지반공학 강의 자료 · 측방토압

지진 시 수동토압

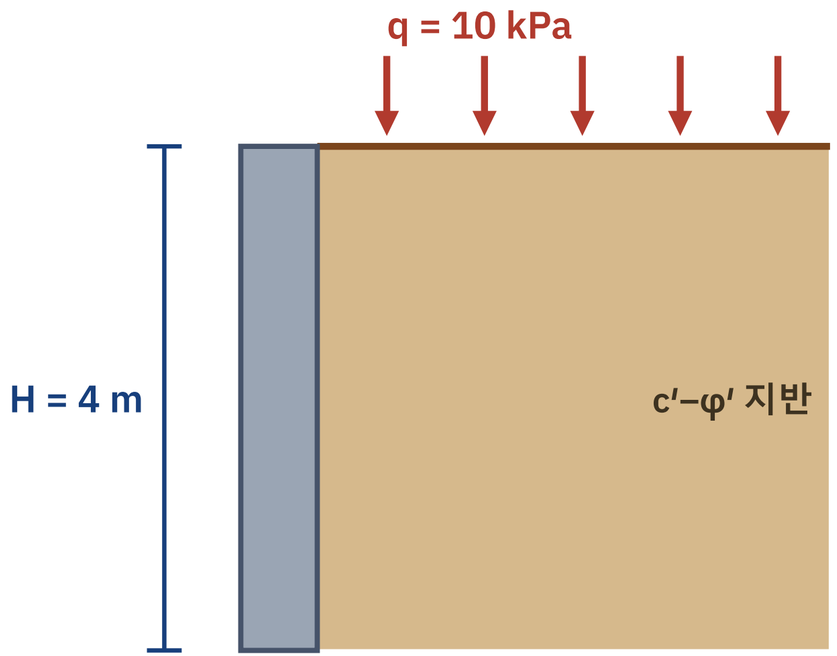
강의: 지진 시 벽체 전면 지반의 수동저항에 대한 의사정적 계산(Subba Rao 및 Choudhury 2005): 계수 $K_{p\gamma(e)}$, $K_{pq(e)}$, $K_{pc'(e)}$, k_v, 지층, 지하수와 상재하중; 각 주제별 계산 예제.

$$P_{pe} = [\tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}]/\cos\delta'$$

Subba Rao – Choudhury

k_h와 k_v

지층 · 지하수 · 상재하중



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 지진 시 수동저항이 **왜 감소하는지**: 쐐기의 관성력이 흙이 벽체로부터 멀어지는 것을 돕는다
- 수동 합력을 **세 계수**로 계산하기: $P_{pe} = [\frac{1}{2}\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}]/\cos\delta'$
- 계수의 **도표**($\varphi' = 10–40°$, $\delta'/\varphi' = 0.5$ 및 1, $k_v = 0$ 및 k_h)와 중간값을 읽는 방법
- 힘의 위치 (H/3 및 H/2) 및 방향 (법선으로부터 δ') 구하기
- k_v, **물**(구속 또는 자유), 지층, 상재하중이 미치는 영향
- 도표가 끝나는 **k_h 한계**와 모듈이 중단되는 이유

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); 연직 벽체, 수평 지표면; k_v는 상향을 양의 값으로 취하며, $0 \le k_v \le k_h$이다.

Subba Rao와 Choudhury (2005)

이론

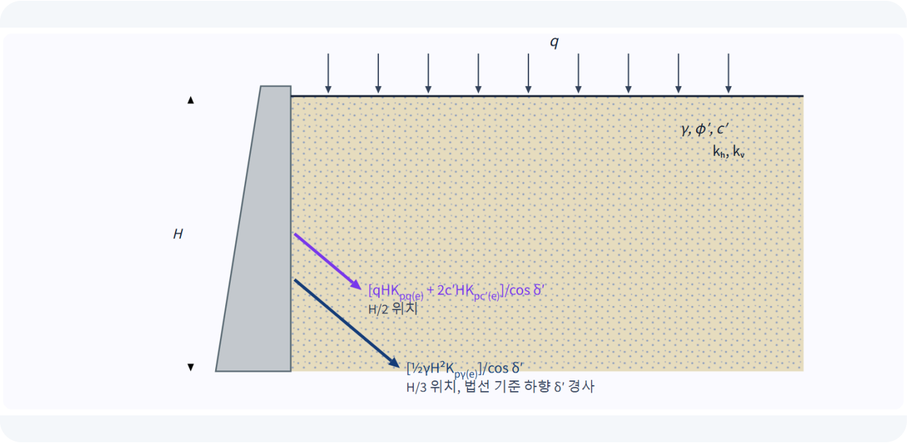
지진 시 벽체 앞쪽 쐐기의 관성력은 흙을 벽체에서 멀어지게 하는 데 작용하므로 **수동저항이 감소한다**. Subba Rao와 Choudhury는 수동 압력의 곡면(나선 + 직선부) 한계평형을 $k_h W$와 $k_v W$ 힘으로 확장하였다(연직 벽체, 수평 c′–φ′ 뒤채움, 상재하중 q, 벽면마찰 δ′, 부착력 c'_a):

$$P_{pe} = \left[\tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}\right]\frac{1}{\cos\delta'}$$

세 계수는 벽체에 **수직한** 성분이므로 cos δ′로 나눈다. γ 부분은 H/3 위치에, q와 c′ 부분은 H/2 위치에 작용한다:

$$\bar{z} = \frac{P_\gamma\,(H/3) + (P_q + P_{c'})\,(H/2)}{P_{pe}}$$

> 힘은 벽면의 법선으로부터 δ′ **아래쪽**으로 기울어져 있다.



