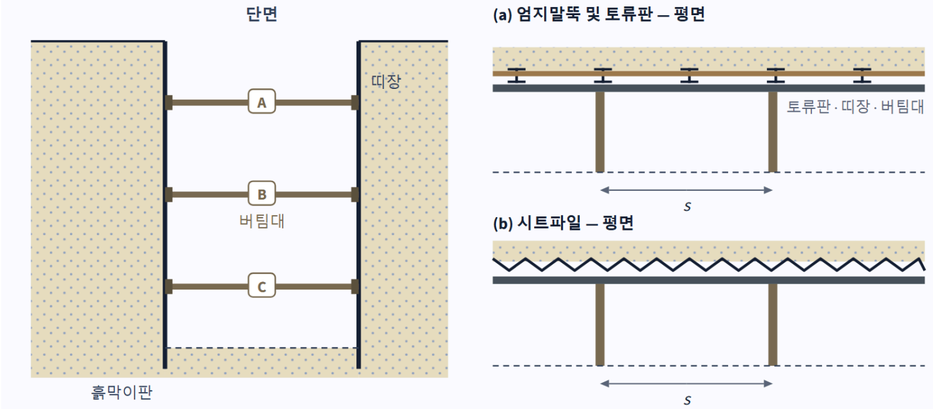
지반공학 강의 자료 · 시트파일 흙막이와 버팀대식 흙막이

모래 지반의 버팀대식 굴착

강의: 모래지반의 버팀대식 굴착; Peck 토압 포락선, 버팀대 하중, 시트파일과 띠장의 단면 결정, 강재 검증 및 저면 파이핑; 주제별 계산 예제.

굴착 흙막이 | Peck 포락선(모래) | 버팀대 · 띠장 · 시트파일 | EN 1993 · AISC 360 | 저면 파이핑



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 버팀대식 흙막이에서 압력이 **Rankine 압력이 아닌 이유**와 **포락선**을 측정된 버팀대 하중으로부터 작성하는 방법
- 모래에 대해서는 **Peck 포락선 $\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$**, 여러 모래층에서는 K_a에 대한 세 가지 규칙
- **물**과 **상재하중**을 포락선 옆에 별도의 분포도로 추가하기
- 포락선에서 **버팀대 하중**으로(힌지 구간, 반력 A, B_1, B_2, C, $P = R \cdot s$)
- **시트파일 벽체**(M_{max}, S)와 **띠장**($M = R\,s^2/8$)의 단면 산정; 강재를 **EN 1993-1-1 및 AISC 360-22**로 검증하기
- 모래 저면에서 **파이핑**(출구 동수경사, $FS = i_{cr}/i_{exit}$) 검토

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

예제 굴착: 모래(γ = 17.6 kN/m³, φ' = 32°), 깊이 H = 8.00 m, 폭 B = 6.00 m; 버팀대는 깊이 1.80 · 4.60 · 7.30 m에 설치되며 수평 간격은 s = 3.00 m이다. 힘은 벽체 1 m당 값이다(버팀대 하중에는 s를 곱함).

지보 시스템과 구성 부재

이론

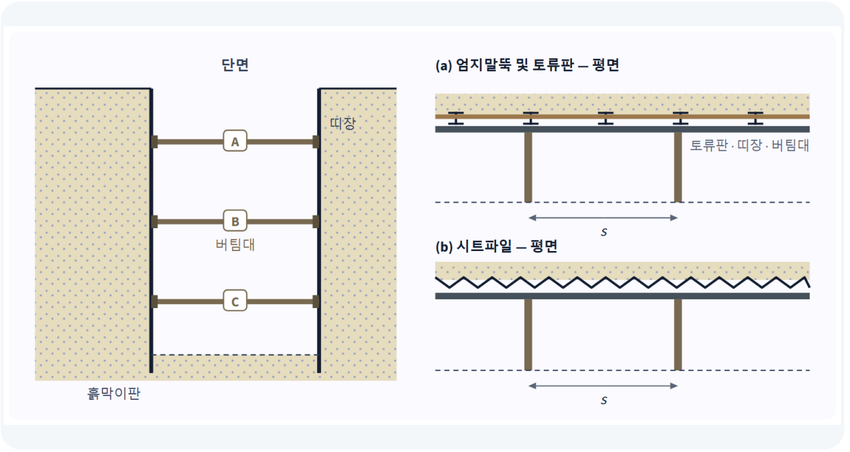
연직 벽면을 가진 깊은 굴착(도심 지하실, 개착식 터널)은 임시 **지지 시스템**으로 열린 상태를 유지한다. 두 가지 방식이 일반적이다. 먼저 타입한 **연직 엄지말뚝**(강재 또는 목재) 사이에 굴착이 진행됨에 따라 수평 목재 토류판을 설치하는 방식, 또는 서로 맞물리는 **시트파일**이 연속 벽체를 이루는 방식이다.

각 버팀대 단에서 굴착이 해당 높이에 도달하는 즉시 수평 **띠장**을 설치한다; **버팀대**는 띠장에서 띠장으로 굴착 폭을 가로지르는, 압축력을 받는 수평 강재 부재이다.

부재를 선정하려면 지보 시스템이 받게 될 측압이 필요하다. 이론은 총 토압 합력을 제공하되 그 **분포**는 제공하지 않는다: 분포는 지반, 시공 순서와 속도, 시공 인력과 장비에 좌우된다.

