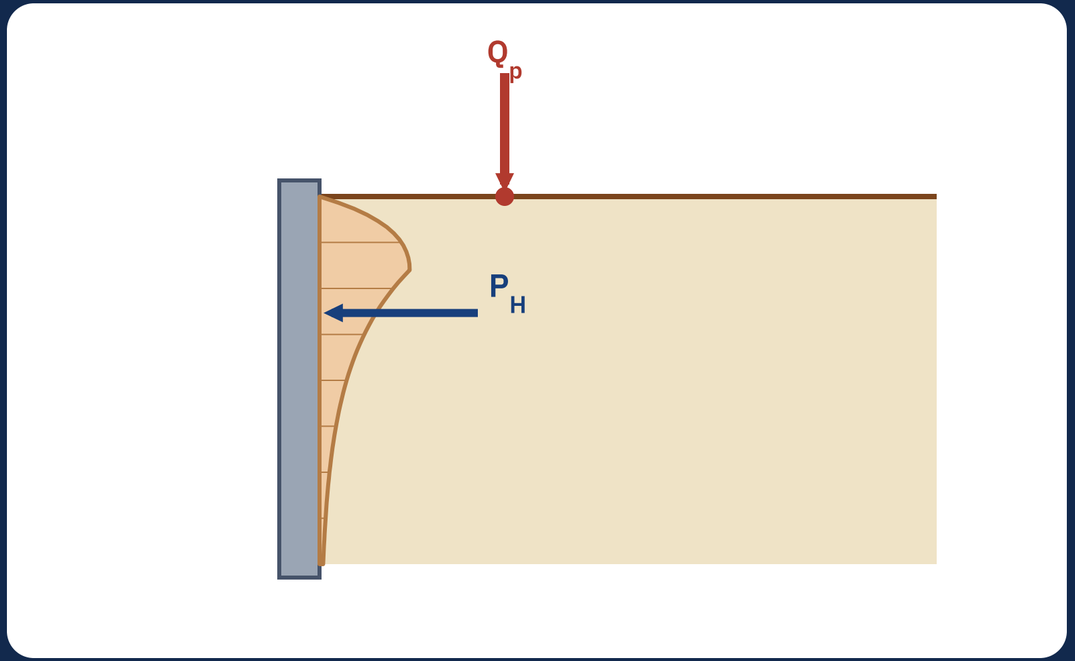
GeoTerva

지반공학 강의 자료 · 상부하중

집중 상재하중

강의: 지표면의 집중하중이 벽체에 일으키는 측방압력; 두 가지 방법, 합력, 평면상 분포 및 다수 하중, 계산 예제.

- $m = x/H \cdot n = z/H$
- $\sigma_H = (3Q_p/\pi)\, x^2 z/R^5$
- Terzaghi–NAVFAC 도표
- P_H 및 L
- 평면 분포



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 집중하중의 기하: **x, y, z, R** 및 무차원 **m = x/H, n = z/H**
- **탄성(강성 벽체)** 해: Boussinesq 응력의 2배, 최대 압력은 **z = x/2**에서 발생; **x_{min} = 0.30 m**
- **Terzaghi–NAVFAC 도표**: 경우 1 (m ≤ 0.4)과 경우 2 (m > 0.4)
- 합력 **$P_H = (Q_p/H)\cdot I_0$**, 높이 **$L = H\cdot I_1/I_0$**; I_0, I_1의 닫힌 형태 식
- **평면상** 벽체 방향의 분포($\cos^2(1.1\theta)$) 및 **같은 직선 위의 최대 3개 하중**

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 = 15 m, 집중하중 Q_p = 38 kN이 벽체에서 x = 5 m 떨어진 곳에 작용한다. P_H는 하중 위치의 단면에서 벽체 단위 길이당 힘이다(kN/m).

벽체에 작용하는 집중하중

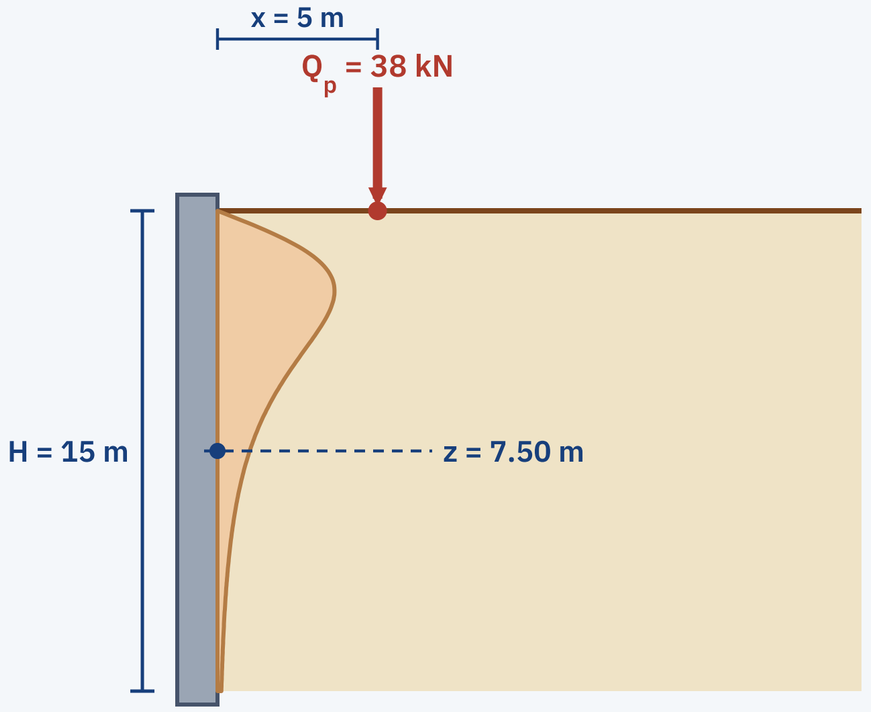
이론

지표면의 집중하중 Q_p는 지반에 3차원 응력장을 만든다. 하중이 연직 벽체의 영향 범위 안에 있으면 응력 증가량의 일부가 벽체에 **수평 압력**으로 전달된다

모듈은 하중을 지나 벽체에 수직인 직선을 따른 깊이별 압력 변화, 그 **합력**과 **작용선**, 그리고 평면상 벽체 길이 방향의 분포를 제공한다

$$m = \frac{x}{H}, \qquad n = \frac{z}{H}$$

H — 벽체 높이; **x** — 벽체에서 하중까지의 수평거리; **z** — 지표면으로부터의 깊이
y — 하중을 지나 벽체에 수직인 직선으로부터 벽체를 따른 거리; **R = √(x² + y² + z²)**
σ_H — 축선상의 측방 압력; **σ'_H** — 평면상; **P_H** — 합력; **L** — 저면에서 작용선까지의 거리
θ — 도표의 평면각; **x_{min}** — 탄성법에서 최소 계산 거리 (0.30 m)



