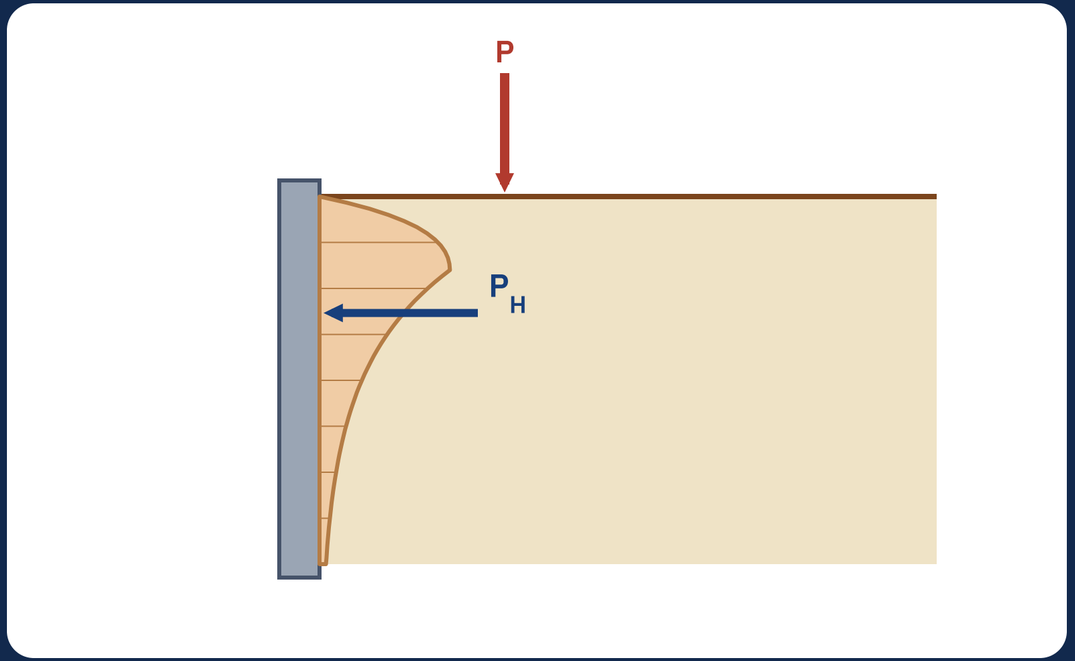
지반공학 강의 자료 · 상부하중

선 상재하중

강의: 벽체에 평행한 선하중이 벽체에 일으키는 측방 압력; 두 가지 방법, 합력과 작용선, 계산 예제.

- m = x/H · n = z/H
- 탄성 강성 벽체
- Terzaghi–NAVFAC 도표
- $I_0 \cdot I_1$
- P_H 및 z_R



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 선하중의 **무차원** 기하: 하중 거리 **m = x/H**와 깊이 **n = z/H**
- **탄성(강성 벽체)** 해: 반무한 매질 응력의 두 배; x_{min} **= 0.30 m** 규칙
- **Terzaghi–NAVFAC 도표**: m > 0.4인 경우와 m ≤ 0.4인 경우; 0.4H 이내에서 거리의 영향이 없음
- 합력 $P_H = P \cdot I_0$과 작용선 $z_R = H \cdot I_1/I_0$을 닫힌 형태의 식으로
- 거리, 벽체 높이 및 하중에 따른 두 방법의 비교

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 = 25 m, 선하중 P = 100 kN/m, 벽체로부터의 거리 x = 5 m. 힘은 벽체의 단위 길이당 값(kN/m)이다.

