GeoTerva

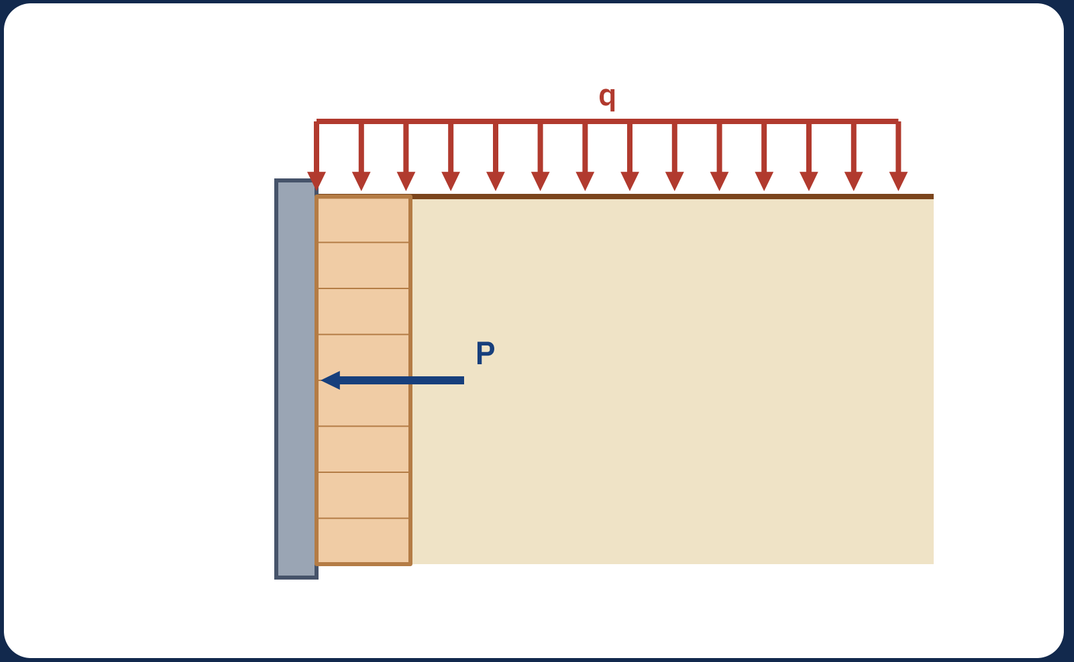
지반공학 강의 자료 · 상부하중

등분포 상재하중

강의: 벽체 배면의 지표 전체에 분포하는 등분포하중; 깊이에 따라 일정한 측방압력, 합력과 작용선, 계산 예제.

$\sigma_H = K \cdot q$ $K_0 \cdot K_a$ $P = K\,q\,H$ $z_R = H/2$

직사각형 분포도



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 등분포 하중 q가 벽체에 **측압**으로 반영되는 방식: $\sigma_H = K \cdot q$, 모든 깊이에서 동일
- 벽체의 거동에 따른 **계수 K**의 선택: 정지(K_0, Jaky), 주동(K_a, Rankine) 또는 입력값
- 직사각형 압력도의 **합력** $P = K\,q\,H$와 **작용선** $z_R = H/2$
- K_0 및 K_a의 φ'에 따른 변화; P의 q 및 H에 대한 선형 증가
- 상재하중이 토압도에 **더해지는 방식**과 그 비중

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 공식과 그 근거

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

예제 벽체: H = 6 m, q = 10 kPa, $\varphi' = 30°$. 힘은 벽체 단위 길이당 값이며(kN/m), 압력은 kPa이다.