도표와 중간값 읽기

이론

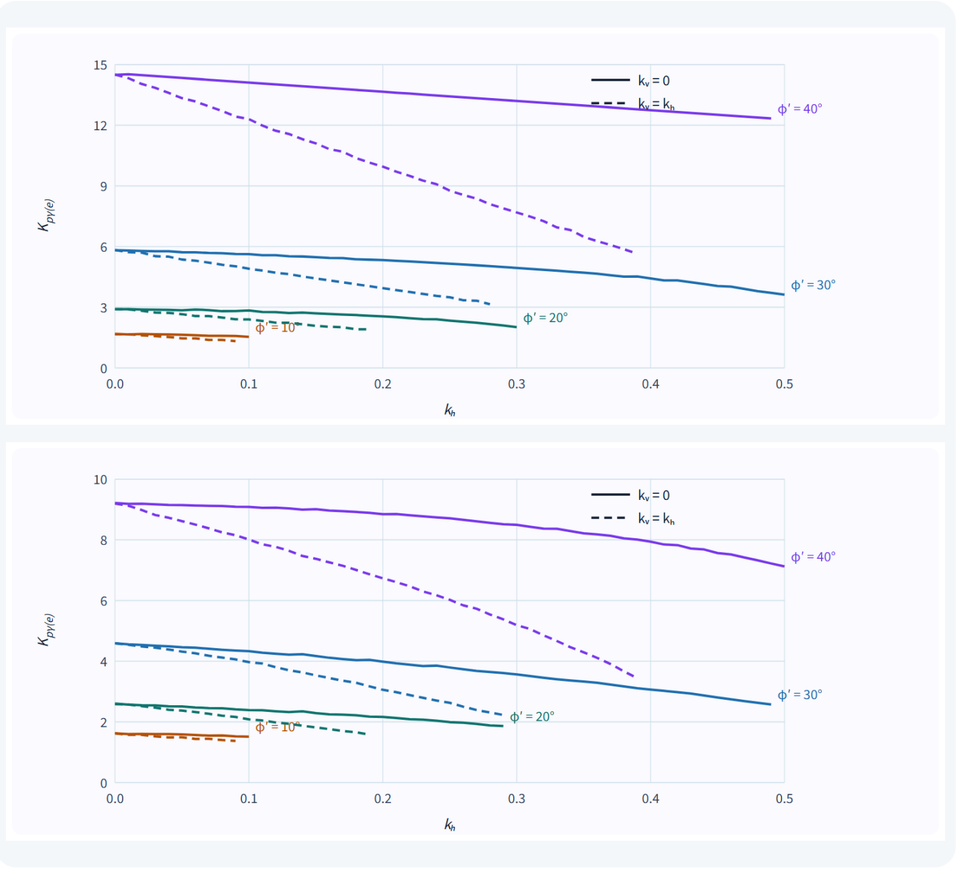
$K_{p\gamma(e)}$와 $K_{pq(e)}$는 $\varphi' = 10°, 20°, 30°, 40°$; $\delta'/\varphi' = 0.5$ 및 1; $k_v = 0$ 및 $k_v = k_h$에 대해 **설계 도표 곡선**으로 제시된다(모듈은 곡선을 $\Delta k_h = 0.01$ 간격의 표로 보유한다). 중간값은 k_h와 δ'/φ'에서는 선형, φ'에서는 **로그 선형**으로 보간하며, 범위 밖으로의 외삽은 하지 않는다(φ' 10–40°, δ' $\varphi'/2$ – φ').

k_h가 커질수록 계수는 감소하며, **$k_v = k_h$인 경우에는 훨씬 더 빠르게** 감소한다. 각 곡선은 수동 저항이 소진되는 k_h에서 끝나며, 모듈은 그 지점에서 멈춘다.

$k_h = 0$일 때 도표의 값은 정적 수동토압계수이다: $\varphi' = \delta' = 40°$에서 $K_{p\gamma(e)} = 14.49$이며, 대수나선 모듈에서 $K_p \cos \delta' = 14.45$이다.

$0 \le k_v \le k_h$ (상향, 수동에 불리): $k_v = 0$ 곡선과 $k_v = k_h$ 곡선 사이를 선형 보간하며, Coulomb 계수와 비교하여 검증한 결과 오차는 < 0.4%(낮은 쪽)이다.