벽체에 작용하는 선하중

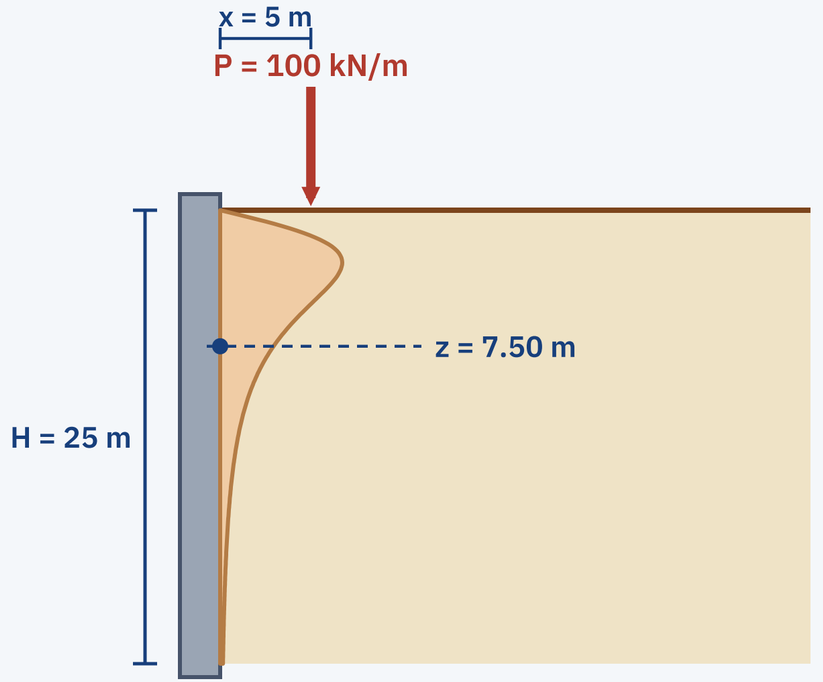
이론

벽체에 평행하며 단위 길이당 힘으로 주어지는 지표면 선하중 **P**가 벽체로부터 수평 거리 **x**에 있다

상재하중에 의한 측압은 무차원 하중 거리 **m = x/H**와 무차원 벽체 깊이 **n = z/H**에 따라 달라진다

모듈은 **탄성(강성 벽체)** 해와 **Terzaghi–NAVFAC 도표**의 두 가지 방법을 제공한다

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



P — 벽체와 평행한 단위길이당 지표면 선하중

x = mH — 벽체에서 하중까지의 수평거리; **z = nH** — 지표면으로부터의 깊이

σ_H, P_H, z_R — 측방압력, 합력, 지표면에서 합력 작용점까지의 깊이

강성 벽체: 탄성 응력의 두 배

이론

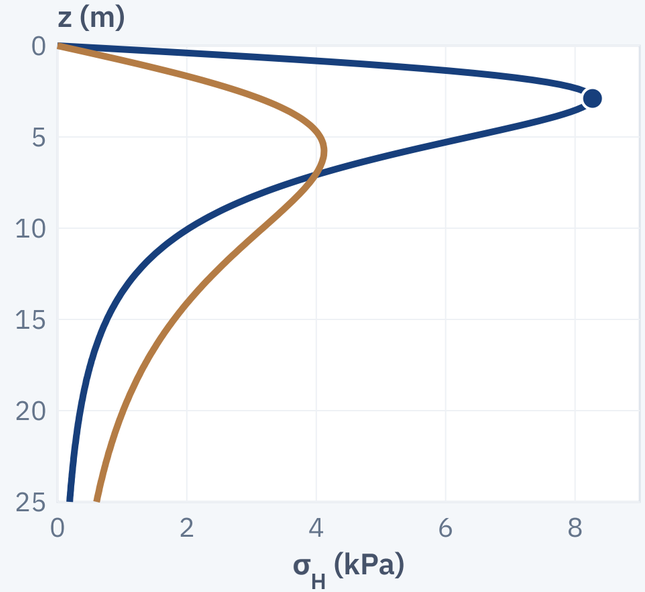
탄성 반무한 매질에서 선하중이 만드는 수평응력(Flamant, Boussinesq)의 **2배**이다: 변위하지 않는 벽체는 벽면에 접한 지반의 움직임을 구속한다

모든 거리에서 성립하며, 최대 압력은 **n = m/√3** 깊이에서 발생한다

x_{min} = 0.30 m보다 가까운 하중은 이 거리에서 계산한다: 하중이 벽체에 가까워질수록 최대 압력은 한없이 증가한다 (합력은 유한하게 유지된다)

$$\sigma_H = \frac{4P}{\pi H} \cdot \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2}$$

탄성 분포 (m = 0.2)



경우 1 (m ≤ 0.4)과 경우 2 (m > 0.4)

이론

m > 0.4이면 탄성해와 **같은 식**을 쓰고, **m ≤ 0.4**이면 선도는 m = 0.4에서 **일정하게 유지**한다(m을 포함하지 않는 경우 1)

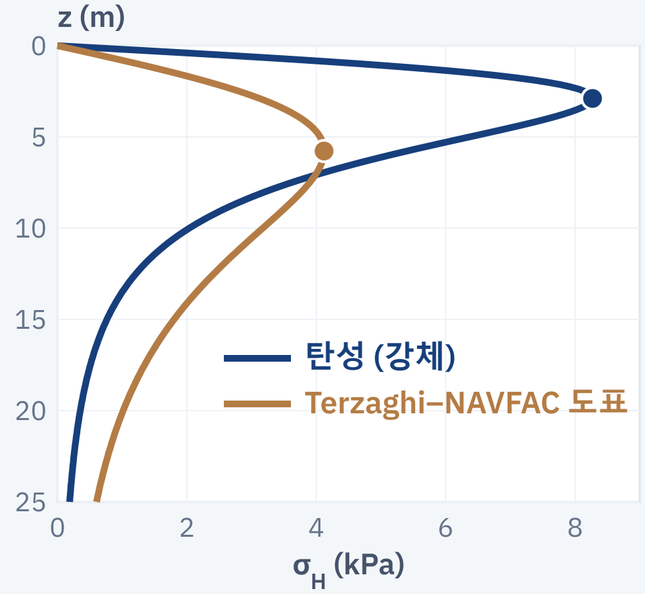
계수 0.203은 4 × 0.16/π 값을 반올림한 것이며, 따라서 **0.4H 이내에서는 거리의 영향이 없다**

