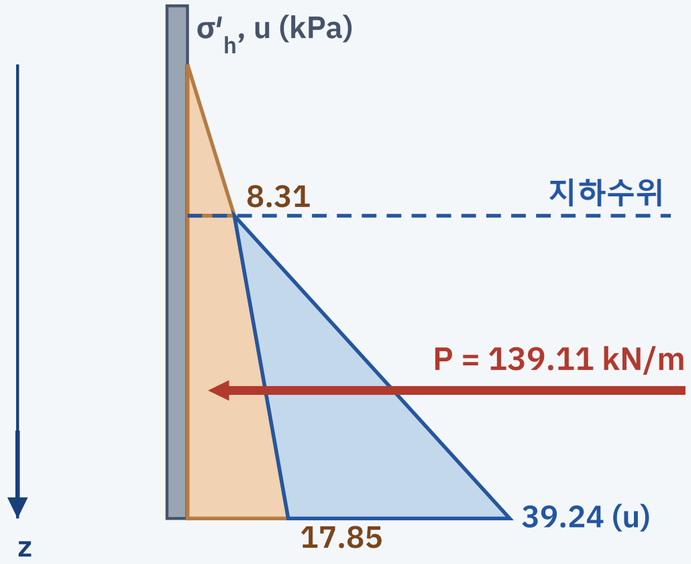
$$u(6) = 9.81(4) = \mathbf{39.24} \text{ kPa}$$

3 힘: 상부 삼각형 · 하부 직사각형 · 하부 삼각형 · 물

$$P_a = 8.31 + 33.23 + 19.09 = 60.63 \text{ kN/m (지반)}$$

$$P_w = \tfrac{1}{2}(39.24)(4) = 78.48 \text{ kN/m}$$

합계 = 60.63 + 78.48 = **139.11 kN/m, z̄ = 1.69 m**. 건조한 경우 벽체에 작용하는 힘은 74.77 kN/m였으며, 물에 의한 힘이 이를 **1.9배**로 증가시켰다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

각 지층은 자신의 K 값을 사용한다

이론

뒤채움이 여러 층으로 이루어진 경우 **연직 유효응력 σ'_o는 연속이다**(층 경계에서 불연속이 생기지 않는다). 그러나 수평응력 $\sigma'_a = K_i\sigma'_o$는 각 층에서 해당 층의 K_i 값을 사용하므로 **φ'가 달라지는 경계에서 분포도가 불연속적으로 변한다**:

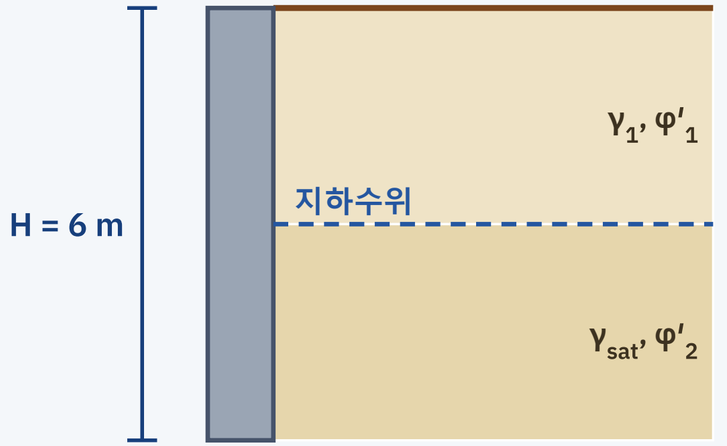
$$\sigma'_a = K_{a,i}\,\sigma'_o(z) \qquad \sigma'_o(z) = q + \sum \gamma_i h_i \;\; (\gamma' \text{ 침수 구간에서})$$

경계에서는 두 값을 읽는다. 상부 지층의 $K_{a,1}\sigma'_o$ 값과 하부 지층의 $K_{a,2}\sigma'_o$ 값이다. 하부 지층의 φ' 값이 크면 압력은 아래쪽으로 **떨어진다**.