탄성해와 Terzaghi–NAVFAC 도표

이론

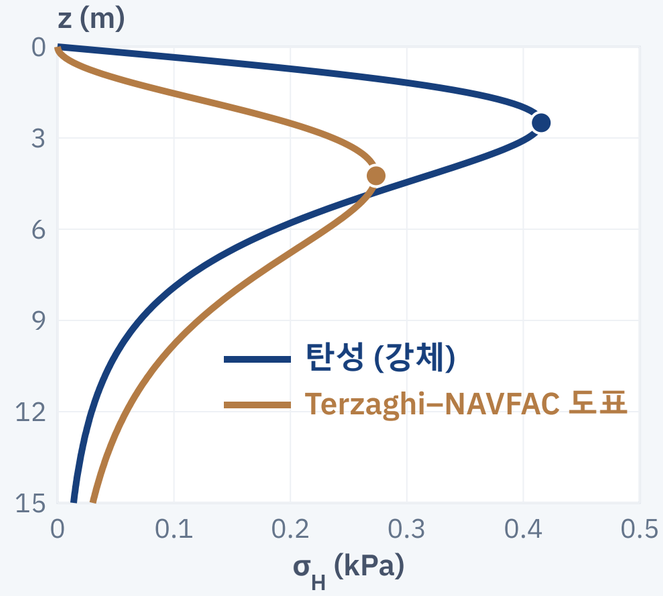
둘 다 **변위가 없는 벽체**를 나타내며, **벽체에 가까운 하중**에서 서로 가장 크게 달라진다

탄성해: Boussinesq 응력의 **2배**: 벽체 반대편의 거울상 하중이 면에서의 수평 이동을 0으로 만든다(Mindlin 1936); 포아송비 0.5

도표(Terzaghi 1954): 거리 효과는 **m = 0.4**에서 멈춘다; 0.4H 이내의 하중은 0.4H 거리에 있는 것처럼 작도한다

0.4H 이내의 하중에서는 탄성해가 벽체 상부 부근에 **증가하는 압력**을 집중시키는 반면 도표는 단일 분포를 유지하며, 더 먼 거리에서는 두 방법이 같은 크기 수준의 값을 준다

프로파일 (H = 15 m, x = 5 m, Q_p = 38 kN)



강성 벽체: 압력, 최댓값 및 닫힌 형태의 합력

이론

하중을 지나며 벽체에 수직인 직선(y = 0) 위에서: **$\sigma_H = (3Q_p/\pi)\, x^2 z/R^5$**; 정점은 **$z = x/2$**에서 나타나며, **$\sigma_{H,max} = 0.2733\, Q_p/x^2$**

하중이 벽체에 가까워질수록 해는 **특이**해진다: P_H가 $\approx Q_p/(\pi x)$ 꼴로 증가하므로, **$x < x_{min} = 0.30$ m**인 하중은 0.30 m 위치에서 계산한다

임계 거리 약 **0.4H** 이내에서는 탄성 방정식을 신뢰할 수 없게 된다: 공학적 판단이 필요하며, 도표는 비교 기준을 제공한다

$$\sigma_H = \frac{3}{\pi}\,\frac{Q_p}{H^2}\,\frac{m^2\, n}{\left(m^2+n^2\right)^{5/2}}$$

$$I_0 = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{m} - \frac{m^2}{\left(1+m^2\right)^{3/2}}\right] \qquad I_1 = I_0 - \frac{1}{\pi\left(1+m^2\right)^{3/2}}$$

Terzaghi–NAVFAC: 경우 1 및 경우 2

이론

각 깊이에서 **n = z/H**를 계산하고, 식은 **m**에 따라 선택한다

경우 1의 식에는 m이 포함되지 않는다: 이는 경우 2에서 m = 0.4일 때의 값이다(1.77 × 0.16 = 0.2832, **0.28**로 표기하였다). 0.4H 이내의 하중은 어디에 위치하든 **동일한 분포도, P_H 및 L** 값을 준다

반올림 때문에 m = 0.4 한계에서 P_H는 약간의 계단 변화를 보이며(≈ 1.1%), L은 연속으로 유지된다

$$\sigma_H = 0.28\,\frac{Q_p}{H^2}\,\frac{n^2}{(0.16+n^2)^3} \qquad m \le 0.4 \text{ (경우 1)}$$

$$\sigma_H = 1.77\,\frac{Q_p}{H^2}\,\frac{m^2\,n^2}{(m^2+n^2)^3} \qquad m > 0.4 \text{ (경우 2)}$$

P_H, L 및 I_0, I_1

이론

P_H는 압력 분포도의 면적이며, **L**은 도심의 벽체 저면으로부터의 높이이다: 합력은 지표면으로부터 **H − L** 깊이에 작용한다

P_H는 하중 자신의 단면(y = 0)에서의 힘이며, 압력이 벽체를 따라 감소하므로 **벽체 길이를 곱하지 않는다**

$\sigma_H = (Q_p/H^2)\cdot f(n)$으로 쓰면 두 개의 순수한 수가 남는다. 탄성해에서는 닫힌 형태, 도표에서는 수치(또는 닫힌 형태) 적분이다. 도표 상수는 이 적분을 단 하나의 m 값에서 읽은 것이다: **m = 0.4**일 때 $P_H = 0.787\ Q_p/H$, $L = 0.587\ H$; **m = 0.6**일 때 $0.457\ Q_p/H$ 및 $0.476\ H$

$$P_H = \frac{Q_p}{H}\, I_0 \qquad L = H\,\frac{I_1}{I_0}$$

$$I_0 = \int_0^1 f(n)\, dn \qquad I_1 = \int_0^1 f(n)\,(1-n)\, dn$$

벽체를 따른 압력과 다중 하중

이론

탄성해: σ_H 식은 벽체의 모든 점에서 유효하다($R^2 = x^2 + y^2 + z^2$). 일정한 깊이에서 압력은 벽체를 따라 $(R_0/R)^5$에 비례하여 감소하며, 최댓값은 $z = \sqrt{(x^2 + y^2)}/2$에서 나타난다

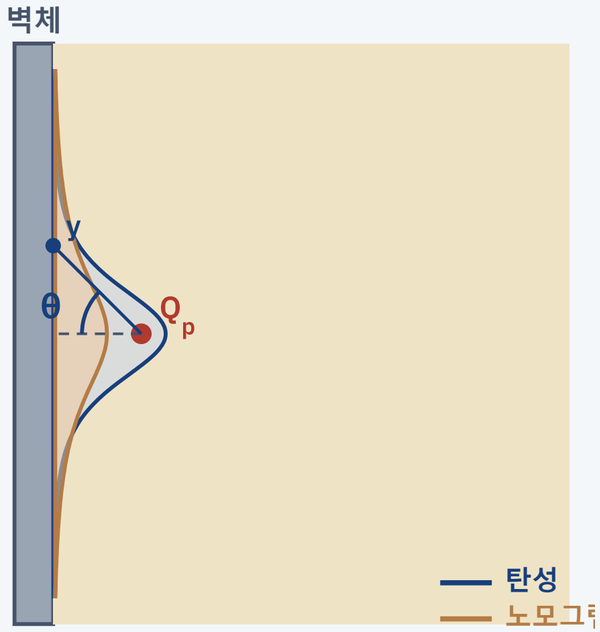
도표: 축선상의 압력은 평면각에 따라 감소하며, 각 1.1θ가 90°에 도달하면($\theta \approx 81.8°$) 감소는 영으로 유지된다