주어진 모델에서 m은 일정하며, n은 깊이에 따라 변한다

$$\sigma_H = \frac{P}{H} \cdot \frac{0.203\, n}{(0.16 + n^2)^2} \qquad m \le 0.4 \text{ (경우 1)}$$

$$\sigma_H = \frac{4P}{\pi H} \cdot \frac{m^2\, n}{(m^2 + n^2)^2} \qquad m > 0.4 \text{ (경우 2)}$$

두 방법의 분포 (m = 0.2)



면적, 1차 모멘트 및 I_0, I_1

이론

두 방법 모두 **합력 선도의 면적**이 합력이고, 표면으로부터의 깊이는 **1차 모멘트가 평형을 이루는 점**이다; σ_H를 n의 함수로 쓰면 하중과 높이가 적분 밖으로 나온다

탄성 및 도표(**m > 0.4**)에 대한 닫힌 형태 식; 도표 합력 ≈ 0.64P/(1 + m²). **m ≤ 0.4** 도표: I_0 = 0.5469 (도표의 0.55P 값)

$$P_H = \int_0^H \sigma_H \, dz = P \, I_0 \qquad z_R = \frac{\int_0^H z \, \sigma_H \, dz}{P_H} = H \, \frac{I_1}{I_0}$$

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

$$I_0 = 0.1015 \left(\tfrac{1}{0.16} - \tfrac{1}{1.16} \right) = 0.5469 \qquad I_1 = 0.203 \left[\frac{\tan^{-1} 2.5}{0.8} - \frac{1}{2.32} \right] \; (m \le 0.4)$$

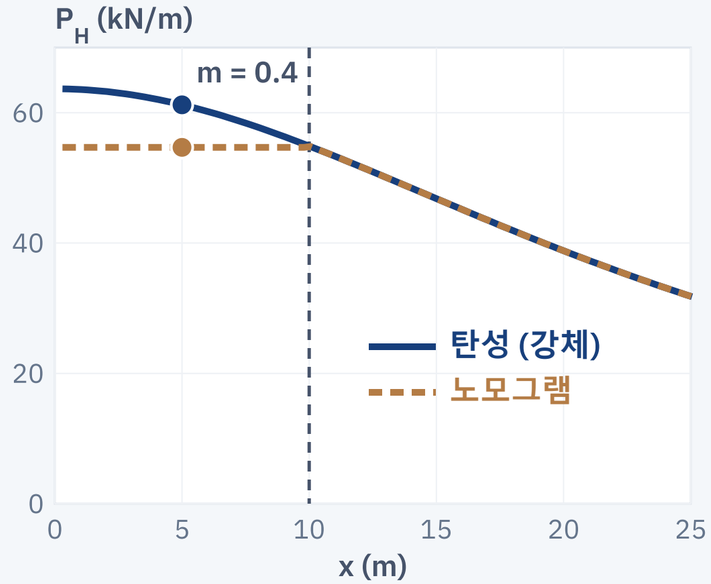
합력과 작용선, 하중 거리 기준

이론

x (m)	m	P_H (탄성)	z_R (탄성)	P_H 도표	z_R 도표	상태
0.50	0.020	63.64	0.77	54.69	9.81	경우 1
1.00	0.040	63.56	1.49	54.69	9.81	경우 1
2.00	0.080	63.26	2.84	54.69	9.81	경우 1
5.00	0.200	61.21	6.14	54.69	9.81	경우 1
8.00	0.320	57.75	8.56	54.69	9.81	경우 1
10.00	0.400	54.88	9.81	54.69	9.81	경우 1
12.50	0.500	50.93	11.05	50.93	11.05	경우 2
15.00	0.600	46.81	12.02	46.81	12.02	경우 2
25.00	1.000	31.83	14.27	31.83	14.27	경우 2