지하수위는 지층 경계와 같이 취급한다: γ'가 적용되기 시작하고 u가 더해진다.

힘은 각 부분(삼각형 / 직사각형)의 면적을 합산하여, 작용 높이는 모멘트를 취하여 구한다.

층상 뒤채움과 물



문제

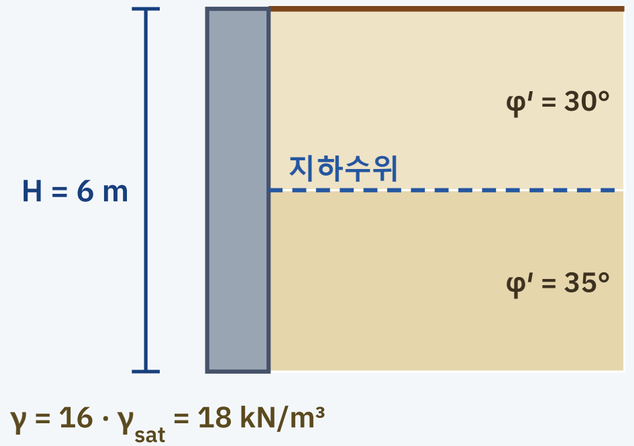
예제

조건

벽체	$H = 6$ m, 연직, 마찰 없음; 수평 지표면; 상재하중 없음
상부 지층 (0–3 m)	모래: $\gamma = 16$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$
하부 지층 (3–6 m)	모래: $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 35°$
지하수위	3 m 깊이에서 (지층 경계)

구하는 값

총 **힘**(지반 + 물)과 **작용 높이**. 모듈의 초기 예제는 이 벽체이다.



풀이 (1/2)

풀이

1 계수

$$K_{a,1} = \tfrac{1}{3} = \mathbf{0.3333} \qquad K_{a,2} = \tan^2 27.5^\circ = \mathbf{0.2710}$$

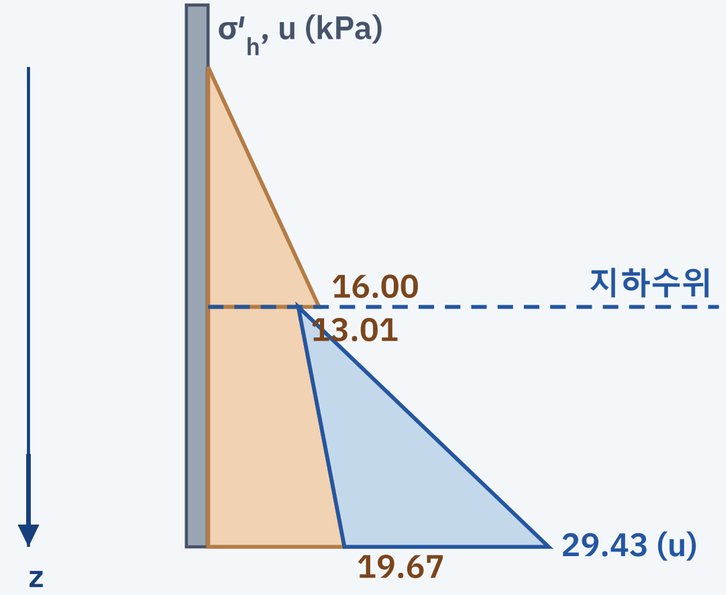
2 깊이 3 m (경계): $\sigma'_o = 16(3) = 48$ kPa

$$\sigma'_a = 0.3333(48) = \mathbf{16.00}\ \text{kPa (상단)}$$
$$\sigma'_a = 0.2710(48) = \mathbf{13.01}\ \text{kPa (하단)}$$

3 깊이 6 m (저면)에서

$$\sigma'_o = 48 + 3(18 - 9.81) = 72.57\ \text{kPa} \qquad u = 9.81(3) = \mathbf{29.43}$$
$$\sigma'_a = 0.2710(72.57) = \mathbf{19.67}\ \text{kPa}$$

분포도는 경계에서 16.00 → 13.01 kPa로 급변한다 (φ′ 변화); σ'_o는 연속이다.