따라서 설계 압력은 **경험적 포락선**이다: 실제 굴착 현장에서 측정된 버팀대 하중으로부터 역산한 압력의 주위에 그려진다.

시공 시 버팀대 간격은 연직 방향으로 약 2.75 m 이상이어야 한다.



벽체 상단을 중심으로 회전

이론

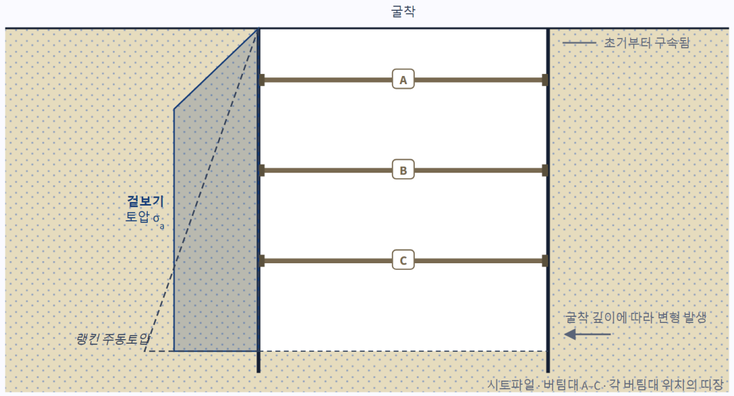
캔틸레버식 옹벽은 저면을 중심으로 회전하며, Rankine 주동토압(상단에서 0, 하단에서 최대)이 이를 잘 설명한다. **버팀대식 벽체는 반대로 거동한다**: 첫 번째 버팀대는 굴착이 얕을 때 설치되므로 상부는 거의 움직이지 않는다. 이후의 각 단계는 버팀대를 설치하기 전에 굴착되고 그 사이의 시간은 깊이에 따라 길어지므로, 벽체는 점차 더 아래쪽에서 휘어진다: 굴착이 끝났을 때 벽체는 **상단을 중심으로 회전한 상태**가 된다.

상부에서는 압력이 **정지토압 값**에 가깝게 유지된다 (지반의 이동이 매우 작았다).

하부에서는 압력이 Rankine 주동값 아래로 떨어질 수 있다(지반은 이미 소성평형을 한참 넘어섰다).

토압 합력 P_a는 삼각형의 1/3 지점보다 **더 위쪽**에 작용한다: 저면으로부터 n_aH 높이에, $n_a > 1/3$.

전체 추력은 대수나선 쐐기로 구한다($r = r_o e^{\theta \tan \varphi'}$); 사질토에서는 Coulomb 값보다 15–20% 크다. 그러나 추력의 분포와 n_a가 지반과 현장에 따라 달라지므로 굴착은 **포락선**으로 설계한다.



포락선은 어떻게 작성되었는가?

이론

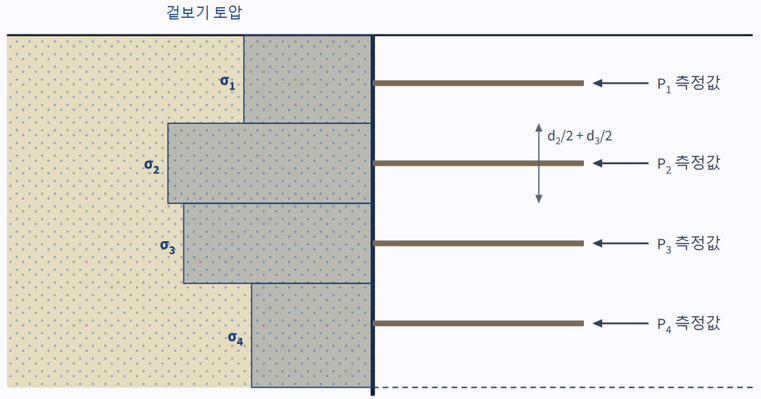
압력은 지점마다 달라지며 각 버팀대는 마주칠 수 있는 **최대 하중**을 기준으로 단면을 정해야 한다. 포락선은 이를 위해 작성된다. 계측을 갖춘 굴착에서 각 버팀대의 하중을 측정하고, 그 버팀대가 지지하는 벽체 구간(수평 간격 s × 위와 아래 버팀대까지 거리의 절반)으로 나누어 이 구간에 대한 **겉보기 압력**으로 환산한다:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1은 첫 번째 버팀대의 깊이이고, d_i는 이후 버팀대 사이의 간격이다. 굴착 단계마다 겹쳐 그린 모든 분포도의 외곽선이 하나의 **겉보기 토압 포락선**이다.

Peck의 포락선은 베를린, 뮌헨, 뉴욕 지하철 굴착에서 측정한 모래 하중에 근거하며, 그는 연약~중간 점토와 단단한 점토에 대해서도 같은 방법으로 포락선을 작성하였다.

포락선은 어느 순간에 벽체에 작용하는 압력이 **아니다**: 포락선에서 한 버팀대에 대해 취한 하중은 측정된 하중의 안전 측에 놓이도록 그려져 있다.