표의 $K_{pc'(e)}$: $\varphi' = 40°$, $\delta'/\varphi' = 1$일 때 $c'_a = 0$에서 5.95, 부착을 고려한 경우 5.97.



문제

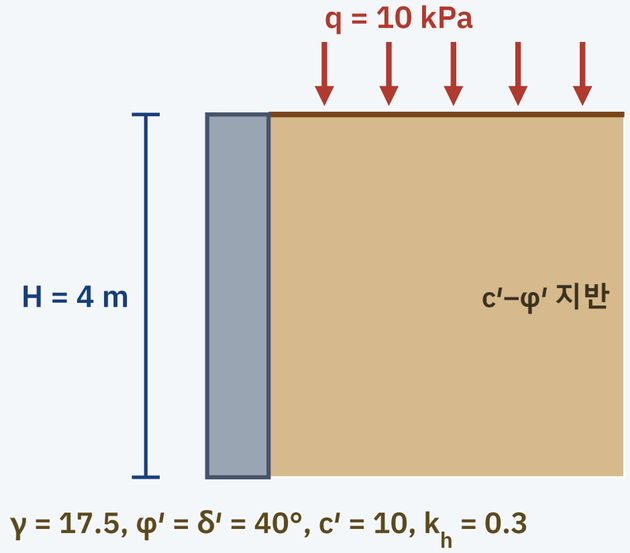
예제

조건

벽체	$H = 4$ m, 연직; 수평 지표면; $q = 10$ kPa
지반	$\gamma = 17.5$ kN/m^3, $\varphi' = 40°$, $c' = 10$ kPa; $\delta' = 40°$, $c'_a = 0$
지진	$k_h = 0.3$, $k_v = 0$

구하는 값

도표 계수, P_{pe}, 작용 방향 및 $\bar{z}$. 모듈의 초기 예제는 이 벽체이다.



풀이 (1/2)

풀이

1 계수 (δ′/φ′ = 1, k_h = 0.3, k_v = 0; 모듈은 도표에서 읽는다)

$$K_{p\gamma(e)} = \mathbf{13.20} \qquad K_{pq(e)} = \mathbf{11.00} \qquad K_{pc'(e)} = \mathbf{5.95}$$

$$(\text{정적}, k_h = 0: \; K_{p\gamma} = 14.49, \; K_{pq} = 11.11)$$

풀이 (2/2)

풀이

2 법선 성분과 합

$$P_\gamma = \tfrac{1}{2}(17.5)(4)^2(13.20) = 1{,}848 \text{ kN/m}$$

$$P_q = 10(4)(11.00) = 440 \qquad P_{c'} = 2(10)(4)(5.95) = 476$$

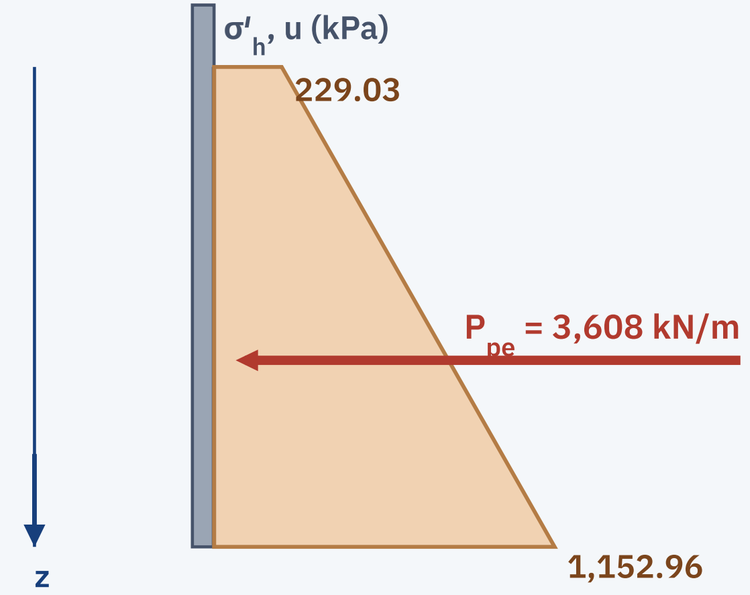
$$P_{pe} = \frac{1{,}848 + 440 + 476}{\cos 40^\circ} = \frac{2{,}764}{0.766} = \mathbf{3{,}608} \text{ kN/m}$$

3 위치와 구성 요소

$$\bar{z} = \frac{2{,}412.2(4/3) + 1{,}195.9(2)}{3{,}608} = \mathbf{1.554} \text{ m}$$

$$P_h = P_{pe}\cos 40^\circ = 2{,}764 \qquad P_v = P_{pe}\sin 40^\circ = 2{,}319 \text{ kN/m}$$

$P_{pe} \approx$ **3,608 kN/m**이며 법선에서 40° 아래로 기울어져 있고, 저면에서 **1.554 m** 위에 작용한다. 지반 중량의 기여분은 2,412, q와 c′의 기여분은 1,196 kN/m이다 (법선 성분으로 나누면).