복수 하중(최대 3개): 각 하중은 고유의 x_i와 $Q_{p,i}$ 값을 가지며, 압력은 응력 증가량이므로 **합산(중첩)된다**. 합력은 저면에 대한 모멘트가 평형을 이루는 점에 작용한다

$$\sigma'_H = \sigma_H \cos^2(1.1\,\theta) \qquad \theta = \tan^{-1}\frac{y}{x}\ \text{(도표)}$$

$$\sigma_H = \sum_i \sigma_{H,i} \qquad P_H = \sum_i \frac{Q_{p,i}}{H} I_{0,i} \qquad L = \frac{\sum_i P_{H,i}\, L_i}{P_H}$$

평면: 깊이 z = 2.5 m



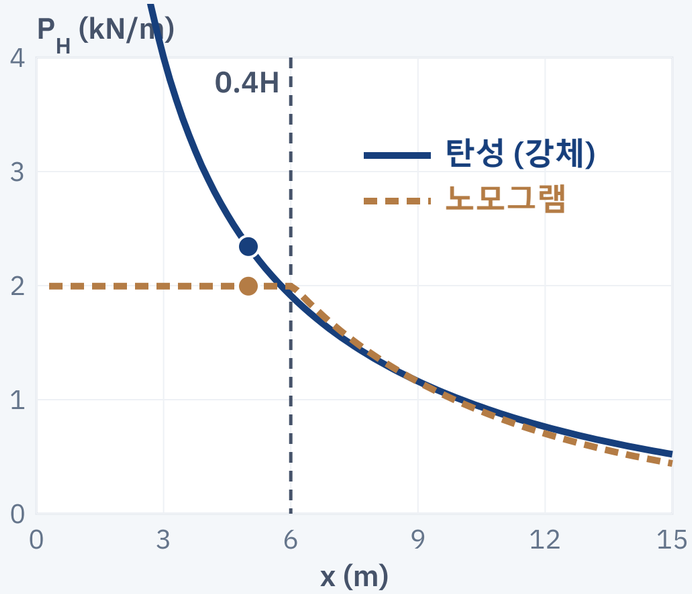
합력과 그 위치 (하중 거리 기준)

이론

x (m)	m	P_H (탄성)	탄성 L	P_H 도표	L 도표	상태
0.30	0.020	40.32	14.70	1.99	8.81	경우 1
1.00	0.067	12.09	14.01	1.99	8.81	경우 1
2.00	0.133	6.03	13.05	1.99	8.81	경우 1
3.00	0.200	4.00	12.15	1.99	8.81	경우 1
4.00	0.267	2.97	11.33	1.99	8.81	경우 1
5.00	0.333	2.34	10.59	1.99	8.81	경우 1
6.00	0.400	1.91	9.94	1.99	8.81	경우 1
8.00	0.533	1.35	8.87	1.38	7.61	경우 2
10.00	0.667	1.00	8.05	0.9755	6.74	경우 2
15.00	1.000	0.5213	6.80	0.4402	5.45	경우 2

m ≤ 0.4(x ≤ 6 m): 도표는 동일한 P_H와 L을 주며, 탄성 P_H는 하중이 가까워질수록 급격히 증가한다

m > 0.4: 탄성 합력은 다소 더 위쪽에 작용한다 (L이 더 크다)



문제

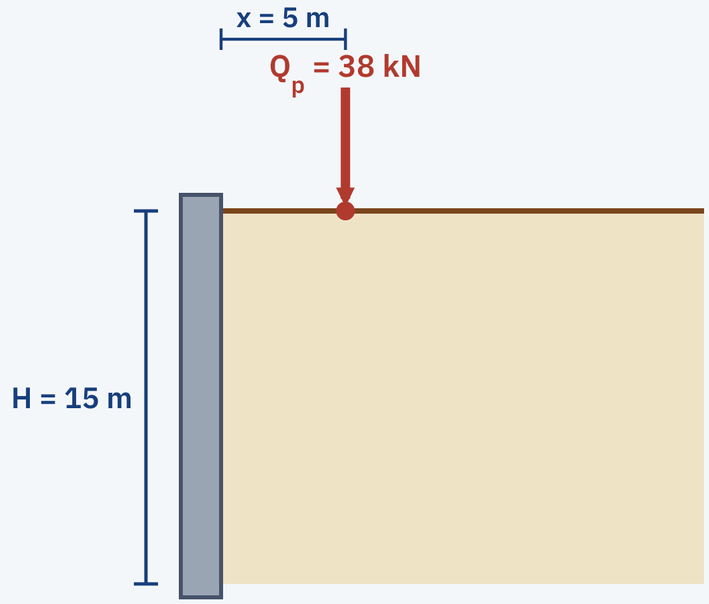
예제

조건

벽체	$H = 15.00$ m
하중	$Q_p = 38.0$ kN, 벽체로부터 $x = 5.00$ m
방법	**탄성 (강성 벽체);** $x \geq x_{min}$

구하는 값

m, 최대 압력 $\sigma_{H,max}$ (z = x/2), I_0, I_1, P_H, **L** 및 지표면으로부터 합력까지의 깊이.



풀이 (1/3)

풀이

1 거리비

$$m = \frac{x}{H} = \frac{5}{15} = \frac{1}{3} = \mathbf{0.333} \quad (x \geq x_{min} = 0.30\ \text{m})$$