각 버팀대 하중을 해당 부담 영역으로 분배: s × (상하 인접 버팀대까지 거리의 절반 합)

$\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$, 전체 높이에 걸쳐

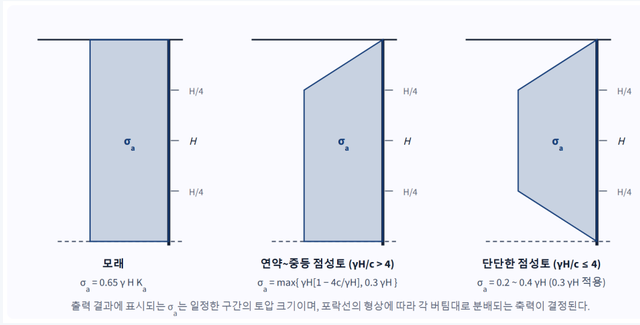
이론

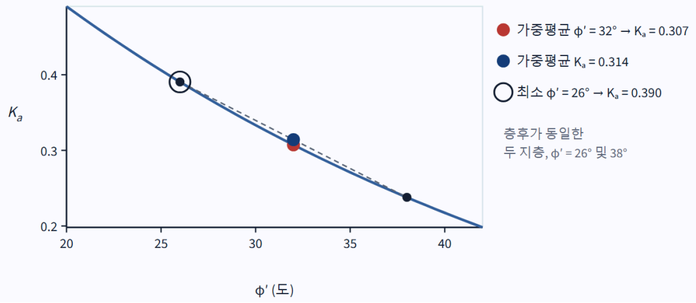
모래에서 Peck 포락선은 **직사각형**이다: 굴착 높이 전체에 걸쳐 단일 압력이며, Rankine 주동 삼각형 최대 압력의 65%이다:

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

포락선은 다음 조건에서 제시된다: 굴착 깊이 약 6 m 초과; **지하수위가 굴착저면 아래**; 모래는 배수 상태(간극수압 0).

포락선에는 단일 K_a가 필요하나, **여러 모래층**에 대해서는 출처가 규칙을 제시하지 않는다. 세 가지 규칙을 사용하는데, K_a가 φ′에 대해 아래로 볼록한 함수이므로(곡선 내부에서 취한 평균은 곡선 아래에 놓인다) 결과가 일치하지 않는다. 세 규칙은 $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$, 평균 $K_a = \Sigma K_{a,i} H/H$, $K_a(\varphi'_{min})$이다.





문제

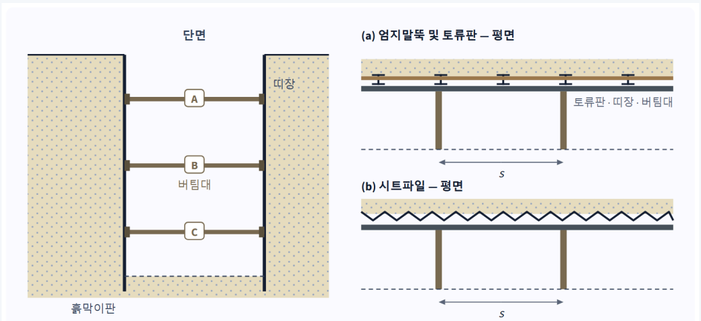
예제

조건

굴착	$H = 8.00$ m, 단일 모래 $\gamma = 17.6$ kN/m³, $\varphi' = 32^\circ$
3층 지반 주상도	0–3 m: $\gamma = 17$, $\varphi' = 28^\circ$; 3–6 m: 18, 38°; 6 m 아래: 18.5, 33° (동일한 굴착)

구하는 값

(a) K_a와 σ_a; (b) 세 지층으로 이루어진 지반 주상도에서 세 가지 규칙에 따른 K_a, σ_a 값.



풀이

풀이

1 (a) 단일 모래

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073}$$

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a = 0.65(17.6)(8.00)(0.3073) = \mathbf{28.12}\ \text{kPa}$$

2 (b) 3개 지층: 굴착 높이 기준 가중평균 $\bar{\gamma} = 17.75$ kN/m³ (지층 두께 3 + 3 + 2 m)

규칙	K_a	$\sigma_a = 0.65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa)	P_{max} (kN)
$K_a(\bar{\varphi} = 33.0°)$	0.2948	27.21	308.5
평균 $K_a = \Sigma K_{a,i} H_i / H$	0.2983	27.53	312.1
$K_a(\varphi'_{min} = 28°)$	0.3610	33.32	377.7

단일 모래에서 포락선은 **28.12 kPa**이다. 세 규칙의 K_a 값은 0.295 – 0.361 범위에서 변하며, 가장 낮은 φ′로 한 계산(σ_a = 33.3 kPa)은 평균값보다 22% 큰 값을 준다; 평균을 취하는 규칙들은 곡선 안에 머물며, **보수적인 것은 φ'_{min}**이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