풀이 (2/2)

풀이

4 힘: 상부 삼각형 · 하부 직사각형 · 하부 삼각형 · 물

$$P = \tfrac{1}{2}(3)(16.00) + 3(13.01) + \tfrac{1}{2}(3)(6.66) + \tfrac{1}{2}(3)(29.43)$$
$$= 24.00 + 39.02 + 9.99 + 44.14 = \mathbf{117.15}\ \text{kN/m}$$

5 작용 높이: 저면점에 대한 모멘트 (모멘트 팔 4; 1.5; 1; 1 m)

$$\bar{z} = \frac{24.00(4) + 39.02(1.5) + 9.99(1) + 44.14(1)}{117.15} = \mathbf{1.78}\ \text{m}$$

합력은 **117.15 kN/m**이며 저면 위 **1.78 m**에 작용한다. 지반이 73.01 kN/m, 물이 44.14 kN/m이다. 물은 약 38%로 합력의 가장 큰 부분이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

인장 영역과 인장균열

이론

c′–φ′ 지반에서 주동압력은 상단에서 **음수**이다(지반이 벽체를 끌어당기려 한다); 압력이 0이 되는 깊이:

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma\sqrt{K_a}} - \frac{q}{\gamma} \qquad \varphi = 0:\ z_0 = \frac{2c_u}{\gamma}$$

지반은 인장을 받을 수 없다: 시간이 지나면 깊이 z_0까지 **인장균열**이 발생한다. 힘은 선도의 양의 부분만으로 구한다:

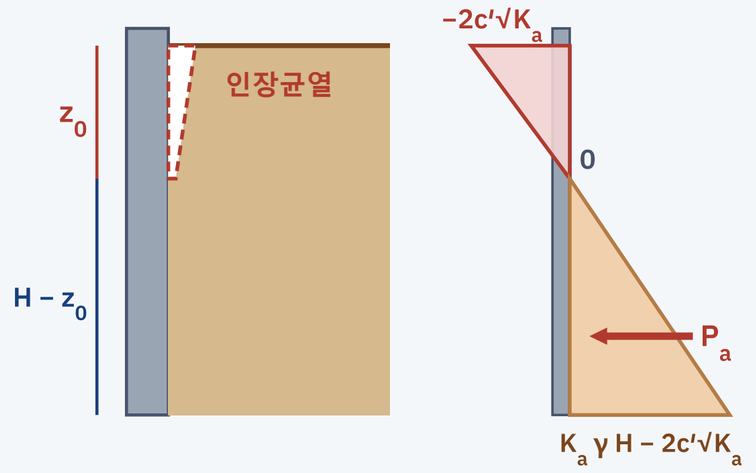
$$P_a = \tfrac{1}{2}\left[K_a(q+\gamma H) - 2c'\sqrt{K_a}\right](H - z_0)$$

균열이 생기기 전에는 선도 전체를 고려한다(더 작은 힘): $P_a = \tfrac{1}{2}K_a\gamma H^2 - 2c'\sqrt{K_a}\,H + K_a q H$.

> 설계에서는 인장균열을 고려한(더 큰) 힘이 지배하며, 균열에 물이 차면 여기에 정수압 힘 $\gamma_w z_0^2/2$도 더한다.

> 작용 높이는 양(+)의 삼각형 도심이다: $(H - z_0)/3$.

인장 영역



음의 압력: 상단에서 z_0 깊이까지는 벽체와 접촉이 없다.