벽체에 작용하는 등분포 하중

이론

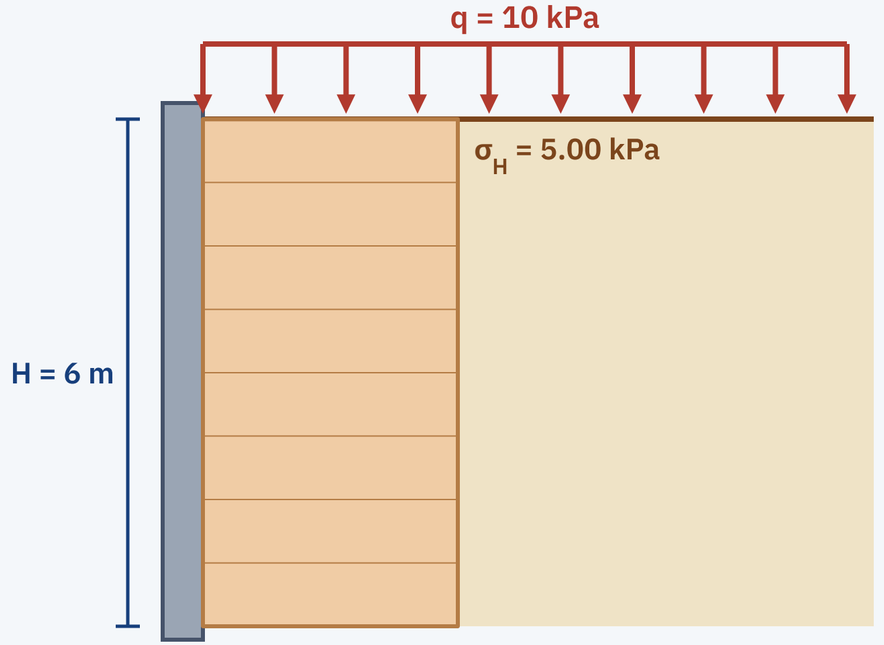
벽체 뒤 **지표면 전체**에 퍼져 작용하는 등분포 **q** 하중은 모든 깊이에서 수직응력을 q만큼 증가시킨다

벽체는 이 가운데 일부만 받으며, 그 크기는 측방토압계수 **K**로 결정된다

추가 압력은 벽체 상단에서 저면까지 **같다**: 압력 분포도는 직사각형이다

$$\sigma_H = K\,q$$

q — 배면 지반 표면의 등분포 상재하중
φ′ — 배면 지반의 유효 내부마찰각
K — 측방토압계수(K_0, K_a 또는 입력값)
σ_H — 추가되는 측방 압력, 깊이에 대해 일정



벽체의 거동이 K를 결정함

이론

움직일 수 없는(지지된) 벽체는 지반을 정지 상태로 유지한다: 정규압밀 지반에서 기본값은 **Jaky** 계수이다

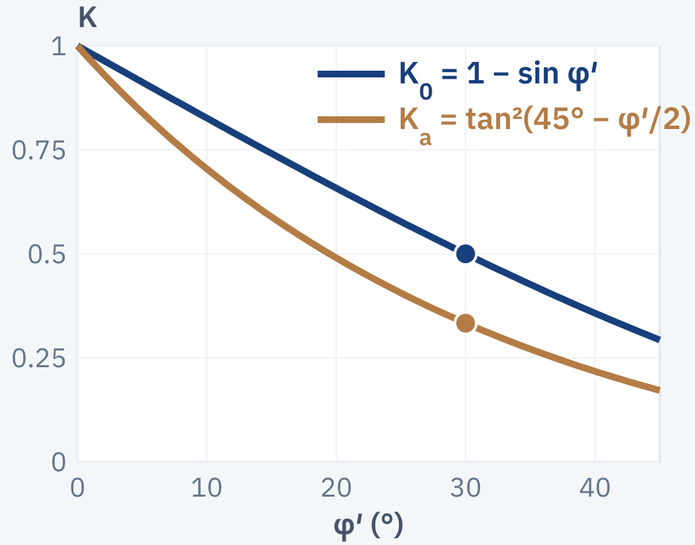
변형되는 벽체는 주동 상태를 발현시킨다: 수직 벽체와 수평 지표면에서는 **Rankine** 계수를 사용한다