m ≤ 0.4: 도표가 같은 P_H 값과 z_R 값을 준다. 탄성해는 하중이 가까워질수록 P_H 값을 키우고 z_R 값을 위로 끌어올린다

m > 0.4: 두 방법의 결과가 동일하다



문제

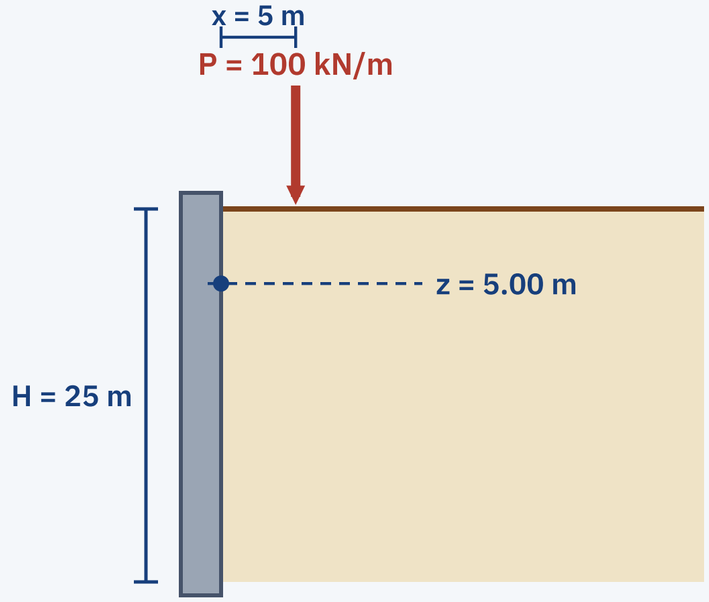
예제

조건

벽체와 하중	$H = 25.00$ m; 선하중 $P = 100.0$ kN/m, $x = 5.00$ m
깊이	$z = 5.00$ m

구하는 값

m, **n** 및 σ_H: 먼저 탄성 해(강성 벽체), 이어서 Terzaghi–NAVFAC 도표.



풀이 (1/2)

풀이

1 비율

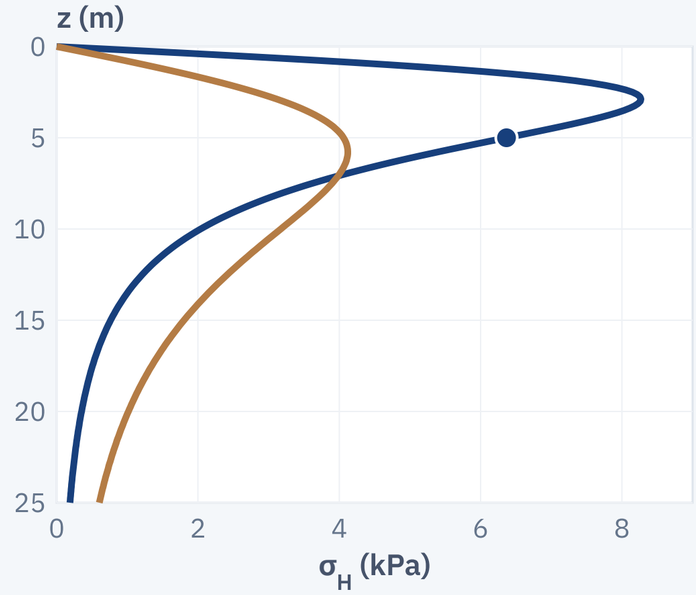
$$m = \frac{x}{H} = \frac{5}{25} = \mathbf{0.20} \qquad n = \frac{z}{H} = \frac{5}{25} = \mathbf{0.20}$$

2 탄성 (강성 벽체) 압력

$$\sigma_H = \frac{4 \times 100}{\pi \times 25}\left[\frac{0.20^2 \times 0.20}{(0.20^2 + 0.20^2)^2}\right]$$

$$\sigma_H = 5.0930 \times 1.25 = \mathbf{6.37}\ \text{kPa}$$

z = 5 m에서 탄성해는 **6.37 kPa**이다. 이 깊이는 최대 압력(8.27 kPa, z = 2.89 m)이 나타나는 깊이보다 아래이며, 압력 분포는 깊이에 따라 급격히 감소한다.



풀이 (2/2)

풀이

3 경우 선택

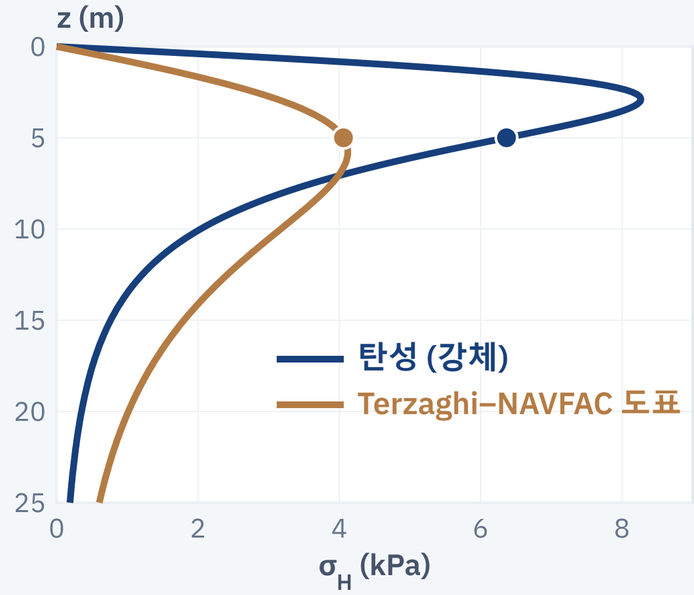
$$m = 0.20 \leq 0.4 \;\Rightarrow\; \text{경우 1 (다이어그램 } m = 0.4\text{에서 고정)}$$