문제

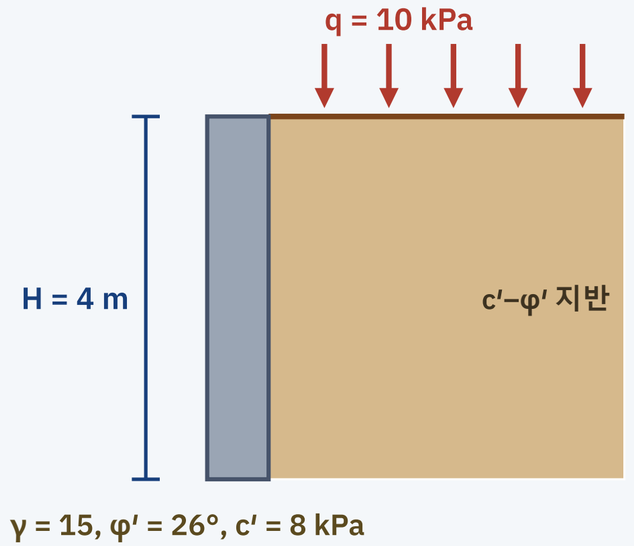
예제

구하는 값

인장 깊이 z_0, 균열을 고려한 주동력과 작용 높이; 균열이 없는 경우의 힘과의 비교.

조건

벽체	$H = 4$ m, 연직, 마찰 없음; 수평 지표면
지반	$\gamma = 15$ kN/m^3, $\varphi' = 26°$, $c' = 8$ kPa
상재하중	$q = 10$ kPa



풀이 (1/2)

풀이

1 계수: $K_a = \tan^2(45° - 13°)$

$$K_a = \tan^2 32^\circ = \mathbf{0.3905} \qquad \sqrt{K_a} = 0.6249$$

$$2c'\sqrt{K_a} = 2(8)(0.6249) = 10.00 \text{ kPa}$$

2 상단과 저면의 압력

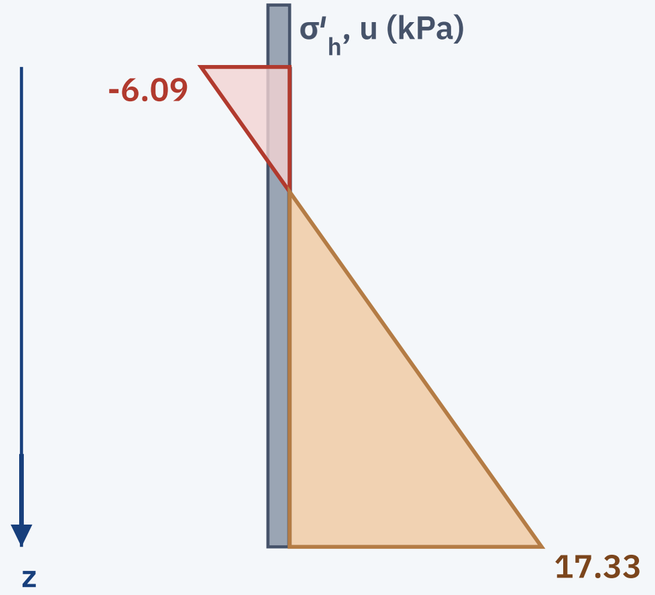
$$\sigma'_a(0) = 0.3905(10) - 10.00 = -\mathbf{6.09} \text{ kPa (인장)}$$

$$\sigma'_a(4) = 0.3905(10 + 15 \cdot 4) - 10.00 = \mathbf{17.33} \text{ kPa}$$

3 인장 깊이 (압력이 0인 위치)

$$z_0 = \frac{2(8)}{15(0.6249)} - \frac{10}{15}$$

$$= 1.707 - 0.667 = \mathbf{1.04} \text{ m}$$



풀이 (2/2)

풀이

4 균열이 있는 경우의 힘 (양의 삼각형만 해당)