다른 출처에서 얻은 계수(과압밀 K_0, 경사지거나 거친 벽체에 대한 Coulomb K_a)는 **직접 입력**한다

$$K_0 = 1 - \sin\varphi' \qquad \text{(정지토압, Jaky)}$$

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad \text{(주동토압, Rankine)}$$

K_0 및 K_a – φ′



두 계수의 내부마찰각에 따른 변화

이론

φ′ (°)	0	20	25	30	35	40
K_a	1.0000	0.4903	0.4059	0.3333	0.2710	0.2174
K_0	1.0000	0.6580	0.5774	0.5000	0.4264	0.3572

φ′ 값이 커질수록 **두 계수 모두 감소한다**: 단단한 지반에서는 벽체가 받는 몫이 작아진다

같은 φ′에서 **$K_0 > K_a$**이다: 움직일 수 없는 벽체는 변형되는 벽체보다 더 큰 하중을 받는다

φ′ = 0이면 $K_0 = K_a = 1$이다: 하중이 유체에서와 같이 벽체에 전부 전달된다

합력 P = K q H, 높이의 중간 위치

이론

압력 분포도는 직사각형이다: 벽체 **단위 길이당 합력**은 그 면적이며, **작용선**은 직사각형의 중심을 지난다

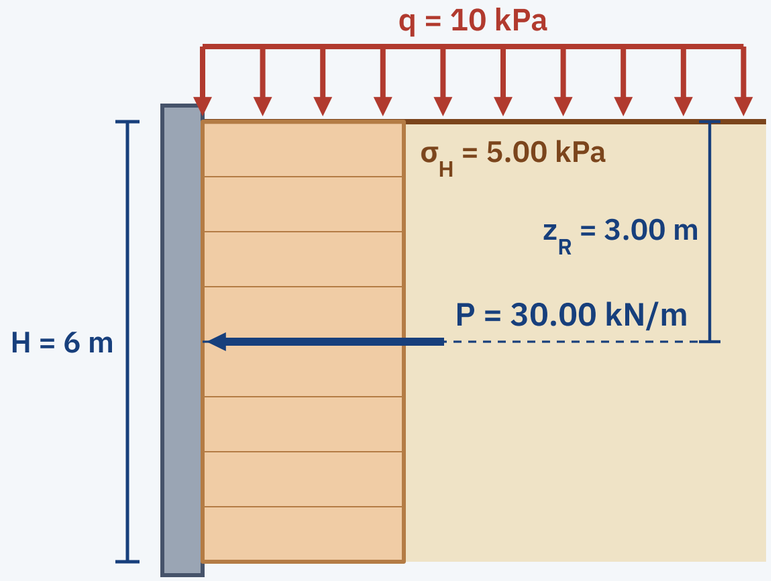
합력은 높이의 **중간**에 작용한다: 지표면에서 H/2 아래 (저면에서도 H/2 위)

이는 **상재하중 성분**에 한정되며, 토압 및 수압 분포도에 더해진다

$$P = \sigma_H H = K q H \qquad z_R = \frac{H}{2}$$

P — 벽체 단위 길이당 합력(kN/m)