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

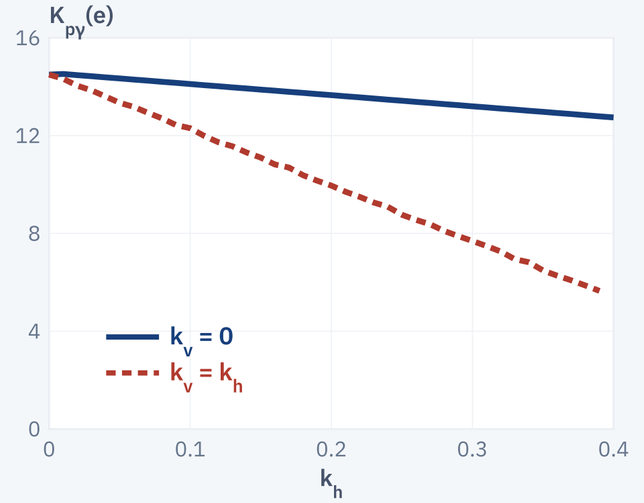
예제

조건

지반	$\varphi' = \delta' = 40^\circ$ ($\delta'/\varphi' = 1$); 건조 모래, 비점성
변수	$k_h = 0,\ 0.1,\ 0.2,\ 0.3,\ 0.35$ 및 $k_v = 0$ 또는 $k_v = k_h$

구하는 값

$K_{p\gamma(e)}$ 값; k_h = 0.3에서의 감소율.

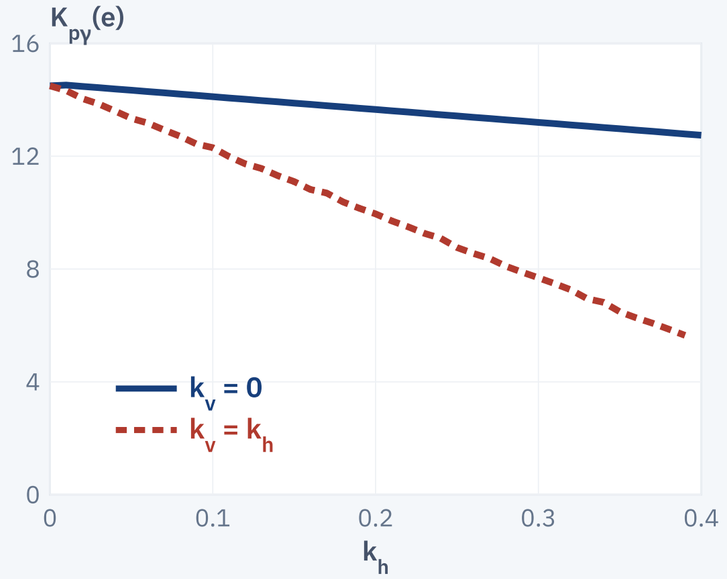


풀이

풀이

1 도표 판독값 ($\delta'/\varphi' = 1$)

k_h	$K_{p\gamma(e)}$ ($k_v = 0$)	$K_{p\gamma(e)}$ ($k_v = k_h$)
0.00	14.49	14.49
0.10	14.11	12.30
0.20	13.65	9.95
0.30	13.20	7.69
0.35	12.97	6.48



k_h가 0에서 0.3으로 증가하면 $K_{p\gamma(e)}$는 14.49 → 13.20 (9% 감소, $k_v = 0$)이며, $k_v = k_h$이면 7.69로 떨어진다(47%). 정적 경우의 14.49는 대수나선 모듈의 $K_p \cos\delta' = 14.45$와 일치한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

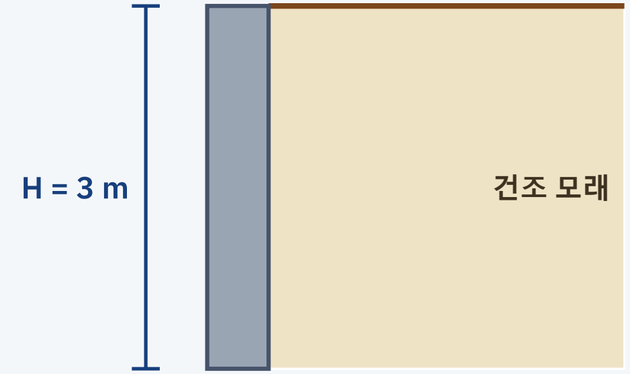
예제

조건

벽체	$H = 3$ m, 연직; 수평 지표면; 상재하중 없음
지반	**건조 모래:** $\gamma = 16$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$; $\delta' = 15°$ $(\delta'/\varphi' = 0.5)$
지진	$k_h = 0.2$, $k_v = 0$

구하는 값

P_{pe}, $\bar{z}$, 성분; 정적 수동력과의 비교.