4 도표 압력

$$\sigma_H = \frac{100}{25}\left[\frac{0.203 \times 0.20}{(0.16 + 0.20^2)^2}\right]$$

$$\sigma_H = 4.00 \times 1.015 = \mathbf{4.06}\ \text{kPa}$$

도표는 **4.06 kPa**, 탄성해는 **6.37 kPa**이다: 이 깊이에서 도표 값은 탄성해 값의 64% 수준이다. 도표는 근접 하중에 의한 압력을 깊이 방향으로 분산시킨다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체와 하중	$H = 25.00$ **m,** $P = 100.0$ **kN/m,** $x = 5.00$ **m** $(m = 0.20)$
깊이	$z = 0$ **–** 25 **m,** 2.5 **m 간격**

구하는 값

σ_H 분포 (두 방법); **최대 압력**과 그 깊이.

풀이 (1/2)

풀이

z (m)	n = z/H	σ_H 탄성 (kPa)	σ_H 도표 (kPa)
0.00	0.00	0.000	0.000
2.50	0.10	8.149	2.810
5.00	**0.20**	**6.366**	**4.060**
7.50	0.30	3.616	3.898
10.00	0.40	2.037	3.172
12.50	0.50	1.211	2.415
15.00	0.60	0.764	1.802
17.50	0.70	0.508	1.345
20.00	0.80	0.352	1.015
22.50	0.90	0.254	0.777
25.00	1.00	0.188	0.603

탄성 압력은 지표면 바로 아래에서 최댓값에 이르고 깊이에 따라 감소하며, 도표는 더 완만한 분포를 주고 더 깊은 곳에서 최댓값을 보인다. z = 5.00 m인 행이 예제 1이다.

풀이 (2/2)

풀이

1 탄성: 최대점 n = m/√3

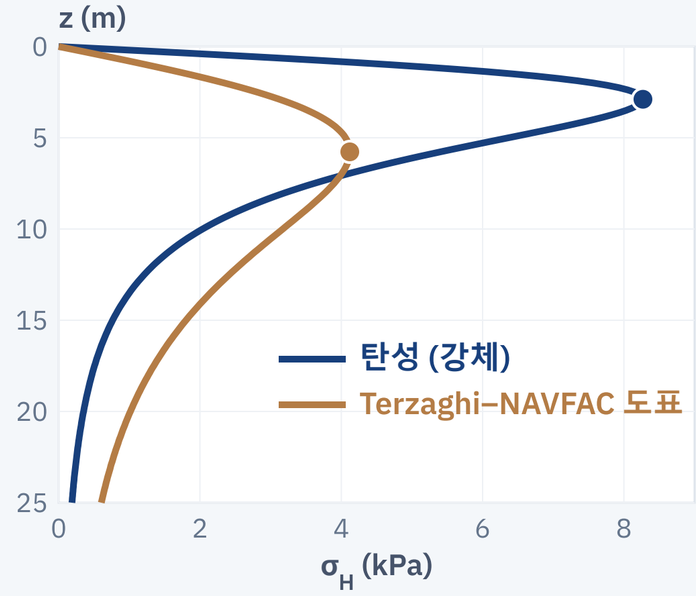
$$n = \frac{m}{\sqrt{3}} = \frac{0.20}{1.7321} = 0.11547 \;\Rightarrow\; z = nH = \mathbf{2.887}\ \text{m}$$

$$\sigma_{H,max} = \frac{9P}{4\sqrt{3}\,\pi\, x} = \frac{9 \times 100}{4(1.7321)\pi(5)} = \mathbf{8.270}\ \text{kPa}$$

2 도표 (경우 1): 최대점 n = 0.4/√3

$$n = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.23094 \;\Rightarrow\; z = \mathbf{5.774}\ \text{m}$$

$$\sigma_{H,max} = 4\left[\frac{0.203 \times 0.23094}{(0.16 + 0.05333)^2}\right] = \mathbf{4.120}\ \text{kPa}$$



탄성해의 최댓값은 **8.27 kPa**(z = 2.89 m), 도표의 최댓값은 **4.12 kPa**(z = 5.77 m)이다. 탄성해는 벽체 상부에 집중되고, 도표는 더 아래에서 절반 크기의 최댓값을 준다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