2 정점 깊이

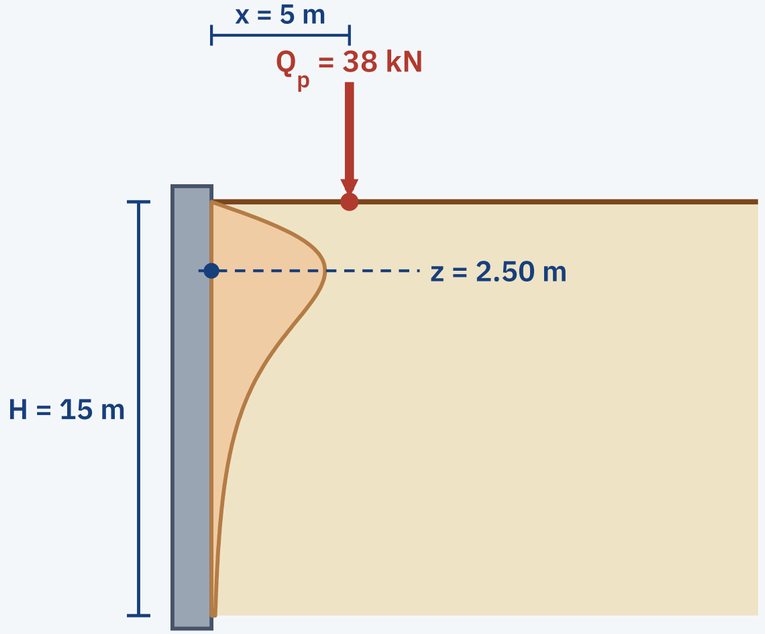
$$z = \frac{x}{2} = \mathbf{2.50}\ \text{m}$$

$$R = \sqrt{x^2 + z^2} = \sqrt{25.00 + 6.25} = \mathbf{5.5902}\ \text{m}$$

3 정점의 압력

$$\sigma_{H,max} = \frac{3 \times 38}{\pi} \cdot \frac{5.00^2 \times 2.50}{5.5902^5}$$

$$\sigma_{H,max} = 36.287 \times 0.011449 = \mathbf{0.4154}\ \text{kPa}$$



탄성 최댓값은 깊이 z = 2.50 m에서 **0.4154 kPa**이며, 0.2733 Q_p/x^2 = 0.4154 kPa와 같은 값이다.

풀이 (2/3)

풀이

4 면적의 무차원 값 I_0

$$I_0 = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{m} - \frac{m^2}{(1+m^2)^{3/2}}\right] = \frac{1}{\pi}\left[3 - \frac{1/9}{(10/9)^{3/2}}\right] = \frac{1}{\pi}[3 - 0.09487] = \mathbf{0.92473}$$

5 모멘트의 무차원 값 I_1

$$I_1 = I_0 - \frac{1}{\pi(1+m^2)^{3/2}} = 0.92473 - \frac{1}{\pi(10/9)^{3/2}} = 0.92473 - 0.27178 = \mathbf{0.65295}$$

I_0 = **0.92473**, I_1 = **0.65295**: m에만 의존하는 두 수; 하중과 높이는 이들에 포함되지 않는다.

풀이 (3/3)

풀이

6 합력

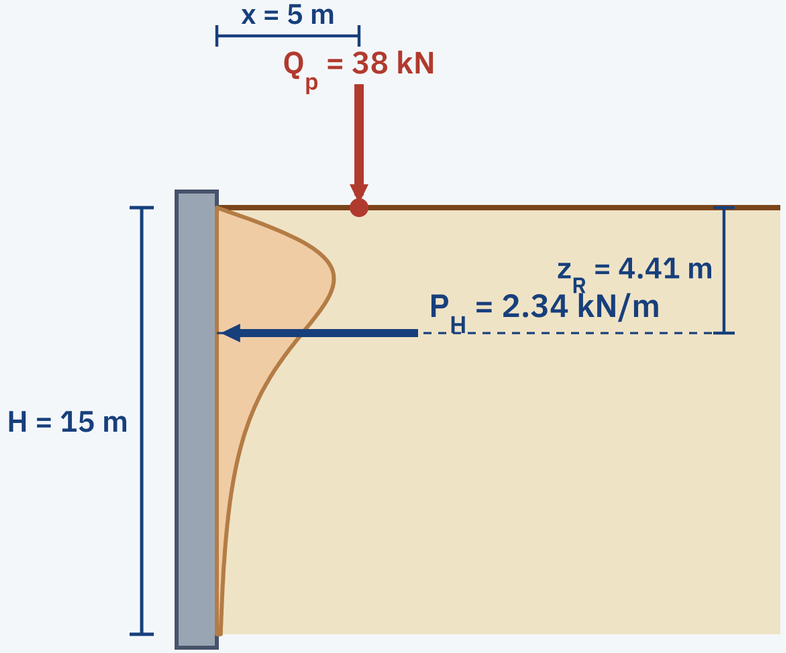
$$P_H = \frac{Q_p}{H}\, I_0 = \frac{38}{15} \times 0.92473 = \mathbf{2.34}\ \text{kN/m}$$

7 작용선 (저면 기준)

$$L = H\,\frac{I_1}{I_0} = 15 \times \frac{0.65295}{0.92473} = \mathbf{10.59}\ \text{m}$$

8 지표면으로부터의 깊이

$$H - L = 15.00 - 10.59 = \mathbf{4.41}\ \text{m}$$



P_H = 2.34 kN/m이며, 작용 위치는 지표면 **4.41 m** 아래(저면에서 10.59 m)이다. 이 힘은 하중이 놓인 단면에 대한 값이며, 벽체 길이를 곱하지 않는다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

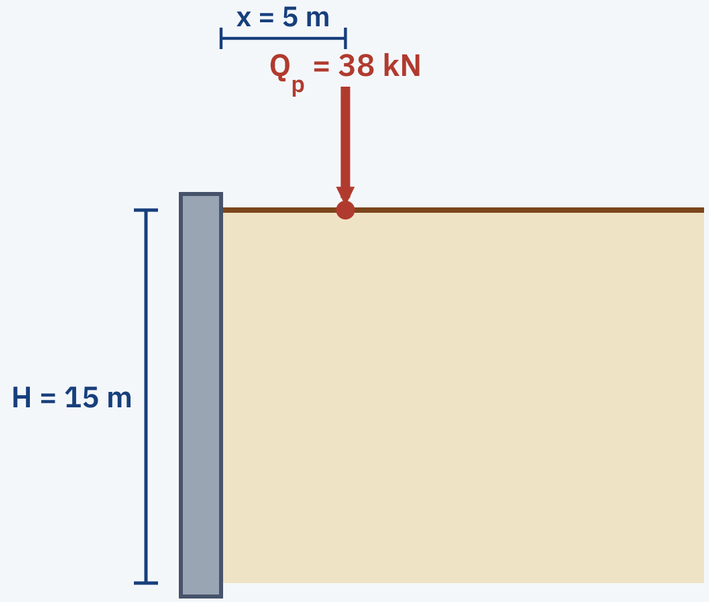
예제

구하는 값

경우 선택, σ_H (z = 2.5 m), I_0, I_1, P_H 및 L.