γ = 16 kN/m³, φ′ = 30°, δ′ = 15°, k_h = 0.2

풀이

풀이

1 계수 (δ′/φ′ = 0.5)

$$k_h = 0: \; K_{p\gamma} = 4.592 \qquad k_h = 0.2: \; K_{p\gamma(e)} = \mathbf{3.987}$$

2 힘 (c′ = q = 0)

$$P_{pe} = \frac{\frac{1}{2}(16)(3)^2(3.987)}{\cos 15^\circ} = \frac{287.1}{0.9659} = \mathbf{297.2}\ \text{kN/m}$$

정적: $P_p = 342.3$ kN/m ($K_p = 4.592$)

3 위치와 구성 요소

$$\bar{z} = \frac{H}{3} = \mathbf{1.00}\ \text{m} \qquad P_h = P_{pe}\cos 15^\circ = 287.1 \qquad P_v = P_{pe}\sin 15^\circ = 76.9\ \text{kN/m}$$

P_{pe} = **297.2 kN/m**; 정적 값은 342.3 kN/m였다: k_h = 0.2는 저항을 13% **감소시켰다**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

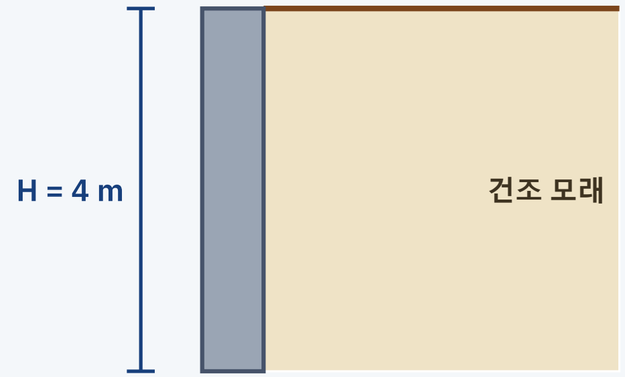
예제

구하는 값

각 k_v에 대한 $K_{p\gamma(e)}$와 P_{pe}; 중간값은 어떻게 구하는가?

조건

벽체와 지반	$H = 4$ m; **건조 모래:** $\gamma = 17.5$ kN/m^3, $\varphi' = \delta' = 40^\circ$
지진	$k_h = 0.3$; $k_v = 0,\ 0.15\ (= 0.5k_h),\ 0.30\ (= k_h)$



풀이

풀이

1 보간: $K(k_v) = K(0) + [K(k_h) - K(0)]\cdot k_v/k_h$; $P_{pe} = \frac{1}{2}(17.5)(16)K_{p\gamma(e)}/\cos 40° = 182.7\ K_{p\gamma(e)}$

k_v	k_v/k_h	$K_{p\gamma(e)}$	$K_{pq(e)}$	P_{pe} (kN/m)
0.00	0.0	13.20	11.00	2,412
0.15	0.5	10.44	9.29	1,909
0.30	1.0	7.69	7.58	1,405

$k_v = 0.5k_h$에서 힘은 2,412 → 1,909 kN/m(21%)이고, $k_v = k_h$에서는 1,405 kN/m(42%)이다. 상향 수직가속도가 중량을 감소시키므로 **수동 측에 불리하다**; $k_v = 0.5k_h$가 일반적인 선택이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

모듈의 지층 확장

이론

도표는 단일 지반, 연직 벽체, 수평 지표면을 전제로 하며, 기하 조건은 그대로 유지된다. 모듈은 지반을 **수평 경계를 갖는 층**으로 구분한다. 각 층은 자신의 계수를 취하며, 위 층들의 무게(및 q)는 상재하중처럼 $K_{pq(e)}$로, 자체 무게는 $K_{p\gamma(e)}$로, 점착력은 $K_{pc'(e)}$로 작용한다:

$$\sigma_n = K_{pq(e)}\sigma'_{v,top} + K_{p\gamma(e)}\left(\sigma'_v - \sigma'_{v,top}\right) + 2c'K_{pc'(e)} \qquad \text{전면을 따라: } \sigma_n \tan\delta'$$

수위 아래에서는 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$이며 u는 벽면에 수직이다. 지진 시 간극수는 흙과 함께 움직이거나(**구속**) 그렇지 않으며(**자유**), 도표는 더 큰 k_h 값에서 읽는다:

$$k_{h,w} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}k_h \text{ (구속)} \qquad k_{h,w} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{sat} - \gamma_w}k_h \text{ (자유)}$$

자유수에서는 Westergaard 동수압 $(7/8)k_h\gamma_w\sqrt{(d_w z')}$을 **저항에서 뺀다**(수동에 불리한 위상). 수중의 k_v는 $k_v/k_{h,w}$ 비를 이용하여 정한다.

이 다층 형식은 모듈의 공학적 확장이며, 도표 곡선이 끝나는 곳에서 모듈은 중단된다.