포락선 안이 아니라 포락선 옆에 더한다

이론

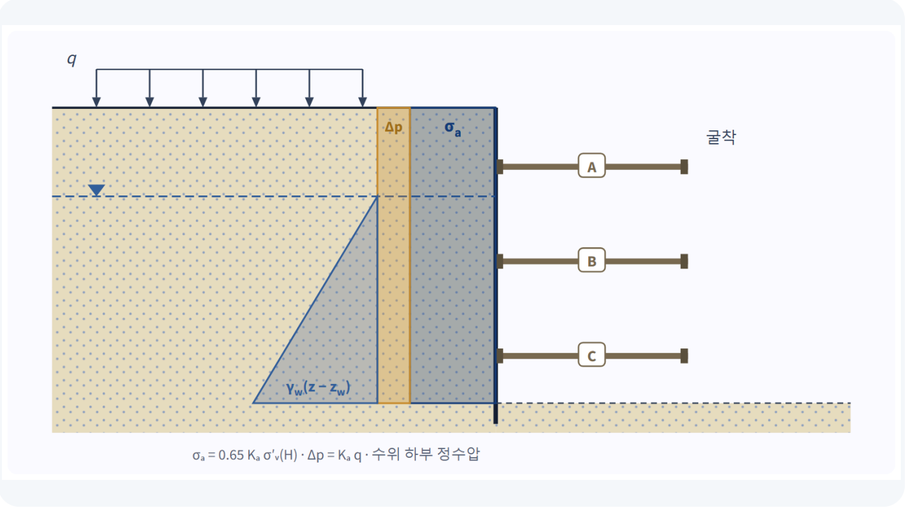
포락선은 굴착저면 아래에 물이 없고 굴착부 옆에 하중이 없는 굴착 사례로부터 작성되었다. 모듈은 이 둘을 포락선 옆에 **별도 선도**로 추가하며, 포락선은 측정된 범위를 넘어 확대 적용하지 않는다.

물: Peck의 모래 포락선은 유효응력 분포도이다. 물이 굴착 내부에 있으면 굴착저면 높이의 상재응력은 유효응력으로 취하며(수면 위는 자연 단위중량, 아래는 수중단위중량), 물은 벽체에 전체 높이에 걸쳐 별도로 작용하고 버팀대가 이 둘을 함께 부담한다.

상재하중 q는 포락선에 포함하지 않는다 (경험적 계수 0.65가 이 하중에도 적용될 것이다); 독립된 등분포 압력으로 전체 높이에 걸쳐 반영한다.

$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0.65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2$$



문제

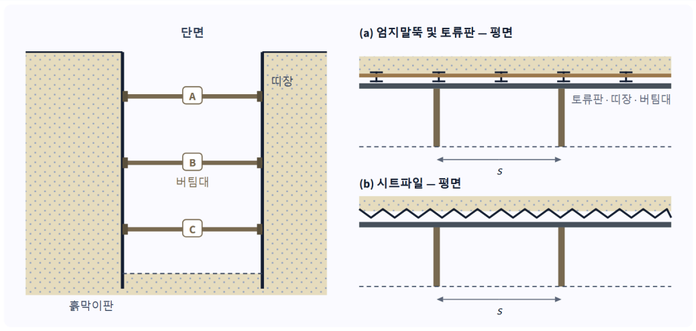
예제

조건

굴착	**예제 1(a)의 굴착 ($H = 8$ m, $\gamma = 17.6$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³, $\varphi' = 32°$)**
경우	**(a) 물 없음, 상재하중 없음; (b) 지하수위 $z_w = 3$ m; (c) 등분포 상재하중 $q = 10$ kPa**

구하는 값

각 경우의 **σ_a**, 상재하중과 수압; **총 하중 R**과 최대 버팀대 하중.



풀이 (1/2)

풀이

1 (b) 물: 유효상재응력과 포락선; 물은 전체 높이에 걸쳐 별도로 작용한다

$$\sigma_v'(H) = 17.6(3) + (20 - 9.81)(5) = 103.75 \text{ kPa}$$

$$\sigma_a = 0.65(0.3073)(103.75) = 20.72 \text{ kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20.72(8) + \tfrac{1}{2}(9.81)(5)^2 = \mathbf{288.41} \text{ kN/m}$$

수중에서는 유효상재응력이 작아지지만 (σ_a 28.12 → 20.72 kPa) 물은 시트파일 벽체에 전체 높이로 작용한다: R = **288.4 kN/m**.

풀이 (2/2)

풀이

2 (c) 상재하중: 별도의 등분포 압력; (a), (b), (c) 요약

$$\Delta p_q = K_a q = 0.3073(10) = 3.073 \text{ kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28.12(8) + 3.073(8) = 249.52 \text{ kN/m}$$

상태	σ_a (kPa)	Ek (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)	M_{max} 시트파일 (kN·m/m)
(a) 물 없음, q = 0	28.12	—	224.96	318.8	45.55
(b) 물 z_w = 3 m	20.72	u(H) = 49.05	288.38	376.7	37.09
(c) q = 10 kPa	28.12	Δp_q = 3.07	249.52	353.5	50.53

물은 포락선을 **줄이지만** 수압을 더한다: R 225.0 → **288.4 kN/m**. 상재하중은 포락선에 영향을 주지 않으며, Δp_q = 3.07 kPa을 더한다(R = 249.5 kN/m).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

포락선에서 버팀대 하중으로

이론

버팀대는 수평 기둥이다. 압력을 축 방향으로 전달하고 자중에 의해 휘며, 내력은 세장비에 좌우되고 굴착 폭이 넓으면 추가 버팀대가 필요할 수 있다. 출처는 하중에 대해 단순하고 보수적인 방법을 제시한다:

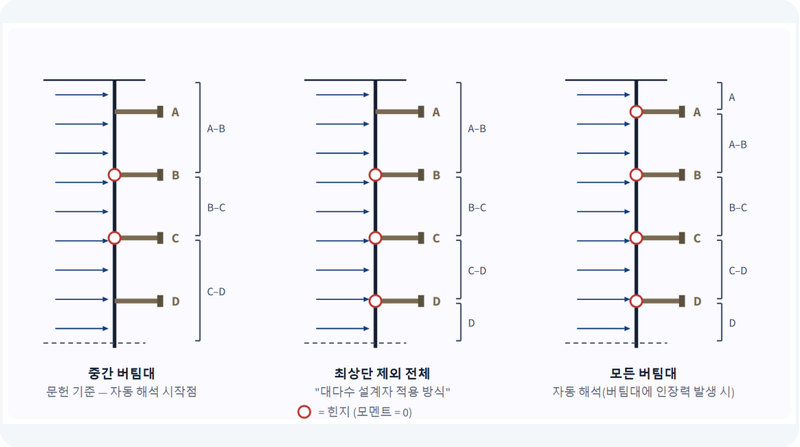
토압 포락선과 버팀대 위치를 그린다. 시트파일 벽체를 최상단과 최하단을 제외한 **모든 버팀대 위치에서 힌지**로 가정한다(많은 설계자는 최상단을 제외한 모든 위치에서 그렇게 한다).

벽체를 힌지 위치에서 **양단은 단순 캔틸레버로, 중간은 단순보로** 분리하고, 각 부분의 반력을 정역학으로 구한다(버팀대가 4단인 굴착에서는 A, B_1, B_2, C_1, C_2, D).

버팀대 하나의 하중은 그것이 받는 반력의 합 × 수평 간격 s이다.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

각 구간은 정정 구조이다: 두 개의 지점이 있으며, 지점 하나를 기준으로 한 모멘트 및 수평력 평형으로 두 반력을 모두 구한다. 힌지에 있는 버팀대는 양쪽 구간에 모두 속하므로 **두 개의 반력**을 합산한다. 반력은 벽체 단위길이당(kN/m) 값이며, s가 이를 버팀대 하중으로 환산한다.



문제

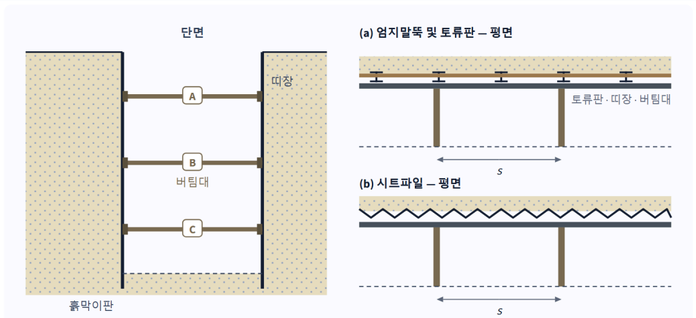
예제

조건

굴착	$H = 8.00$ m; $B = 6$ m; 버팀대 $z = 1.80, 4.60, 7.30$ m (A, B, C); 수평 간격 $s = 3.00$ m
압력	예제 1(a): 연속 직사각형 포락선 $\sigma_a = 28.12$ kPa; 시트파일은 버팀대 B에서 힌지 처리 (최상단과 최하단 제외)

구하는 값

각 부분의 **합력 W**와 그 팔길이 **z̄**; 반력 **A**, **B_1**, **B_2**, **C**; 버팀대 하중 **P_A**, **P_B**, **P_C**.



풀이 (1/2)

풀이

1 포락선을 힌지에서 구간으로 나눈다; 각 구간의 합력과 모멘트 팔 (상단 표면으로부터의 깊이)

부분	범위 (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	지점
1	0.00 – 4.60	129.35	2.300	A (z = 1.80), B (z = 4.60)
2	4.60 – 8.00	95.61	6.300	B (z = 4.60), C (z = 7.30)

2 첫 번째 부분: 첫 번째 지점에 대한 모멘트 평형

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129.35(2.300 - 1.80)}{4.60 - 1.80} = \mathbf{23.10} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106.25}\ \text{kN/m}$$

첫 번째 구간의 두 지점 반력은 106.25와 23.10 kN/m이며, 최상단 지점(A)의 반력은 캔틸레버 부분의 하중까지 포함하므로 더 크다.

풀이 (2/2)

풀이

3 두 번째 부분

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95.61(6.300 - 4.60)}{7.30 - 4.60} = \mathbf{60.20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35.41}\ \text{kN/m}$$

4 각 버팀대는 받는 반력을 합산한다; 하중 = 합계 × s (s = 3.00 m)

레벨	z (m)	받는 반력 (kN/m)	합계 (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1.80	106.25	106.25	**318.75**
B	4.60	23.10 + 35.41	58.51	**175.53**
C	7.30	60.20	60.20	**180.60**

최대 버팀대 하중 **P_A = 318.75 kN**(A 단): 이 하중이 버팀대 치수를 결정한다. B 버팀대는 두 부분에 속하므로 두 반력을 합산한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