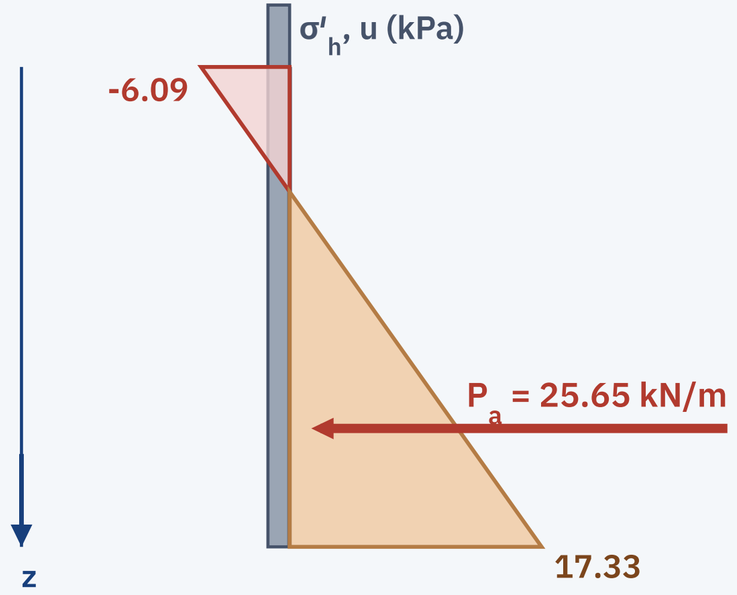
$$P_a = \tfrac{1}{2}(17.33)(4 - 1.04) = \mathbf{25.65}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{4 - 1.04}{3} = \mathbf{0.99}\ \text{m}$$

5 비교: 균열 없는 경우 (음의 영역 포함)

$$P_a = \tfrac{1}{2}(-6.09 + 17.33)(4) = 22.48\ \text{kN/m}$$

균열이 있는 경우의 힘은 **25.65 kN/m**로 균열이 없는 경우의 힘보다 14% 크며, 안전 측은 균열이 있는 값이다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

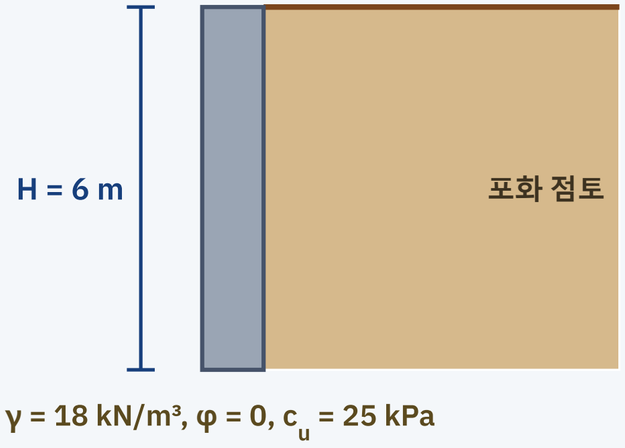
예제

구하는 값

z_0, 인장균열이 있는 경우와 없는 경우의 주동력; 수동력; 옹벽 없이 수직으로 절취할 수 있는 높이 H_c.

조건

벽체	$H = 6$ m, 연직; 수평 지표면; 상재하중 없음
지반	포화 점토, 비배수: $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi = 0$, $c_u = 25$ kPa



풀이 (1/2)