구성

지층: K_{pq}(상부 하중) + $K_{p\gamma}$(자중) + $K_{pc'}$(점착력); 물: γ' 및 u; 지진: $k_{h,w}$.

문제

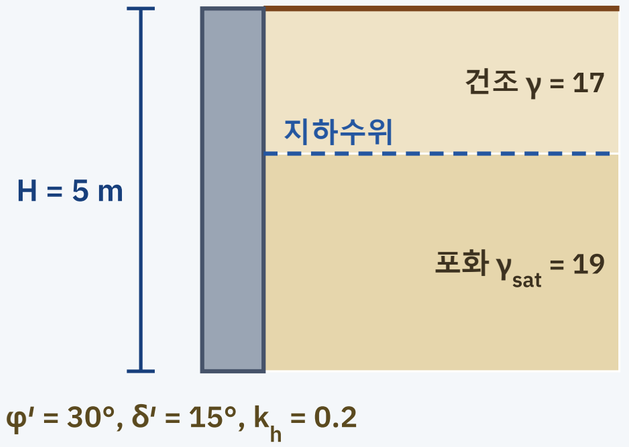
예제

구하는 값

구속수와 자유수의 두 경우에 대한 P_{pe}와 $\bar{z}$; 건조 상태 및 정적 값과의 비교.

조건

벽체	$H = 5$ m, 연직; 수평 지표면; 상재하중 없음
지반	$\gamma = 17$ kN/m^3 (건조), $\gamma_{sat} = 19$, $\gamma_d = 17$ kN/m^3; $\varphi' = 30^\circ$, $\delta' = 15^\circ$
지진과 물	$k_h = 0.2$, $k_v = 0$; 지하수위 2 m (d_w = 3 m)



풀이 (1/2)

풀이

1 수면 아래에서 읽은 k_h

$$\text{구속: } k_{h,w} = \frac{19}{19 - 9.81}(0.2) = \mathbf{0.413} \qquad \text{자유: } k_{h,w} = \frac{17}{19 - 9.81}(0.2) = \mathbf{0.370}$$

풀이 (2/2)

풀이

2 계수와 힘 ($\sigma_n = K_{p\gamma(e)}\sigma'_v$, 지층 상단에 하중 없음; 수면 아래 $u = 9.81(z - 2)$; $P_{wd} = (7/12)(0.2)(9.81)(3)^2 = 10.30$ kN/m은 저항에서 공제)

	k_h 판독값	$K_{p\gamma(e)}$	지반 N_s	물	동수압	P (kN/m)	$\bar{z}$ (m)
수면 위 (0–2 m)	0.200	3.987					
구속 수중	0.413	3.008	566.8	44.1	–	629.5	1.84
비구속 수중	0.370	3.230	598.6	44.1	10.3	652.5	1.83

구속수에서는 P = **629.5 kN/m**, 자유수에서는 **652.5 kN/m**이며, 지하수가 없는 지반에서는 877.1, 정적($k_h = 0$)이고 물이 있을 때는 885.9 kN/m이다. 수중에서 읽은 $k_{h,w}$가 크므로 $K_{p\gamma(e)}$는 3.99 → 3.01로 낮아지고 저항은 **감소한다**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

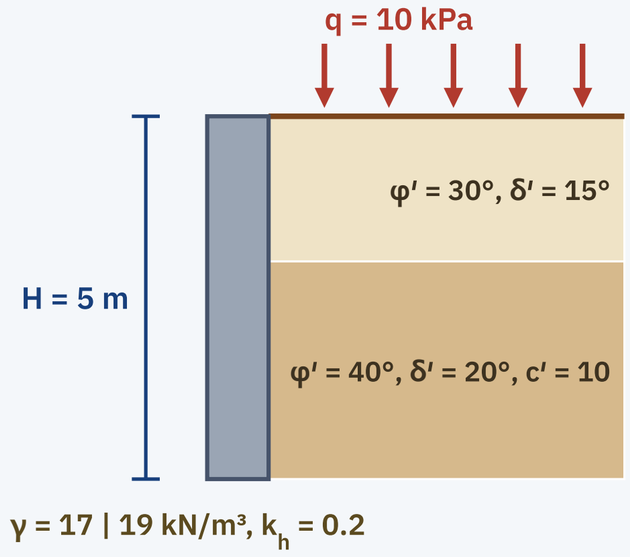
예제

조건

벽체	$H = 5$ m, 수직; 수평 지표면; $q = 10$ kPa; 지하수 없음
지층 1 (0–2 m)	$\gamma = 17$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$, $\delta' = 15°$, $c' = 0$
지층 2 (2–5 m)	$\gamma = 19$ kN/m^3, $\varphi' = 40°$, $\delta' = 20°$, $c' = 10$ kPa
지진	$k_h = 0.2$, $k_v = 0$

구하는 값

경계에서의 압력 급변, 지층별 힘, **P**, β 및 **z̄**.