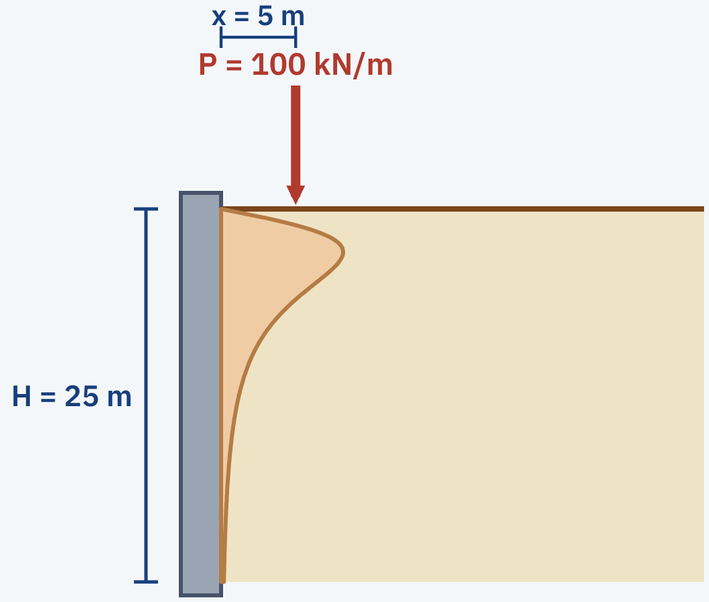
예제

조건

벽체와 하중	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m, $x = 5.00$ m
방법	**탄성 (강성 벽체) 및 Terzaghi–NAVFAC 도표**

구하는 값

I_0, I_1, 합력 P_H, z_R 및 저면으로부터의 높이(두 방법에 대해).



풀이 (1/2)

풀이

1 I_0 (면적)

$$I_0 = \frac{2/\pi}{1+m^2} = \frac{0.63662}{1+0.20^2} = \mathbf{0.61213}$$

2 I_1 (모멘트): $(2/\pi)[m\tan^{-1}(1/m) - m^2/(1+m^2)]$

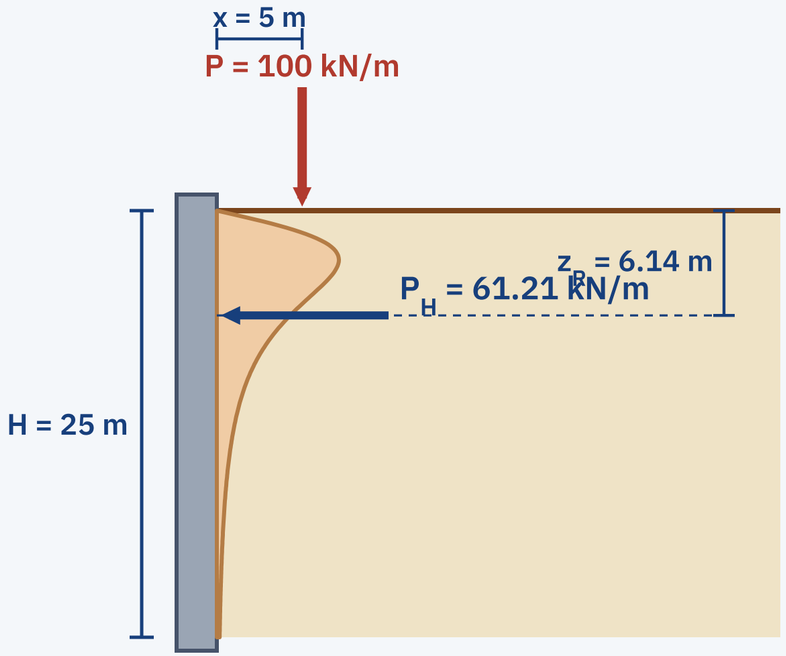
$$I_1 = 0.63662\,[0.20(1.37340) - 0.03846] = \mathbf{0.15038}$$

3 합력과 작용선

$$P_H = P\,I_0 = 100 \times 0.61213 = \mathbf{61.21}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = H\frac{I_1}{I_0} = 25 \times \frac{0.15038}{0.61213} = \mathbf{6.14}\ \text{m}$$

탄성: **P_H = 61.21 kN/m**, 지표면 아래 **6.14 m** 지점(저면 위 18.86 m).