최대 모멘트와 필요 단면계수

이론

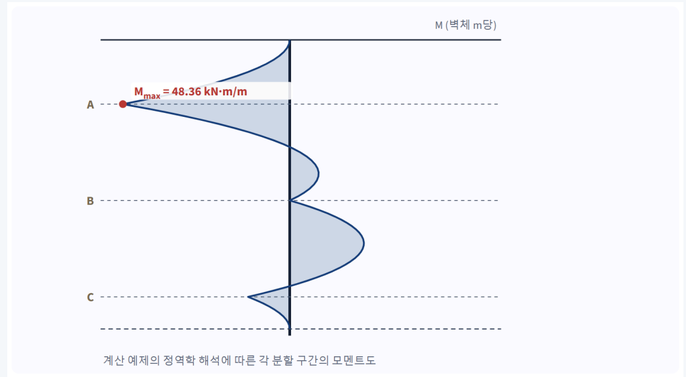
시트파일은 같은 부분들로부터 설계한다. 각 부분에서 최대 휨모멘트(전단력이 부호를 바꾸는 곳: 경간 내부 또는 캔틸레버부가 지점과 만나는 버팀대 위치)를 구하며, 가장 큰 값이 벽체 단위 길이에 대한 설계 모멘트이다. 필요한 단면계수는 허용 휨응력으로부터 구하고, 표에서 이 값 이상의 단면을 선정한다:

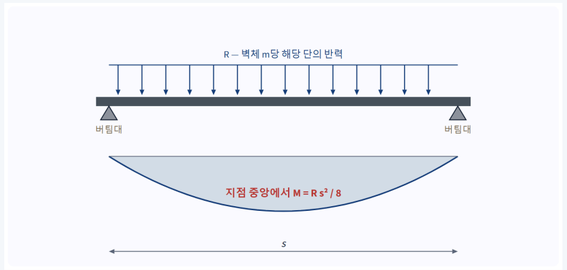
$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

띠장은 이음이 적절하면 연속으로 볼 수 있으나, 보수적으로 버팀대 위치에서 **힌지**로 취한다: 경간 s의 단순보에 단의 반력 R(벽체 단위 길이당)을 등분포하중으로 작용시킨다:

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

반력이 가장 큰 단이 지배한다. 띠장은 때로 시트파일 벽체에, 필요한 측방 지지를 제공할 수 있는 지점에서 연결된다.





문제

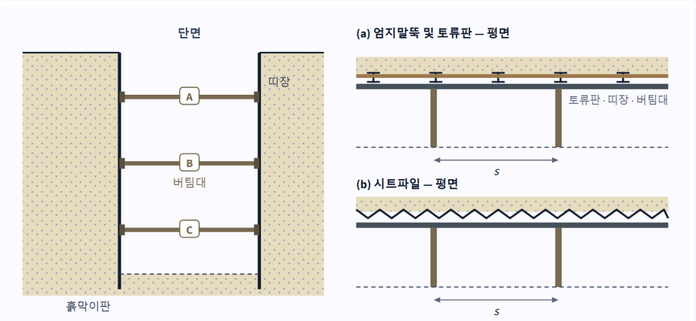
예제

조건

굴착	깊이 $H = 27$ ft (8.23 m), 모래 $\gamma = 17.59$ kN/m³, $\varphi' = 32°$; 버팀대 6, 15, 24 ft (1.83; 4.57; 7.32 m); 수평 간격 12 ft (3.66 m); B에서 힌지
강재	허용 휨응력 $\sigma_{allow} = 165\,474$ kPa

구하는 값

시트파일 벽체의 M_{max}와 필요 S(cm³/m); 반력이 가장 큰 단에서 띠장의 M_{max}와 S(cm³).



풀이 (1/2)

풀이

1 시트파일 벽체: 각 부분의 최대 모멘트

부분	범위 (m)	M_{max} (kN·m/m)	위치 z (m)
1	0.00 – 4.57	48.36	1.83
2	4.57 – 8.23	21.49	5.79

2 소요 단면계수

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{48.36}{165{,}474} = 0.0002923\ \text{m}^3/\text{m} = \mathbf{292.3}\ \text{cm}^3/\text{m}$$

시트파일 벽체에서 **M_{max} = 48.36 kN·m/m**(구간 1, z = 1.83 m): **S ≥ 292.3 cm³/m**.

풀이 (2/2)

풀이

3 띠장: 각 단의 단순보 (s = 3.658 m)

레벨	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{allow} (cm³)
A	110.18	184.25	1,113
B	57.30	95.82	579
C	70.52	117.93	713

최대 반력은 **A 단에서** 발생하며(R = 110.18 kN/m), 띠장은 **M_{max} = 184.25 kN·m**에 대해 **S ≥ 1,113 cm³**인 단면으로 설계한다; 다른 단의 띠장은 더 작을 수 있다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