조건

벽체와 하중	$H = 15.00$ m, $Q_p = 38.0$ kN, $x = 5.00$ m
방법	Terzaghi–NAVFAC 도표; $z = 2.50$ m에서의 압력



풀이 (1/3)

풀이

1 경우 선택

$$m = \frac{1}{3} = 0.333 \le 0.4 \;\Rightarrow\; \text{경우 1: 다이어그램 } m = 0.4 \text{에서 일정}$$

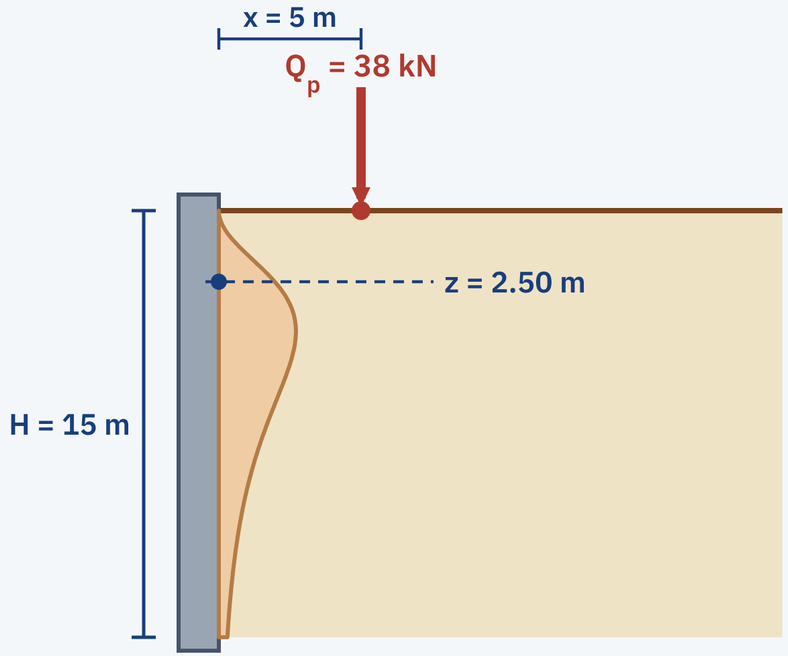
2 깊이비

$$n = \frac{z}{H} = \frac{2.50}{15} = \mathbf{0.1667}$$

3 압력

$$\sigma_H = 0.28\,\frac{38}{15^2}\cdot\frac{n^2}{(0.16+n^2)^3} = 0.04729 \times \frac{0.02778}{0.006621}$$

$$\sigma_H = 0.04729 \times 4.1953 = \mathbf{0.1984}\ \text{kPa}$$



z = 2.5 m에서 도표 압력은 **0.1984 kPa**이며, 같은 깊이에서 탄성 해는 0.4154 kPa(최댓값)를 준다.

풀이 (2/3)

풀이

4 적분 (닫힌 형태, a = 0.16)

$$I_0 = \int_0^1 0.28\,\frac{n^2}{(a+n^2)^3}\,dn = 0.28\left[\frac{1}{8a(1+a)} - \frac{1}{4(1+a)^2} + \frac{\tan^{-1}(1/\sqrt{a})}{8a^{3/2}}\right]$$

5 수치

$$\frac{1}{8(0.16)(1.16)} = 0.6735 \qquad \frac{1}{4(1.16)^2} = 0.1858 \qquad \frac{\tan^{-1}2.5}{8(0.16)^{3/2}} = 2.3248$$

$$I_0 = 0.28\,[0.6735 - 0.1858 + 2.3248] = 0.28 \times 2.8125 = \mathbf{0.7875}$$

I_0 = **0.7875**: 도표가 m = 0.4에 대해 주는 상수 0.787 Q_p/H와 같다. 모듈은 이 적분을 수치적으로(Simpson) 계산한다.

풀이 (3/3)

풀이

6 $I_1 = I_0 - \int n\,f\,dn$ (닫힌 형태, a = 0.16)

$$\int_0^1 nf\,dn = 0.28 \cdot \tfrac{1}{2}\left[\frac{1}{2a} - \frac{1}{1+a} + \frac{a}{2(1+a)^2}\right]$$

$$= 0.28 \times 1.1612 = 0.3251 \;\Rightarrow\; I_1 = 0.7875 - 0.3251 = \mathbf{0.4624}$$

7 합력과 작용선

$$P_H = \frac{38}{15} \times 0.7875 = \mathbf{1.99}\ \text{kN/m}$$

$$L = 15 \times \frac{0.4624}{0.7875} = \mathbf{8.81}\ \text{m}$$

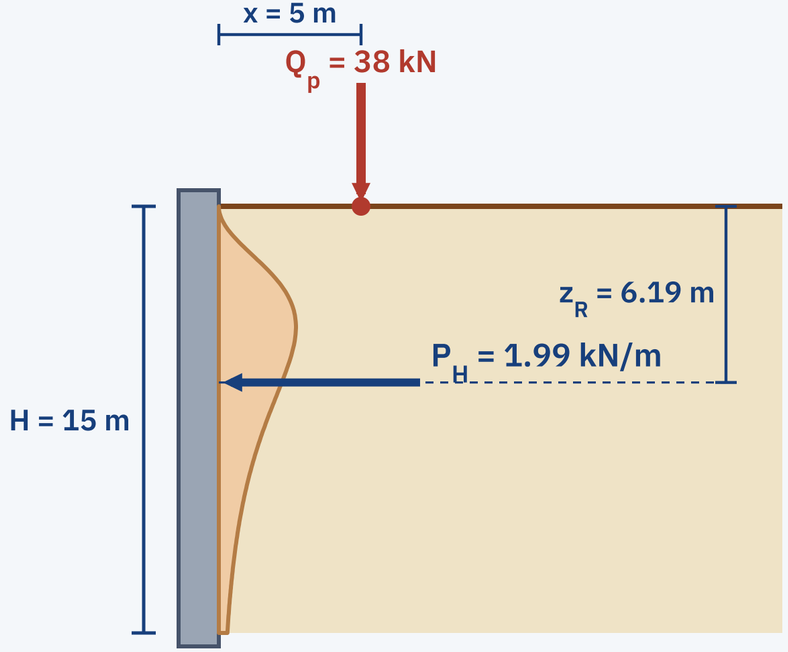


도표: **P_H = 1.99 kN/m**, L = **8.81 m** (지표면에서 6.19 m). 탄성해에 비해 합력은 15% 작고 작용선은 1.78 m 더 아래에 있다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

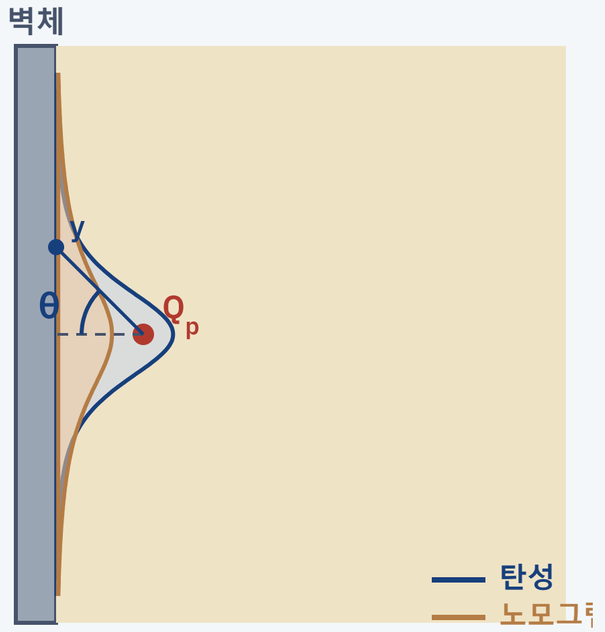
예제

구하는 값

두 방법 모두에서 σ'_H (y = 5 m); y = 0 – 15 m에 대한 분포.