z_R — 합력의 지표면으로부터의 깊이



문제

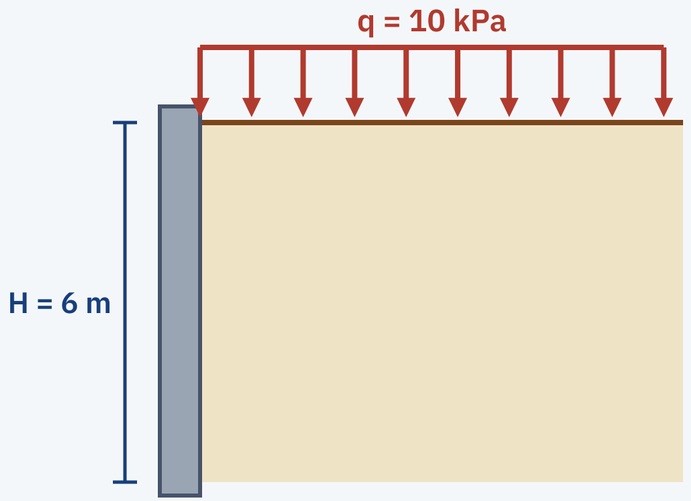
예제

조건

벽체	$H = 6.00$ m, 강성 (이동하지 않는) 벽체
하중	전 지표면에 $q = 10.00$ kPa
지반	$\varphi' = 30^\circ$

구하는 값

K, 추가된 측방 압력 σ_H, 합력 P 및 그 깊이 z_R.



풀이

풀이

1 계수: 벽체가 움직일 수 없는 정지 상태 (Jaky)

$$K_0 = 1 - \sin\varphi' = 1 - \sin 30^\circ = 1 - 0.5 = \mathbf{0.5000}$$

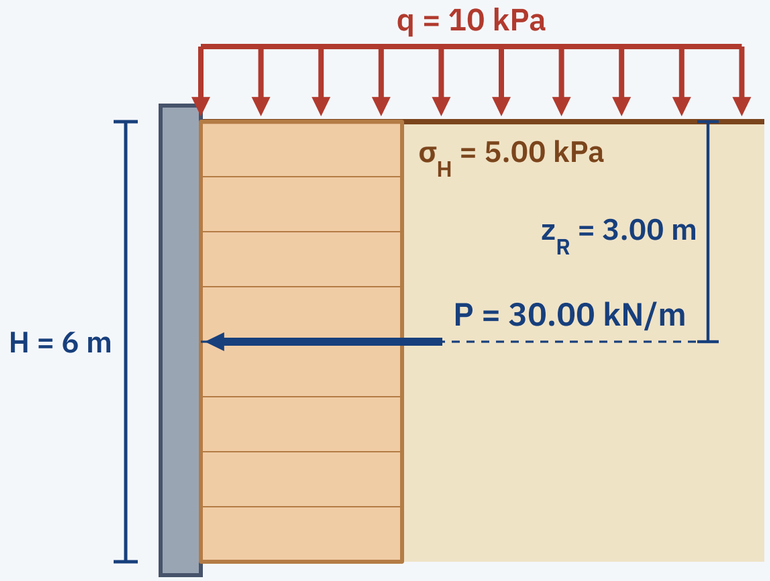
2 추가 측방압력: 모든 깊이에서 동일

$$\sigma_H = K\,q = 0.5000 \times 10.00 = \mathbf{5.00}\ \text{kPa}$$

3 합력과 작용선

$$P = \sigma_H\,H = 5.00 \times 6.00 = \mathbf{30.00}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = \frac{H}{2} = \frac{6.00}{2} = \mathbf{3.00}\ \text{m}$$



벽체는 전체 높이에 걸쳐 **5.00 kPa**의 측방압력을 받는다. 합력은 **30.00 kN/m**이며 지표면 **3.00 m** 아래(저면 위 3.00 m)에 있다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

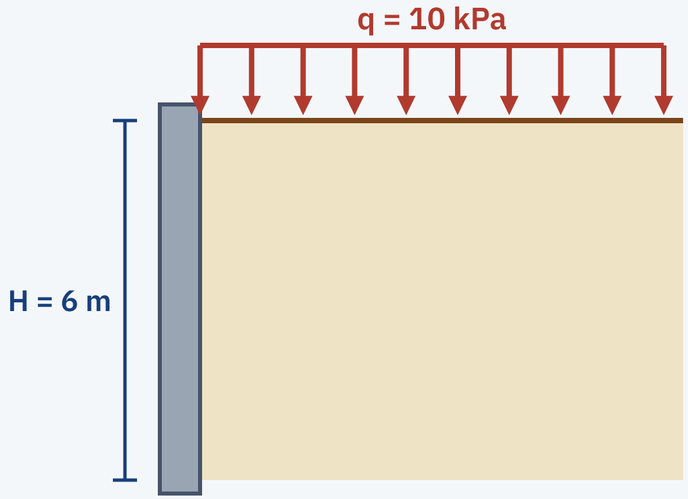
예제

구하는 값

K_a, σ_H, P, z_R; 정지 상태와의 비교.