설계 작용효과, 등급, 휨 및 좌굴

이론

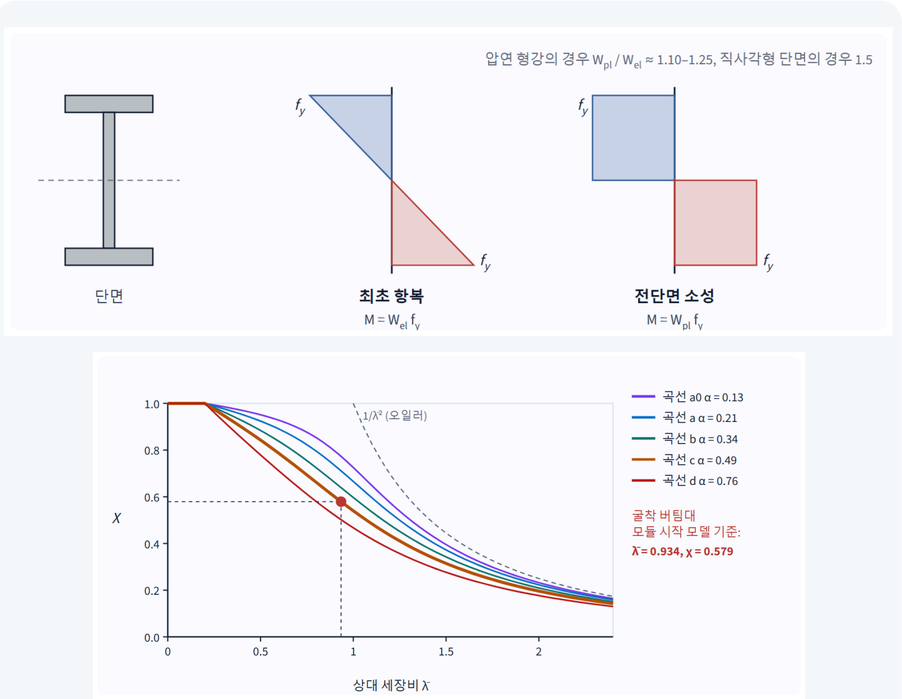
포락선에서 구한 하중은 **사용값**이며(Peck 포락선은 측정된 하중의 상한이다), 한 번만 설계값으로 환산된다: $E_d = \gamma_F E_k$. 각 부재는 자신의 강재 등급의 항복강도(f_y)로 검증하며, 단면은 부재의 **단면계수**(시트파일 벽체: m당 W_{el}, 띠장: W, 버팀대: A와 약축에 대한 I)로 주어진다.

$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{등급 1–2}),\ W_{el}\ (\text{등급 3})$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

버팀대는 약축 방향으로 좌굴한다: I는 작은 쪽 단면2차모멘트, $L_{cr} = K\,L_b$는 유효길이(굴착 폭, 중간에 엄지말뚝이나 가새가 통과하지 않는 경우)이다. α는 좌굴곡선에서 구한다(c 곡선: 0.49).

시트파일 벽체에서는 동일한 저항이 단위폭에 대해 적용된다(EN 1993-5; U형 단면에서 이음부 미끄러짐 β_B, Z형 단면에서는 1.0). 띠장의 압축 플랜지가 벽체에 밀착되어 있으므로 횡비틀림좌굴은 지배 요인이 아니다.



문제

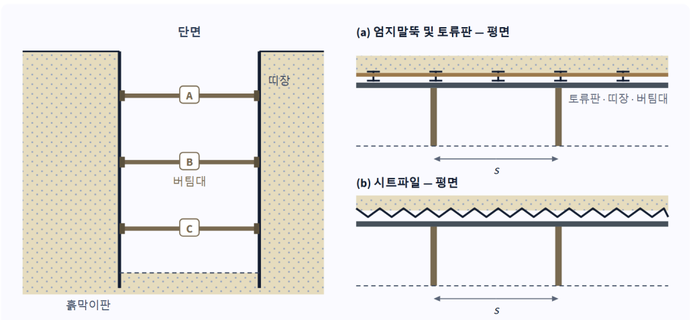
예제

조건

굴착과 하중	**예제 1(a)의 굴착과 예제 3의 하중: $P_{max} = 318.75$ kN (버팀대 A)**
요소	**S275($f_y = 275$ MPa), $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.00$: 시트파일 $W_{el} = 600$ cm³/m; 띠장 $W_{el,y} = 1\,000$ cm³; 버팀대 $A = 65.7$ cm², $I = 3\,598$ cm⁴, 곡선 c, $L_{cr} = 6.00$ m**

구하는 값

시트파일, 가장 큰 하중을 받는 띠장 및 버팀대에 대한 **η** (≤ 1).



풀이 (1/2)

풀이

1 시트파일과 띠장 (휨): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(45.55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61.50}{165.0} = \mathbf{0.373}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(119.53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161.37}{275.0} = \mathbf{0.587}$$

시트파일 η = **0.373**, 띠장 η = **0.587**: 둘 다 충분하다 ($\eta \le 1$).

풀이 (2/2)

풀이

2 버팀대 (좌굴): $N_{Ed} = 1.35\,P_{max} = 1.35(318.75) = 430.31$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6.00^2} = 2{,}071.5 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806.8}{2{,}071.5}} = 0.9339$$

$$\Phi = 0.5\left[1 + 0.49(0.9339 - 0.2) + 0.9339^2\right] = 1.1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.5791 \quad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1{,}046.4 \text{ kN}$$

η_{strut} = 430.3 / 1,046.4 = **0.411**. 세 부재 모두 충분하며($\eta \le 1$); 버팀대에서는 **좌굴**이 지배한다 ($N_{c,Rd}$ = 1,806.8 kN, $N_{b,Rd}$ = 1,046.4 kN).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