조건

벽체와 하중	$H = 15.00$ m, $Q_p = 38.0$ kN, $x = 5.00$ m
깊이	$z = 2.50$ m
위치	하중을 지나는 수직선으로부터 $y = 5.00$ m 떨어진 곳 ($\theta = 45°$)



풀이 (1/2)

풀이

1 탄성: $(R_0/R)^5$에 따른 감쇠

$$R_0^2 = x^2 + z^2 = 31.25 \qquad R^2 = x^2 + y^2 + z^2 = 56.25$$

$$\sigma'_H = \sigma_H \left(\frac{R_0}{R}\right)^5 = 0.4154 \times \left(\frac{31.25}{56.25}\right)^{5/2} = 0.4154 \times 0.2300 = \mathbf{0.0956}\ \text{kPa}$$

2 도표: $\cos^2(1.1\theta)$에 의한 감쇠

$$\theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} = \tan^{-1}\frac{5}{5} = 45^\circ$$

$$\sigma'_H = \sigma_H \cos^2(1.1\theta) = 0.1984 \times \cos^2(49.5^\circ) = 0.1984 \times 0.4218 = \mathbf{0.0837}\ \text{kPa}$$

y = 5 m에서 탄성 압력은 축 값의 0.23배(0.0956 kPa)이고, 도표는 0.42배(0.0837 kPa)이다. 도표는 벽체를 따라 더 느리게 감소하지만, 더 작은 초기값에서 출발한다.

풀이 (2/2)

풀이

y (m)	θ (°)	σ'_H 탄성 (kPa)	비율	σ'_H 도표 (kPa)	비율	탄성 정점 z (m)	정점 압력 (kPa)
0.0	0.0	0.4154	1.00	0.1984	1.00	2.50	0.4154
2.5	26.6	0.2634	0.63	0.1511	0.76	2.80	0.2659
5.0	45.0	0.0956	0.23	0.0837	0.42	3.54	0.1039
7.5	56.3	0.0317	0.08	0.0439	0.22	4.51	0.0393
10.0	63.4	0.0115	0.03	0.0237	0.12	5.59	0.0166
15.0	71.6	0.0022	0.01	0.0076	0.04	7.91	0.0042

압력은 하중에서 벽면에 수직인 직선 상에서 최대이며 벽을 따라 급속히 소멸한다; 탄성해에서 최대 압력의 깊이는 y가 증가함에 따라 $\sqrt{(x^2 + y^2)}/2$로 낮아진다. 도표에서 감소는 $\theta \approx 81.8°$ 이후 0으로 유지된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

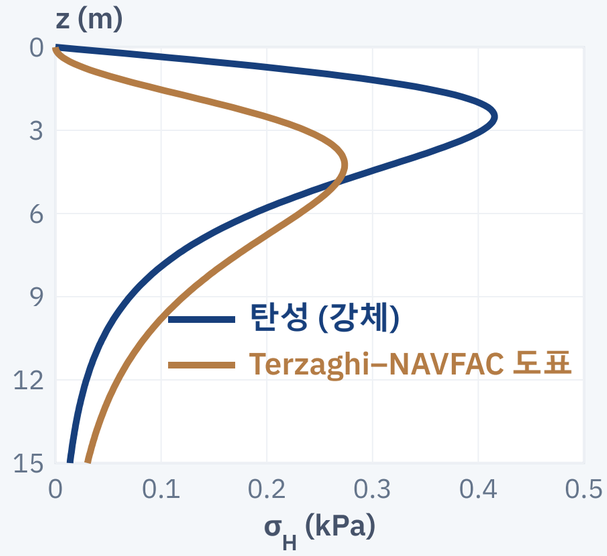
예제

조건

벽체와 하중	$H = 15.00$ m, $Q_p = 38.0$ kN, $x = 5.00$ m
깊이	$z = 0$ – 15 m, 1.5 m 간격

구하는 값

두 방법에 대한 σ_H 분포; 도표의 **정점** (경우 1) 손계산.



풀이 (1/2)

풀이

z (m)	n = z/H	σ_H 탄성 (kPa)	σ_H 도표 (kPa)
0.00	0.00	0.0000	0.0000
1.50	0.10	0.3511	0.0963
3.00	0.20	0.4038	0.2364
4.50	0.30	0.2964	0.2724
6.00	0.40	0.1873	0.2309
7.50	0.50	0.1143	0.1715
9.00	0.60	0.0706	0.1211
10.50	0.70	0.0448	0.0844
12.00	0.80	0.0293	0.0591
13.50	0.90	0.0198	0.0420
15.00	1.00	0.0138	0.0303

탄성해에 의한 압력은 지표면에 가까운 깊이(2.5 m)에서 0.4154 kPa로 최대가 되고 빠르게 감소한다. 도표는 더 매끄러운 분포를 주며, 그 최댓값은 더 깊은 곳에서 나타나고 더 작다.

풀이 (2/2)

풀이

1 도함수가 0: d/dn [n²/(0.16 + n²)³] = 0

$$2n(0.16+n^2)-6n^3=0 \;\Rightarrow\; n^2=\frac{0.16}{3}=0.0533$$

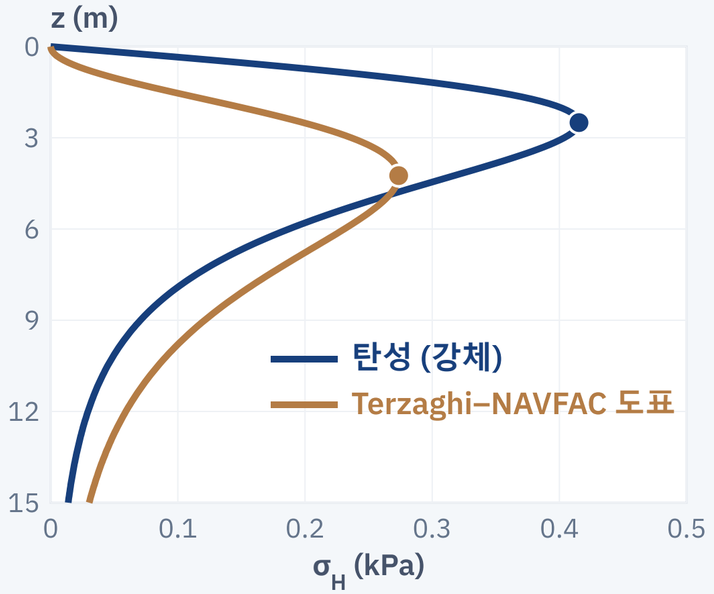
$$n=\mathbf{0.2828} \;\Rightarrow\; z=nH=\mathbf{4.243}\ \text{m}$$