풀이

1 φ = 0이면 $K_a = K_p = 1$: 인장 깊이와 저면 압력

$$\sigma_a = \gamma z - 2c_u = 18z - 50 \text{ kPa}$$

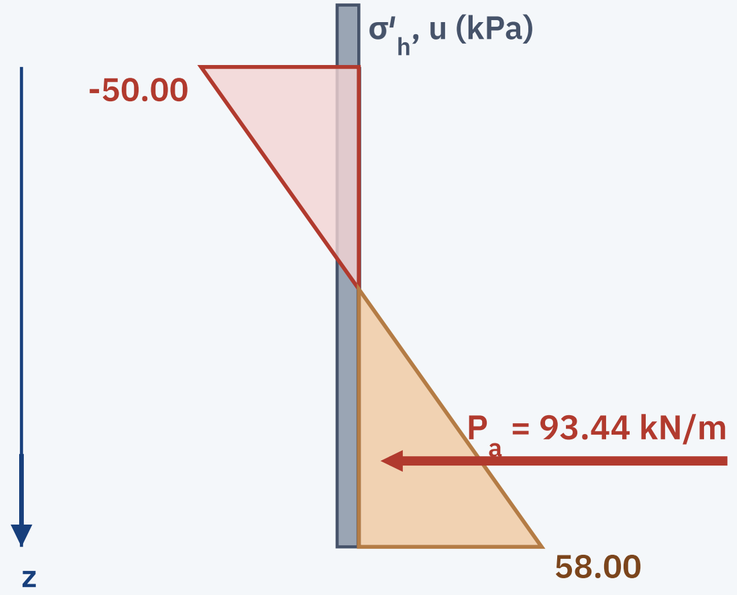
$$z_0 = \frac{2c_u}{\gamma} = \frac{50}{18} = \mathbf{2.78} \text{ m}$$

$$\sigma_a(6) = 108 - 50 = \mathbf{58} \text{ kPa}$$

2 균열 고려 주동력

$$P_a = \tfrac{1}{2}(58)(6 - 2.78) = \mathbf{93.44} \text{ kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{6 - 2.78}{3} = 1.07 \text{ m}$$



풀이 (2/2)

풀이

3 균열이 없는 경우의 주동력과 수동력

$$P_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 - 2c_u H = 324 - 300 = \mathbf{24}\ \text{kN/m}$$

$$P_p = \frac{1}{2}\gamma H^2 + 2c_u H = 324 + 300 = \mathbf{624}\ \text{kN/m}$$

4 벽체 없이 수직으로 절취할 수 있는 높이 (균열이 없는 경우 $P_a = 0$)

$$\frac{1}{2}\gamma H_c^2 - 2c_u H_c = 0 \;\Rightarrow\; H_c = \frac{4c_u}{\gamma} = \frac{4(25)}{18} = \mathbf{5.56}\ \text{m}$$

인장균열을 고려한 합력(93.44 kN/m)은 균열을 고려하지 않은 합력(24 kN/m)의 **3.9배**이다: 점성토 지반에서는 균열 가정이 결과를 좌우한다. H = 6 m가 H_c = 5.56 m보다 크므로 균열이 없는 경우의 합력도 양의 값이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

점착력에 의한 수동저항 증가

이론

수동 상태에서는 점착력이 **모든 깊이에서** 저항을 더하며, 인장 영역과 균열이 없다. 상단의 압력은 0이 아니다:

$$\sigma_p'(z) = K_p\,(q + \gamma z) + 2c'\sqrt{K_p}$$

$$P_p = \tfrac{1}{2}K_p\gamma H^2 + K_p q H + 2c'\sqrt{K_p}\,H \qquad \varphi = 0:\ P_p = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 + 2c_u H$$

압력 분포도는 **사다리꼴**이다: 점착력과 상재하중은 직사각형을, γz는 삼각형을 더한다.

작용 높이는 모멘트를 취하여 구한다 (점착력 기여분은 H/2 위치).

수동저항은 벽체가 충분히 이동하는 것에 좌우되며, 설계에서는 전체 값을 사용하지 않고 계수로 감소시킨다.

주동 – 수동 비교

	주동	수동
계수	$K_a < 1$	$K_p > 1$
점착력	압력을 **감소**시킴 ($-2c'\sqrt{K_a}$)	저항을 **증가**시킴 ($+2c'\sqrt{K_p}$)
인장 영역	존재 (z_0)	없음
활동면	$45° + \varphi'/2$	$45° - \varphi'/2$
필요 변위	작은	큰