풀이 (1/2)

풀이

1 계수 ($k_h = 0.2$)

$$\text{지층 1: } K_{p\gamma} = 3.987,\ K_{pq} = 4.096$$

$$\text{지층 2: } K_{p\gamma} = 8.844,\ K_{pq} = 8.449,\ K_{pc'} = 4.33$$

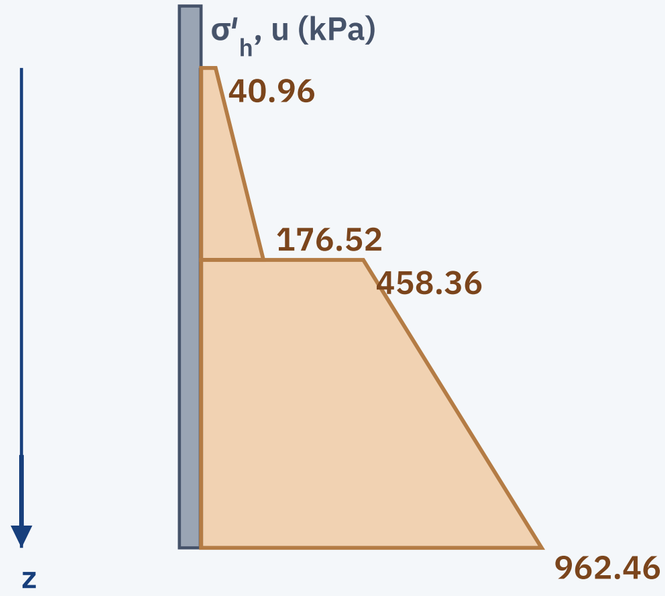
2 수직응력 σ_n ($\sigma'_v = 10; 44; 101$ kPa: 상단, 경계, 저면)

$$\sigma_n(0) = K_{pq} q = 4.096(10) = 40.96$$

$$\sigma_n(2^-) = 40.96 + 3.987(34) = 176.52$$

$$\sigma_n(2^+) = 8.449(44) + 2(10)(4.33) = \mathbf{458.36}$$

$$\sigma_n(5) = 458.36 + 8.844(57) = \mathbf{962.46}\ \text{kPa}$$



풀이 (2/2)

풀이

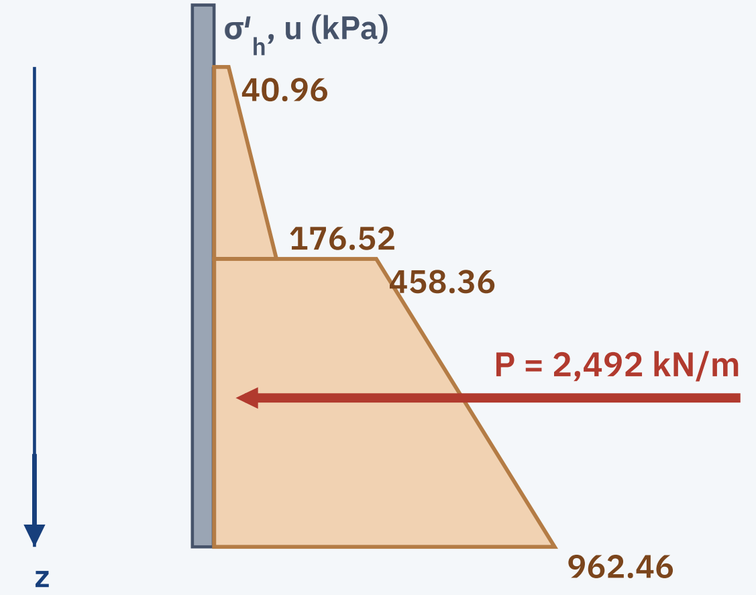
3 벽면에 수직인 성분과 벽면을 따른 성분 (지층의 δ' 사용; 모멘트 팔은 저면 기준)

$$N_1 = 217.5 \text{ (팔 } 3.79 \text{ m)}$$
$$N_2 = 2{,}131.2 \text{ (팔 } 1.32 \text{ m)}$$
$$N = 2{,}348.7 \qquad T = 834.0 \text{ kN/m}$$

4 합력과 위치

$$P = \sqrt{N^2 + T^2} = \mathbf{2{,}492.4} \text{ kN/m} \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{T}{N} = 19.55^\circ$$

$$\bar{z} = \frac{217.5(3.79) + 2{,}131.2(1.32)}{2{,}348.7} = \mathbf{1.55} \text{ m}$$



P = **2,492 kN/m**, β = 19.5° (δ'는 15°와 20° 사이), 저면으로부터 1.55 m 위. 경계에서 σ_n이 176.5에서 458.4 kPa로 **급변한다**(φ', δ', c'가 변한다).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

모듈은 어디에 위치하는가?