2 최대 압력 (n² = 0.08)

$$\sigma_{H,max}=0.28\,\frac{38}{15^2}\cdot\frac{0.08}{(0.16+0.08)^3}$$

$$\sigma_{H,max}=0.04729\times 5.787=\mathbf{0.2737}\ \text{kPa}$$

도표의 최댓값은 **0.2737 kPa**(z = 4.24 m), 탄성해의 최댓값은 **0.4154 kPa**(z = 2.50 m)이다: 도표는 최댓값 위치를 아래로 옮기고 크기를 2/3로 줄인다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체와 하중	$H = 15.00$ m, $Q_p = 38.0$ kN
거리	$x = 0.3;\ 1;\ 2;\ 3;\ 4;\ 5;\ 6;\ 8;\ 10;\ 15$ m
Ek	$x < 0.30$ m 및 도표의 $0.4H = 6$ m 한계

구하는 값

두 방법에 대한 P_H와 L; x = 10 m에 대한 수계산 검토; x_{min}과 한계.

풀이 (1/3)

풀이

x (m)	m	P_H 탄성 (kN/m)	L 탄성 (m)	P_H 도표 (kN/m)	L 도표 (m)	상태
0.30	0.020	40.32	14.70	1.99	8.81	경우 1
1.00	0.067	12.09	14.01	1.99	8.81	경우 1
2.00	0.133	6.03	13.05	1.99	8.81	경우 1
3.00	0.200	4.00	12.15	1.99	8.81	경우 1
4.00	0.267	2.97	11.33	1.99	8.81	경우 1
5.00	**0.333**	**2.34**	**10.59**	**1.99**	**8.81**	**경우 1**
6.00	0.400	1.91	9.94	1.99	8.81	경우 1
8.00	0.533	1.35	8.87	1.38	7.61	경우 2
10.00	0.667	1.00	8.05	0.9755	6.74	경우 2
15.00	1.000	0.5213	6.80	0.4402	5.45	경우 2

x ≤ 6 m: 도표는 1.99 kN/m와 L = 8.81 m를 주며 거리는 영향을 미치지 않는다; 탄성해의 P_H는 하중이 가까워질수록 급격히 증가한다(x = 0.3 m일 때 40.32 kN/m). **x > 6 m**: 두 방법은 서로 가까워지며, 탄성해의 합력은 더 높은 위치에 작용한다.

풀이 (2/3)

풀이

1 m = 10/15 = 0.667 > 0.4: 도표 경우 2. 탄성: I_0, I_1, P_H, L

$$I_0 = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{m} - \frac{m^2}{(1+m^2)^{3/2}}\right] = 0.3960 \qquad I_1 = I_0 - \frac{1}{\pi(1+m^2)^{3/2}} = 0.2126$$

$$P_H = \frac{38}{15} \times 0.3960 = \mathbf{1.00}\ \text{kN/m} \qquad L = 15 \times \frac{0.2126}{0.3960} = \mathbf{8.05}\ \text{m}$$

2 도표 (경우 2): 예제 2와 같은 닫힌 형태의 식, a = m² 및 계수 1.77 m²

$$I_0 = \int_0^1 f\, dn = 0.3851 \qquad I_1 = \int_0^1 f\,(1-n)\, dn = 0.1730$$

$$P_H = \frac{38}{15} \times 0.3851 = \mathbf{0.9755}\ \text{kN/m} \qquad L = 15 \times \frac{0.1730}{0.3851} = \mathbf{6.74}\ \text{m}$$

x = 10 m: 탄성 **1.00 kN/m**, L = 8.05 m; 도표 **0.9755 kN/m**, L = 6.74 m(표의 해당 행).

풀이 (3/3)

풀이

x (m)	계산점 x (m)	P_H 탄성 (kN/m)	L (m)	$\sigma_{H,max}$ 탄성 (kPa)	P_H 도표 (kN/m)
0.05	**0.30**	40.32	14.70	115.4	1.995
0.10	**0.30**	40.32	14.70	115.4	1.995
0.20	**0.30**	40.32	14.70	115.4	1.995
0.30	0.30	40.32	14.70	115.4	1.995
0.50	0.50	24.19	14.50	41.5	1.995

x < 0.30 m: 하중은 0.30 m에서 계산하며, 이 거리에서도 정점은 115.4 kPa이다.

x (m)	m	상태	P_H 도표 (kN/m)	L 도표 (m)
5.99	0.3993	경우 1	1.9950	8.8069
6.00	0.4000	경우 1	1.9950	8.8069
6.000001	0.400000	경우 2	2.0178	8.8069
6.01	0.4007	경우 2	2.0137	8.8000

도표는 **m = 0.4** 경계를 넘을 때 P_H를 1.14% 증가시키며, L은 연속을 유지한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

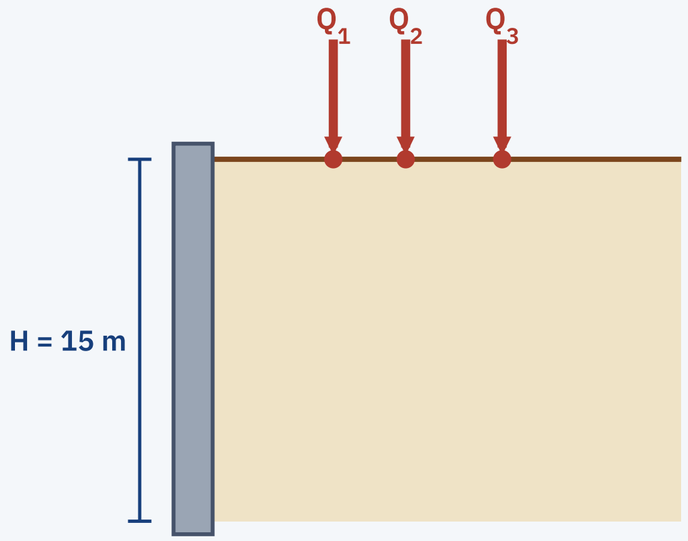
예제

조건

벽체	$H = 15.00$ m
하중	$Q_1 = 38$ kN ($x_1 = 5$ m), $Q_2 = 60$ kN ($x_2 = 8$ m), $Q_3 = 25$ kN ($x_3 = 12$ m); 모두 벽체에 수직인 한 직선 위에 있다
방법	탄성 (강성 벽체); 비교용 도표

구하는 값

각 하중의 $P_{H,i}$와 L_i 값; 합계 P_H, L 및 합산 토압의 최대값.