풀이 (2/2)

풀이

4 I_0 및 I_1 (m ≤ 0.4, 경우 1)

$$I_0 = 0.1015\left(\frac{1}{0.16} - \frac{1}{1.16}\right) = \mathbf{0.5469}$$

$$I_1 = 0.203\left[\frac{\tan^{-1} 2.5}{0.8} - \frac{1}{2.32}\right]$$

$$I_1 = 0.203\,[1.48786 - 0.43103] = \mathbf{0.21454}$$

5 합력과 작용선

$$P_H = 100 \times 0.5469 = \mathbf{54.69}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = 25 \times \frac{0.21454}{0.5469} = \mathbf{9.81}\ \text{m}$$

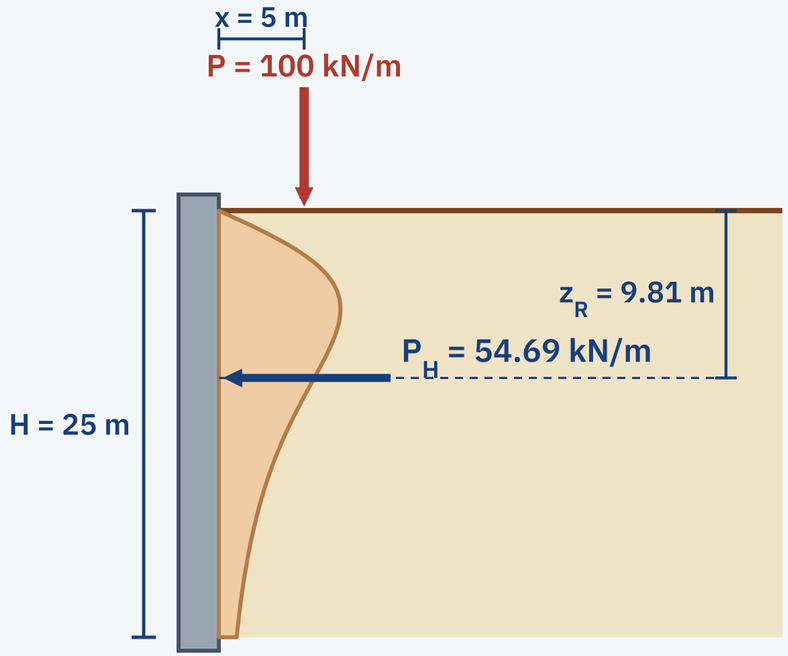


도표: **P_H = 54.69 kN/m, z_R = 9.81 m**. 탄성해에 비해 합력은 10.7% 작고 작용선은 3.67 m 더 아래에 있다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체와 하중	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m
거리	$x = 0.5;\ 1;\ 2;\ 5;\ 8;\ 10;\ 12.5;\ 15;\ 25$ m

구하는 값

두 방법에 대한 P_H와 z_R; x = 12.5 m에 대한 수계산 검토.

풀이 (1/2)

풀이

x (m)	m	P_H 탄성 (kN/m)	z_R 탄성 (m)	P_H 도표 (kN/m)	z_R 도표 (m)	상태
0.50	0.020	63.64	0.77	54.69	9.81	경우 1
1.00	0.040	63.56	1.49	54.69	9.81	경우 1
2.00	0.080	63.26	2.84	54.69	9.81	경우 1
5.00	**0.200**	**61.21**	**6.14**	**54.69**	**9.81**	**경우 1**
8.00	0.320	57.75	8.56	54.69	9.81	경우 1
10.00	0.400	54.88	9.81	54.69	9.81	경우 1
12.50	0.500	50.93	11.05	50.93	11.05	경우 2
15.00	0.600	46.81	12.02	46.81	12.02	경우 2
25.00	1.000	31.83	14.27	31.83	14.27	경우 2

x ≤ 10 m (m ≤ 0.4): 도표는 54.69 kN/m와 9.81 m를 주며 거리의 영향은 없다. 탄성해의 합력은 하중이 멀어질수록 서서히 감소하고(63.64 → 54.88 kN/m) 작용선은 깊어진다. **m > 0.4**: 두 방법이 동일하다.

풀이 (2/2)

풀이

1 비율과 상태

$$m = \frac{12.5}{25} = \mathbf{0.50} > 0.4 \;\Rightarrow\; \text{도표 경우 2: 탄성해와 동일한 식}$$

2 I_0 및 I_1

$$I_0 = \frac{2/\pi}{1 + 0.50^2} = \frac{0.63662}{1.25} = \mathbf{0.50930}$$

$$I_1 = 0.63662\,[0.50(1.10715) - 0.2] = \mathbf{0.22509}$$

3 합력과 작용선

$$P_H = 100 \times 0.50930 = \mathbf{50.93}\ \text{kN/m} \qquad z_R = 25 \times \frac{0.22509}{0.50930} = \mathbf{11.05}\ \text{m}$$

x = 12.5 m에 대해 두 방법 모두 **50.93 kN/m** 및 **11.05 m**를 준다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

벽체와 하중	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m
인접 하중	$x = 0.05;\ 0.1;\ 0.2;\ 0.3;\ 0.5;\ 1$ m
한계	**도표:** $x = 9.99;\ 10;\ 10.01$ m ($0.4H = 10$ m)

구하는 값

x_{min} 규칙의 영향; 탄성 해의 최대 압력; 도표의 m = 0.4 한계에서의 거동.