이론

도표의 각 곡선은 수동저항이 소진되는 k_h 값에서 끝나며, 모듈은 그 이후로는 계산하지 않는다 (외삽을 하지 않음). 이 한계는 φ', δ'/φ' 및 k_v에 따라 달라진다:

φ'	$k_v = 0$, $\delta'/\varphi' = 0.5$	$k_v = 0$, $\delta'/\varphi' = 1$	$k_v = k_h$, $\delta'/\varphi' = 0.5$	$k_v = k_h$, $\delta'/\varphi' = 1$
10°	0.108	0.098	0.085	0.079
20°	0.292	0.279	0.185	0.198
30°	0.494	0.463	0.288	0.282
40°	0.500	0.463	0.393	0.397

$k_v = k_h$ 곡선은 훨씬 일찍 끝난다 ($\varphi' = 30°$, $\delta' = \varphi'/2$: 0.29).

수중에서 측정한 $k_{h,w} = k_h \gamma_{sat}/\gamma' \approx 2k_h$는 이 한계를 쉽게 초과한다.

문제

예제

조건

지반	$\varphi' = 30^\circ$, $\delta' = 15^\circ$; $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3; **지하수위가 벽체 상단에 위치 (z_w = 0)**
지진	$k_h = 0.3$, $k_v = 0$; **간극수 제한**

구하는 값

수중에서 읽을 $k_{h,w}$; 도표 한계; 모듈은 어떻게 처리하는가?

풀이

풀이

1 읽은 k_h 값과 도표 한계

$$k_{h,w} = \frac{19}{19 - 9.81}(0.3) = \mathbf{0.620}$$

$$k_{h,lim}(30^\circ,\ \delta'/\varphi' = 0.5,\ k_v = 0) = 0.494$$

$k_{h,w}$ = 0.620 > 0.494: 이 값에서는 도표가 존재하지 않으므로(수동저항이 소진되는 영역) **모듈은 계산을 중단한다**. 해결: 지하수위를 낮추거나 k_h를 줄인다; k_h = 0.2일 때 $k_{h,w}$ = 0.41로 한계 안에 있다(예제 5).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

풀이의 범위

이론

의사정적: 일정한 k_h, k_v; 시간 의존성과 영구 변위가 없다.

기하 조건: 연직 벽체, 수평 지표면; 도표는 $\varphi' = 10–40°$, $\delta'/\varphi' = 0.5–1$ 범위에 대한 것이며, k_v는 상향만 고려하고(수동의 경우 불리), $0 \le k_v \le k_h$이다.

점착력: $K_{pc'(e)}$ 표; 부착력은 0이거나 $c'_a/c' = \tan\delta'/\tan\varphi'$이다.

지층, 물, 상재하중은 모듈의 공학적 확장이다(문헌에 닫힌 형태의 해는 없다); 물은 구속수 또는 자유수이며, 자유수의 경우 Westergaard 저항에서 제외된다.

정적 수동토압은 대수나선 및 Coulomb 모듈, **지진 시 주동토압**은 Mononobe–Okabe 모듈을 이용한다.

요약

핵심 정리

$P_{pe} = [\frac{1}{2}\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}] / \cos\delta'$; γ 항은 H/3 위치에, q 항과 c′ 항은 H/2 위치에 작용하며, 벽면 법선에서 아래로 δ′만큼 기울어진다

계수는 도표(φ′ 10–40°, δ′/φ′ 0.5–1, $k_v = 0$ 및 k_h)에서 읽는다: k_h는 δ′/φ′에서 선형, φ′에서 로그선형이며, k_h가 증가할수록 계수는 감소한다

k_v(상향)는 수동토압에 불리하다: $k_v = k_h$일 때 $\varphi' = \delta' = 40°$, $k_h = 0.3$에서 $K_{p\gamma(e)}$는 13.2 → 7.7

지층에서 $\sigma_n = K_{pq}\sigma'_{v,top} + K_{p\gamma}(\sigma'_v - \sigma'_{v,top}) + 2c'K_{pc'}$; 경계에서 급변; 벽면을 따라 $\sigma_n \tan\delta'$

물: γ′와 u; 도표는 $k_{h,w} = k_h\gamma_{sat}/\gamma'$(구속된 경우) 또는 γ_d/γ'(자유로운 경우)로 읽으며, 자유로운 경우에는 동수압을 저항에서 뺀다

한계: 도표 곡선이 끝나면($k_{h,w}$가 크고 $k_v = k_h$일 때) 모듈이 멈춘다

참고문헌

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

Subba Rao, K.S. and Choudhury, D. (2005). Seismic passive earth pressures in soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 131(1), 131–135.

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. Transactions ASCE, 98, 418–433.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 코드에서 가져왔으며, 모듈도 같은 값을 준다. 모듈의 초기 예제는 예제 1의 벽체이다 ($H = 4$ m, $\varphi' = \delta' = 40°$, $k_h = 0.3$).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

벽체의 지층, 점착력, 상재하중, 지하수, 지진계수를 직접 GeoTerva에 입력한다. 모듈은 P_{pe}와 그 방향, 작용 높이를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com