풀이 (1/3)

풀이

하중	x (m)	Q_p (kN)	m	I_0	I_1	$P_{H,i}$ (kN/m)	L_i (m)
Q_1	5	38	0.3333	0.92473	0.65295	2.3427	10.592
Q_2	8	60	0.5333	0.53463	0.31597	2.1385	8.865
Q_3	12	25	0.8000	0.30089	0.14933	0.5015	7.444

1 각 하중을 자체 m 값에서 계산 (탄성)

$$P_{H,i} = \frac{Q_{p,i}}{H}\, I_{0,i} \qquad L_i = H\,\frac{I_{1,i}}{I_{0,i}} \qquad \text{예: } P_{H,2} = \frac{60}{15} \times 0.53463 = \mathbf{2.1385}\ \text{kN/m}$$

각 하중은 자신의 거리 x_i에 작용한다; 모두 벽체의 같은 단면에 작용하므로 합력을 합산할 수 있다.

풀이 (2/3)

풀이

2 전체 합력 (탄성)

$$P_H = \sum P_{H,i} = 2.3427 + 2.1385 + 0.5015 = \mathbf{4.9827}\ \text{kN/m}$$

3 작용선: 저면에 대한 모멘트의 평형

$$L = \frac{\sum P_{H,i} L_i}{P_H} = \frac{2.343(10.592) + 2.139(8.865) + 0.501(7.444)}{4.983} = \mathbf{9.534}\ \text{m}$$

방법	$P_{H,1}$	$P_{H,2}$	$P_{H,3}$	P_H 합계 (kN/m)	L 전체 (m)	지표에서 (m)
탄성	2.3427	2.1385	0.5015	**4.9827**	**9.534**	5.466
노모그램	1.9950	2.1774	0.4624	**4.6347**	**7.975**	7.025

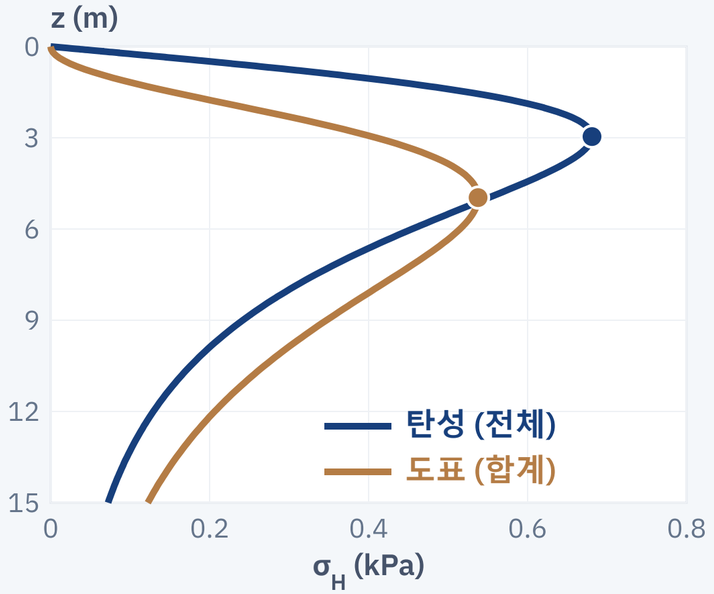
세 하중의 전체 합력은 탄성해에서 **4.98 kN/m**, 도표에서 **4.63 kN/m**이며, 작용선은 저면으로부터 9.53 m와 7.97 m 위에 있다.

풀이 (3/3)

풀이

z (m)	$\sigma_{H,1}$ (kPa)	$\sigma_{H,2}$ (kPa)	$\sigma_{H,3}$ (kPa)	합계 σ_H (kPa)
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	**0.0000**
1.5	0.3511	0.1540	0.0199	**0.5250**
3.0	0.4038	0.2416	0.0356	**0.6810**
4.5	0.2964	0.2533	0.0447	**0.5944**
6.0	0.1873	0.2200	0.0475	**0.4548**
9.0	0.0706	0.1304	0.0407	**0.2417**
12.0	0.0293	0.0705	0.0293	**0.1291**
15.0	0.0138	0.0387	0.0197	**0.0722**

압력을 합산한다(응력 증가량): 탄성 합계의 최댓값은 **0.6811 kPa**(z = 2.96 m)이고, 도표에서는 0.5377 kPa(z = 4.97 m)이다. 최댓값은 가장 큰 하중(Q_2)의 비중이 두드러지는 깊이에서 나타난다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

$m = x/H$, $n = z/H$; 탄성(강성 벽체): **$\sigma_H = (3Q_p/\pi)\, x^2 z/R^5$**, 최대 위치 $z = x/2$, $\sigma_{H,max} = 0.2733\, Q_p/x^2$; **$x_{min} = 0.30$ m**

도표: 경우 1 ($m \le 0.4$): $\sigma_H = 0.28\,(Q_p/H^2)\, n^2/(0.16 + n^2)^3$; 경우 2: $1.77\,(Q_p/H^2)\, m^2 n^2/(m^2 + n^2)^3$; 0.4H 이내에서는 거리의 영향이 없다

예제($H = 15$ m, $x = 5$ m, $Q_p = 38$ kN): 탄성해 최대값 0.4154 kPa ($z = 2.5$ m), $I_0 = 0.9247$, $I_1 = 0.6530$, **$P_H = 2.34$ kN/m**, $L = 10.59$ m; 도표 $P_H = 1.99$ kN/m, $L = 8.81$ m

평면상: 탄성해 $(R_0/R)^5$, 도표 $\cos^2(1.1\theta)$ ($\theta \approx 81.8°$까지); **복수 하중**(최대 3개): 압력과 $P_{H,i}$를 합산하고, L은 모멘트 평형에서 구한다

비교: $m \le 0.4$에서 도표 값은 일정하다; 탄성해의 P_H는 하중이 가까워질수록 증가한다; P_H는 하중이 놓인 단면에서의 값이며 벽체 길이를 곱하지 않는다

참고문헌

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

Terzaghi, K. (1954). Anchored bulkheads. Transactions of the ASCE, 119, 1243–1280.

NAVFAC DM-7.02 (1986). Foundations and Earth Structures. Naval Facilities Engineering Command.

Boussinesq, J. (1883). Application des Potentiels à l’Étude de l’Équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. Gauthier-Villars, Paris.

Mindlin, R.D. (1936). Discussion: Pressure distribution on retaining walls. Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard, Vol. III, 155–156.

Spangler, M.G. and Mickle, J.L. (1956). Lateral pressures on retaining walls due to backfill surface loads. Highway Research Board Bulletin 141.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed.

Frazee, G. (2021). New formulations of Boussinesq solution for vertical and lateral stresses in soil. ASCE Practice Periodical on Structural Design and Construction, 26(2).

USS Steel Sheet Piling Design Manual (1984); California Department of Transportation, Trenching and Shoring Manual — 도표법.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈도 같은 값을 제시한다. 모듈의 초기 벽체는 H = 15 m, x = 5 m, Q_p = 38 kN이다 (탄성 방법).

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

벽체, 집중하중(최대 3개)과 방법을 GeoTerva에 입력한다. 모듈은 압력 분포, 평면상 분포, 합력과 작용선, 단계별 풀이와 보고서를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com