조건

벽체와 하중	**동일한 옹벽:** $H = 6.00$ **m,** $q = 10.00$ **kPa,** $\varphi' = 30^\circ$
차이	**벽체는 주동 상태가 발현될 만큼 변형된다 (연직 벽체, 수평 지표면)**



풀이 (1/2)

풀이

1 계수: 주동 상태 (Rankine)

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) = \tan^2 30^\circ = 0.5774^2 = \mathbf{0.3333}$$

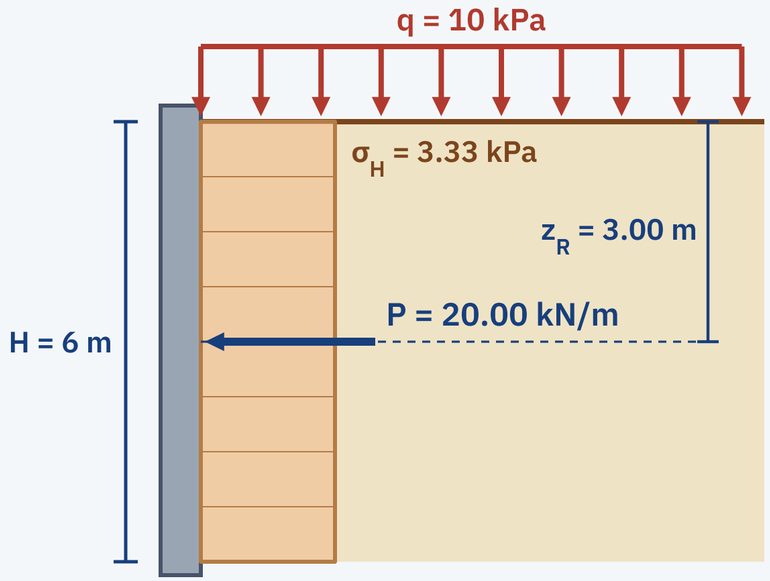
2 추가되는 측방압력

$$\sigma_H = K_a\, q = 0.3333 \times 10.00 = \mathbf{3.33}\ \text{kPa}$$

3 합력과 작용선

$$P = \sigma_H\, H = 3.333 \times 6.00 = \mathbf{20.00}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = \frac{H}{2} = \mathbf{3.00}\ \text{m}$$



주동 상태에서 압력은 **3.333 kPa**, 합력은 **20.00 kN/m**이며, 작용선은 같은 높이에 위치한다 (z_R = 3.00 m).

풀이 (2/2)

풀이

상태	K	σ_H (kPa)	P (kN/m)	z_R (m)
정지토압 (K_0)	0.5000	5.00	30.00	3.00
주동 (K_a)	0.3333	3.33	20.00	3.00
K_a / K_0 비	**0.6667**	**0.6667**	**0.6667**	1

$\varphi' = 30°$에서 $K_a / K_0 = 2/3$이다. 변위가 생기는 벽체는 변위할 수 없는 벽체가 받는 상재하중 압력의 **3분의 2**를 받는다. 두 경우 모두 분포도는 직사각형이며 합력은 높이의 중앙에 작용한다.

벽체가 실제로 움직이는지 여부가 이 선택의 유일한 근거이다: 지지된 벽체나 앵커식 벽체는 주동 상태에 도달하지 않으므로 K_0를 취한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체와 하중	$H = 6.00$ m, $q = 10.00$ kPa
지반	$\varphi' = 0^\circ,\ 20^\circ,\ 25^\circ,\ 30^\circ,\ 35^\circ,\ 40^\circ$

구하는 값

각 φ′에 대해 **K_0**, **K_a**, **σ_H**, **P**(두 경우); φ′ = 40°에 대한 손계산 검토.