풀이 (1/2)

풀이

x (m)	계산점 x (m)	P_H 탄성 (kN/m)	z_R 탄성 (m)	$\sigma_{H,max}$ 탄성 (kPa)	z (m)	P_H 도표 (kN/m)
0.05	**0.30**	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.10	**0.30**	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.20	**0.30**	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.30	0.30	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.50	0.50	63.64	0.77	82.7	0.29	54.69
1.00	1.00	63.56	1.49	41.3	0.58	54.69

x < 0.30 m인 하중은 0.30 m에서 계산한다. 합력, 작용선, 최대 압력은 0.30 m에서의 값과 같으며, 탄성해의 최대값은 이 거리에서 **137.8 kPa**(z = 0.17 m)에 이른다. 도표는 모든 거리에서 54.69 kN/m를 준다.

풀이 (2/2)

풀이

1 0.203과 $4 \times 0.16/\pi$

$$\frac{4 \times 0.16}{\pi} = 0.2037 \approx 0.203 \;\Rightarrow\; \frac{I_0(m = 0.4^{+})}{I_0(\text{경우 } 1)} = \frac{0.63662/1.16}{0.5469} = \mathbf{1.0033}$$

2 한계 양쪽의 도표 합력

x (m)	m	상태	P_H 도표 (kN/m)	z_R 도표 (m)
9.99	0.3996	경우 1	54.6875	9.8074
10.00	0.4000	경우 1	54.6875	9.8074
10.01	0.4004	경우 2	54.8659	9.8130

반올림 때문에 합력은 m = 0.4 한계를 지날 때 약 **0.33%** 급변한다(54.69 → 54.87 kN/m); 작용선 9.807 → 9.813 m. 급변은 작으므로 도표의 공표된 계수를 그대로 유지한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

하중	$P = 100.0$ **kN/m,** $x = 5.00$ **m**
높이	$H = 5,\ 10,\ 25,\ 50,\ 100$ **m**
하중 강도	$P = 50,\ 100,\ 200$ **kN/m** ($H = 25$ **m**)

구하는 값

두 방법에 대한 P_H 및 z_R; P와 H의 영향.

풀이

풀이

H (m)	m	P_H (탄성)	z_R (탄성)	P_H 도표	z_R 도표	상태
5	1.000	31.83	2.85	31.83	2.85	경우 2
10	0.500	50.93	4.42	50.93	4.42	경우 2
25	0.200	61.21	6.14	54.69	9.81	경우 1
50	0.100	63.03	6.93	54.69	19.61	경우 1
100	0.050	63.50	7.37	54.69	39.23	경우 1

높은 벽체에서는 m이 작아진다: 탄성해의 P_H는 0.64P에 가까워지고, 도표의 P_H는 변하지 않으나(0.5469P) z_R은 H와 함께 커진다.

P (kN/m)	P_H (탄성)	P_H 도표	z_R (탄성)	z_R 도표
50	30.61	27.34	6.14	9.81
100	61.21	54.69	6.14	9.81
200	122.43	109.38	6.14	9.81

합력은 **P**에 비례하여 **선형**으로 증가하며, z_R은 P와 무관하다(탄성 · 도표).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

m = x/H, **n = z/H**; 탄성(강성 벽체): $\sigma_H = (4P/\pi H)\, m^2 n/(m^2 + n^2)^2$, 정점은 n = m/√3에서; $x_{min} = 0.30$ m

도표: m > 0.4에서는 같은 방정식; **m ≤ 0.4**에서는 $\sigma_H = (P/H)\, 0.203\, n/(0.16 + n^2)^2$이며 거리의 영향이 없다

예제(H = 25 m, x = 5 m, P = 100 kN/m): z = 5 m에서 탄성해 6.37, 도표 4.06 kPa; 최대 압력 8.27 kPa(z = 2.89 m)와 4.12 kPa(z = 5.77 m)

합력 $P_H = P \cdot I_0$, $z_R = H \cdot I_1/I_0$: 탄성해 61.21 kN/m, 6.14 m; 도표 54.69 kN/m, 9.81 m

비교: 0.4H 바깥에서는 두 방법이 같고, 그 안쪽에서는 하중이 가까워질수록 탄성 합력이 증가하는 반면 도표 값은 일정하다

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.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈도 같은 값을 준다. 모듈의 초기 벽체는 H = 25 m, x = 5 m, P = 100 kN/m이다 (탄성 방법).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

벽체, 선하중의 크기와 벽체로부터의 거리를 GeoTerva에 입력한다. 모듈은 두 가지 방법으로 압력 분포, 합력, 작용선을 구하고 단계별 풀이와 보고서를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com