문제

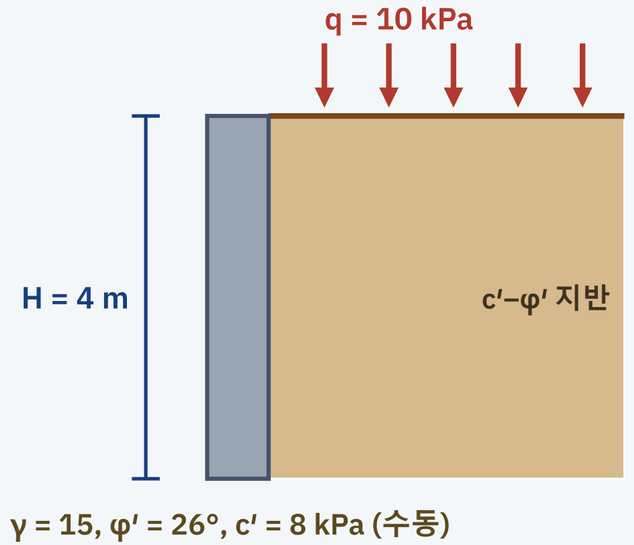
예제

구하는 값

수동토압 합력 P_p와 작용 높이.

조건

벽체와 지반	**예제 6의 벽체와 지반:** $H = 4$ **m,** $\gamma = 15$ kN/m^3, $\varphi' = 26°$, $c' = 8$ **kPa**
상재하중	$q = 10$ **kPa (수동 측)**



풀이

풀이

1 계수: $K_p = \tan^2(45° + 13°)$

$$K_p = \tan^2 58° = \mathbf{2.561} \qquad 2c'\sqrt{K_p} = 2(8)(1.600) = 25.61 \text{ kPa}$$

2 상단과 저면의 압력

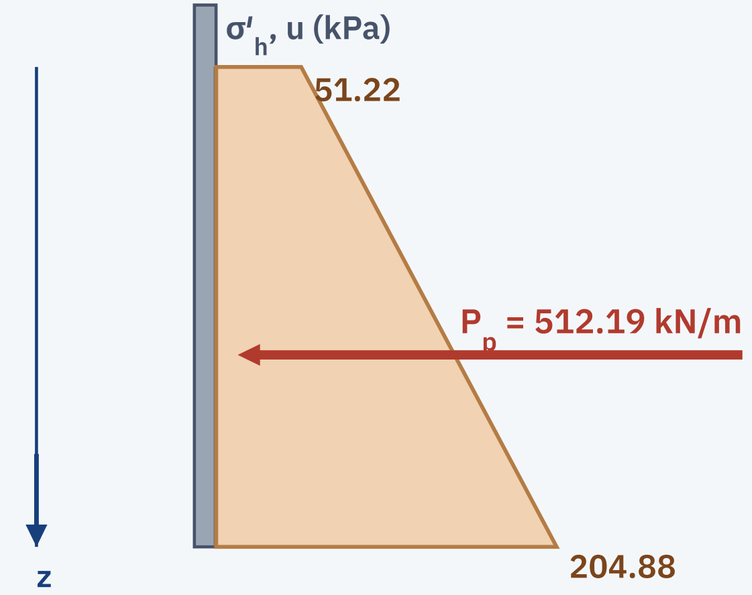
$$\sigma'_p(0) = 2.561(10) + 25.61 = \mathbf{51.22} \text{ kPa}$$

$$\sigma'_p(4) = 2.561(10 + 60) + 25.61 = \mathbf{204.88} \text{ kPa}$$

3 사다리꼴의 면적과 도심

$$P_p = \tfrac{1}{2}(51.22 + 204.88)(4) = \mathbf{512.2} \text{ kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{51.22(4)(2) + \tfrac{1}{2}(153.66)(4)(\tfrac{4}{3})}{512.2} = \mathbf{1.60} \text{ m}$$



수동저항 **512.2 kN/m**, 저면에서 1.60 m 위; 같은 벽체의 균열을 고려한 주동력의 약 **20배**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

주동 및 수동 상태는 얼마만큼의 변위에서 발생하는가?