풀이 (1/2)

풀이

φ′ (°)	K_0	K_a	σ_H 정지 (kPa)	σ_H 주동 (kPa)	P 정지토압 (kN/m)	P 주동 (kN/m)
0	1.0000	1.0000	10.00	10.00	60.00	60.00
20	0.6580	0.4903	6.58	4.90	39.48	29.42
25	0.5774	0.4059	5.77	4.06	34.64	24.35
30	**0.5000**	**0.3333**	**5.00**	**3.33**	**30.00**	**20.00**
35	0.4264	0.2710	4.26	2.71	25.59	16.26
40	0.3572	0.2174	3.57	2.17	21.43	13.05

φ′ = 30° 행은 예제 1과 2에 해당한다. φ′가 증가함에 따라 합력은 감소하여, 정지 상태에서 60.00 kN/m(φ′ = 0°)에서 21.43 kN/m(φ′ = 40°)로, 주동 상태에서는 13.05 kN/m로 감소한다.

풀이 (2/2)

풀이

1 계수

$$K_0 = 1 - \sin 40^\circ = 1 - 0.6428 = \mathbf{0.3572}$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 20^\circ) = \tan^2 25^\circ = 0.4663^2 = \mathbf{0.2174}$$

2 압력

$$\sigma_{H,0} = 0.3572 \times 10.00 = \mathbf{3.57}\ \text{kPa}$$

$$\sigma_{H,a} = 0.2174 \times 10.00 = \mathbf{2.17}\ \text{kPa}$$

3 합력 (z_R = 3.00 m, 두 경우 모두)

$$P_0 = 3.572 \times 6.00 = \mathbf{21.43} \qquad P_a = 2.174 \times 6.00 = \mathbf{13.05}\ \text{kN/m}$$

표의 φ′ = 40° 행은 손계산으로도 구할 수 있다: **21.43** 및 **13.05 kN/m**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

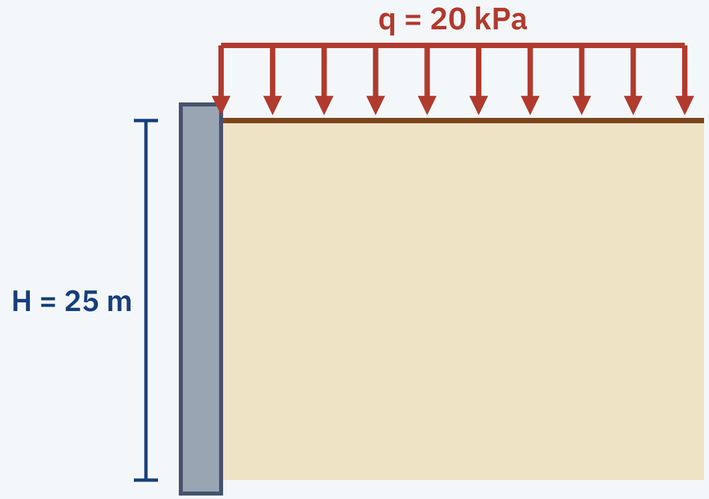
예제

조건

벽체	$H = 25.00$ m
하중	전 지표면에 $q = 20.00$ kPa
계수	다른 출처에서 가져온 $K = 0.30$ (φ′ 값은 사용하지 않음)

구하는 값

σ_H, P, z_R 및 압력의 깊이별 변화.