이론

Rankine 상태에 도달하려면 벽체가 지반에서 멀어지거나(주동) 지반 쪽으로 이동해야(수동) 한다. **수동에 필요한 이동량은 주동에 필요한 이동량보다 훨씬 크며**, 높이 H에 대한 비율은 다음과 같다:

지반	주동 $\Delta L_a/H$	수동 $\Delta L_p/H$	H = 6 m에 대한 주동	H = 6 m에 대한 수동
느슨한 모래	0.001–0.002	0.01	6–12 mm	60 mm
조밀한 모래	0.0005–0.001	0.005	3–6 mm	30 mm
연약 점토	0.02	0.04	120 mm	240 mm
견고한 점토	0.01	0.02	60 mm	120 mm

변위가 이 값에 도달하지 않으면 토압은 K_a보다 크고 K_p보다 작은 값에 머문다; 벽체가 완전히 구속되어 있으면 정지토압(K_0)이 발생한다.

저면을 중심으로 회전하는 벽체의 경우, 이 비율은 상단 변위에 적용된다.

Rankine 해의 적용 범위

이론

벽체: 연직이며 매끄럽다($\delta' = 0$); 압력은 수평이며 벽체에 수직이다. 실제로는 벽면마찰이 주동력을 감소시키고 수동력을 증가시키며, Rankine 이론은 주동 측에서는 다소 안전 측이고 수동 측에서는 보수적(안전) 측이다.

뒤채움재: 지표면은 수평이고 각 지층은 균질하며, 활동면은 평면이다. 경사진 뒤채움재와 경사진 벽체는 Rankine(경사 뒤채움) 모듈을 참조한다.

응력: 유효응력이 기본이며, 수압은 별도로 더한다. 점토에는 비배수($\varphi = 0$) 해를 전응력으로도 사용할 수 있다.

상재하중: 등분포하중이며, 띠하중, 집중하중, 선하중 모듈은 별도로 다룬다.

지진: Rankine은 정적 해이며, 지진 시에는 Mononobe–Okabe 모듈과 지진 시 수동토압 모듈을 사용한다.

요약

핵심 정리

상태: 주동(벽체가 멀어짐) $\sigma'_a = K_a\sigma'_o - 2c'\sqrt{K_a}$; 수동(벽체가 밀림) $\sigma'_p = K_p\sigma'_o + 2c'\sqrt{K_p}$

계수: $K_a = \tan^2(45° - \varphi'/2)$, $K_p = 1/K_a$; $K_a < K_0 = 1 - \sin\varphi' < K_p$

점착력이 없는 뒤채움: $P = \frac{1}{2}K\gamma H^2$, 저면에서 H/3 지점; 힘은 H^2에 따라 커진다

상재하중은 직사각형 분포(K q H, 팔 길이 H/2)를 더하고, **물**은 φ'와 무관한 전체 수압 $u = \gamma_w(z - H_1)$을 더하여 합력을 몇 배로 증가시킨다

층상 지반에서 σ'_o는 연속이고, σ'_a는 φ' 값이 변하는 경계에서 급변하며, 힘은 구간으로 나누어, $\bar{z}$는 모멘트를 취하여 구한다

c'–φ' 지반에서 $z_0 = 2c'/(\gamma\sqrt{K_a}) - q/\gamma$; 인장균열이 있는 경우 힘은 양의 삼각형 부분뿐이며, 균열이 없을 때의 힘보다 크다

수동은 점착력에 따라 증가하며 인장 영역이 없다; 그러나 벽체는 주동 상태에 비해 **훨씬 더 많이** 이동해야 한다

참고문헌

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

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

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈도 같은 값을 준다. 모듈은 예제 5의 두 지층 벽체를 초기 모델로 하여 시작된다.

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

실제 옹벽의 지층, 상재하중, 지하수위를 GeoTerva에 입력하면 모듈이 압력 분포도, 힘, 작용 높이를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.