풀이

풀이

1 압력: 입력한 K를 직접 곱한다

$$\sigma_H = K\,q = 0.30 \times 20.00 = \mathbf{6.00}\ \text{kPa}$$

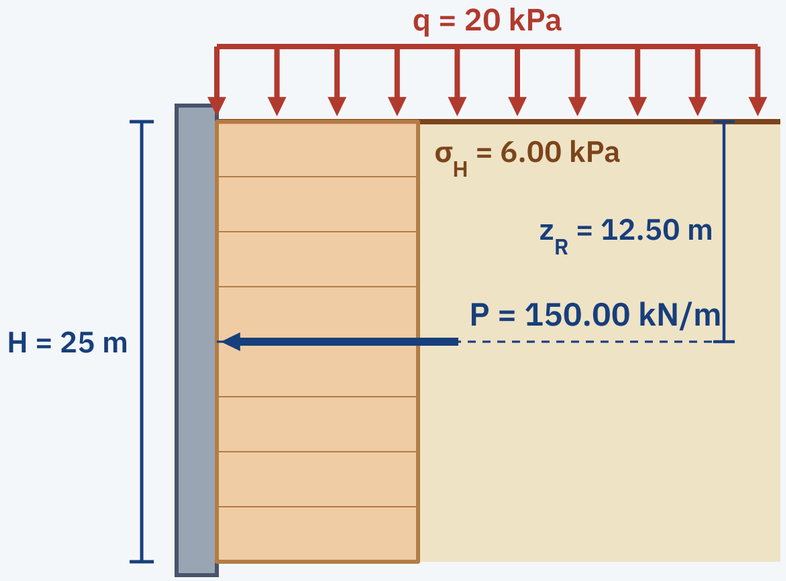
2 합력과 작용선

$$P = \sigma_H\,H = 6.00 \times 25.00 = \mathbf{150.00}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = \frac{H}{2} = \frac{25.00}{2} = \mathbf{12.50}\ \text{m}$$

3 깊이에 따른 압력의 변화

z (m)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
σ_H (kPa)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00



압력은 **모든 깊이에서 6.00 kPa**이며, 합력은 **150.00 kN/m**로 지표면 아래 12.50 m에 위치한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체와 지반	$\varphi' = 30°$; 정지 상태와 주동 상태
변수 1	$q = 0,\ 5,\ 10,\ 20,\ 30,\ 50$ kPa ($H = 6.00$ m)
변수 2	$H = 2,\ 4,\ 6,\ 8,\ 10$ m ($q = 10.00$ kPa)

구하는 값

q 및 H에 따른 합력의 변화; 압력과 작용선.

풀이

풀이

q (kPa)	σ_H 정지 (kPa)	P 정지토압 (kN/m)	P 주동 (kN/m)
0	0.00	**0.00**	**0.00**
5	2.50	**15.00**	**10.00**
10	5.00	**30.00**	**20.00**
20	10.00	**60.00**	**40.00**
30	15.00	**90.00**	**60.00**
50	25.00	**150.00**	**100.00**

q가 두 배가 되면 P도 두 배가 되며, q = 0에서는 상재하중이 없다.

H (m)	σ_H 정지 (kPa)	P 정지토압 (kN/m)	P 주동 (kN/m)	z_R (m)
2	5.00	**10.00**	**6.67**	1.00
4	5.00	**20.00**	**13.33**	2.00
6	5.00	**30.00**	**20.00**	3.00
8	5.00	**40.00**	**26.67**	4.00
10	5.00	**50.00**	**33.33**	5.00

H가 커지면 P는 선형으로 증가하고, 압력은 그대로이며 합력은 깊이 H/2로 내려간다.

P = K q H: P는 q와 H의 **곱**에 정비례하며, K의 영향은 별도의 승수이다(주동 / 정지 = 2/3, 모든 행에서).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체	$H = 6.00$ m, $\gamma = 18.0$ kN/m³, $\varphi' = 30^\circ$ **(건조 뒤채움)**
상재하중	**전 지표면에** $q = 10.00$ **kPa**
경우	**정지 상태 (K_0) 및 주동 상태 (K_a)**

구하는 값

흙 삼각형의 합력, 상재하중의 합력, **전체 힘**과 전체 힘의 저면으로부터의 높이; 상재하중의 기여분.

풀이 (1/2)

풀이

1 토압 (삼각형 분포), 정지 상태

$$P_z = \tfrac{1}{2} K_0 \gamma H^2 = \tfrac{1}{2}(0.500)(18.0)(6.00)^2 = \mathbf{162.00}\ \text{kN/m} \quad (\text{저면에서 } 2.00\ \text{m})$$

2 상재하중 성분 (예제 1)

$$P_q = K_0\, q\, H = 0.500 \times 10.00 \times 6.00 = \mathbf{30.00}\ \text{kN/m} \quad (\text{저면에서 } 3.00\ \text{m})$$

3 합계와 작용선 (기저 모멘트)

$$P = 162.00 + 30.00 = \mathbf{192.00}\ \text{kN/m}$$

$$L = \frac{162.00(2.00) + 30.00(3.00)}{192.00} = \frac{414.00}{192.00} = \mathbf{2.156}\ \text{m}$$

정지 상태에서 합계는 **192.00 kN/m**이며, 저면으로부터 **2.156 m** 위에 작용한다; 상재하중의 몫은 30.00 kN/m(15.6%)이다.

풀이 (2/2)

풀이

1 주동 상태에 대한 동일한 단계 ($K_a = 0.3333$)

$$P_z = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18.0)(6.00)^2 = \mathbf{108.00}\ \text{kN/m}$$

$$P_q = 0.3333(10.00)(6.00) = \mathbf{20.00}\ \text{kN/m}$$

$$L = \frac{108.00(2.00) + 20.00(3.00)}{128.00} = \mathbf{2.156}\ \text{m}$$

상태	K	P_{soil} (kN/m)	$P_{surcharge}$ (kN/m)	P 합계 (kN/m)	상재하중 기여분	L (m, 저면에서)
정지	0.5000	162.00	30.00	**192.00**	%15.62	2.156
주동	0.3333	108.00	20.00	**128.00**	%15.62	2.156

두 항 모두에서 K가 공통 계수이므로 **상재하중의 비율과 작용선은 K와 무관하다**: 비율 2q / (γH + 2q) = 15.62%, L = 2.156 m. 전체 힘만 K에 비례하여 변한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

$\sigma_H = K \cdot q$: 지표 전체에 분포하는 등분포하중은 벽체에 **모든 깊이에서 동일한** 측방압력을 추가하며, 선도는 직사각형이다

K는 벽체의 거동에 따라 정해진다: 정지 **$K_0 = 1 - \sin \varphi'$**(Jaky), 주동 **$K_a = \tan^2(45° - \varphi'/2)$**(Rankine) 또는 입력한 값; $\varphi' = 30°$에서 0.5000과 0.3333

$P = K\,q\,H$와 **$z_R = H/2$**: 초기 벽체 (H = 6 m, q = 10 kPa)에서 정지 상태의 σ_H = 5.00 kPa, P = 30.00 kN/m; 주동 상태에서는 3.33 kPa, 20.00 kN/m

선형: P는 q와 H에 비례한다; $K_a / K_0 = 2/3$ ($\varphi' = 30°$)

합산: 상재하중 성분을 토압 선도와 수압 선도에 더한다; 상재하중이 차지하는 비율은 $2q / (\gamma H + 2q)$이고 작용선은 K와 무관하다

참고문헌

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; 본 페이지는 이 문헌을 준용합니다.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

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 모듈의 자체 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈에서도 동일한 값이 얻어진다. 모듈의 초기 벽체는 H = 6 m, q = 10 kPa, φ′ = 30° (정지 상태)이고, 두 번째 예제는 H = 25 m, q = 20 kPa, K = 0.30이다.

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

벽체, 상재하중과 계수 선택을 GeoTerva에 입력한다. 모듈은 K, σ_H, P, z_R 값, 압력 분포도, 단계별 풀이와 보고서를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.