LRFD 또는 ASD; 단면 등급, 휨, 전단, 기둥 곡선

이론

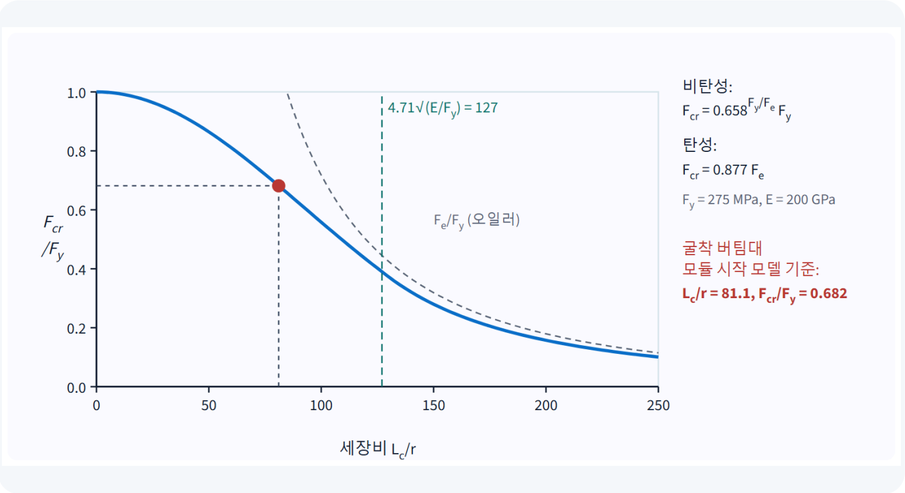
각 부재는 압축, 휨, 전단 규정에서 구한 **공칭강도 R_n**으로 검증한다. LRFD에서는 하중에 계수를 곱하고 강도는 φ로 감소시키며, ASD에서는 사용하중을 강도를 안전율 Ω로 나눈 값과 비교한다:

$$R_u \le \phi R_n \text{ (LRFD)} \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \text{ (ASD)} \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1.6$$

포락선에서 구한 하중은 ASCE 7-22의 **측방토압 H**에 해당한다: LRFD 하중조합에서는 하중에 더해지는 모든 경우(버팀대식 흙막이에서는 항상)에 1.6을, ASD에서는 1.0을 적용한다. 시트파일과 모듈에서 제공되는 띠장은 모듈이 제시하는 강도로 취급한다: 조밀 단면에서는 F_yZ, 최초 항복에서는 F_yS를 쓴다. 띠장은 벽체에 의해 횡방향으로 구속되므로 $L_b = 0$이며, 횡비틀림 좌굴은 한계상태가 아니다.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \qquad F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\frac{L_c}{r} \le 4.71\sqrt{E/F_y}\right) \qquad \text{그렇지 않으면 } 0.877F_e \qquad P_n = F_{cr} A_g$$

단일 기둥 곡선이 모든 단면에 적용된다(EN 1993-1-1과 같이 곡선을 선택할 필요가 없다); r은 작은 회전반경, $L_c = K L_b$는 유효길이이며, $L_c/r \le 200$을 권장한다. AISC는 EN 1993-1-1과 달리 전단력으로 인한 휨강도 감소를 적용하지 않는다.



문제

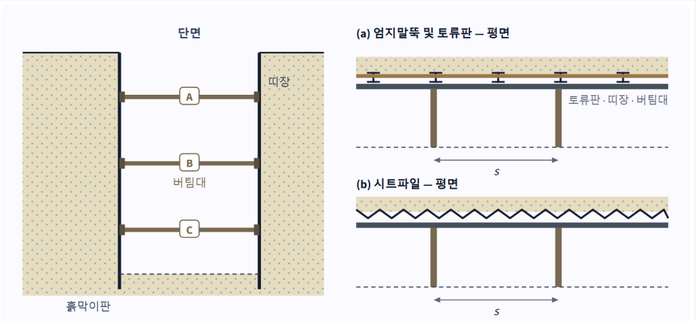
예제

조건

굴착과 하중	**예제 1(a)의 굴착과 예제 3의 하중:** $P_{max} = 318.75$ **kN (버팀대 A)**
요소	**예제 5의 부재 (S275,** $F_y = 275$ **MPa);** $E = 200$ **GPa; LRFD** $\gamma_H = 1.6$**,** $\phi_c = \phi_b = 0.90$**; ASD** $\Omega_c = 1.67$**,** $\Omega_b = 1.67$ **(**$M_n = F_y S$**)**

구하는 값

하중이 가장 큰 버팀대에 대한 L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n; LRFD 및 ASD 비율; 시트파일 벽체와 띠장에 대한 LRFD 비율.



풀이 (1/2)

풀이

1 버팀대: 기둥 곡선 (A_g = 65.7 cm², r = 7.40 cm, L_c = 6.00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7.40} = 81.1 \;\le 4.71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81.1)^2} = 300.3 \text{ MPa}$$

$$F_{cr} = 0.658^{275/300.3}(275) = 187.4 \text{ MPa}$$

$$P_n = F_{cr} A_g = 187.4 \times 6\,570 \text{ mm}^2 = \mathbf{1{,}231.5} \text{ kN}$$

버팀대의 **공칭강도 P_n = 1,231.5 kN**; 세장비 L_c/r = 81.1로 비탄성 좌굴 영역에 해당한다(한계값 127).

풀이 (2/2)

풀이

2 LRFD와 ASD의 비율 (P = 318.75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(318.75) = 510.0 \text{ kN} \le \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318.75 \text{ kN} \le \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.432}$$

버팀대: LRFD η = **0.460**, ASD η = **0.432**. 시트파일 벽체(LRFD) 0.491, 띠장 0.773; EN 1993-1-1에서는 0.373, 0.587, 0.411이었다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

출구 동수경사와 한계 동수경사

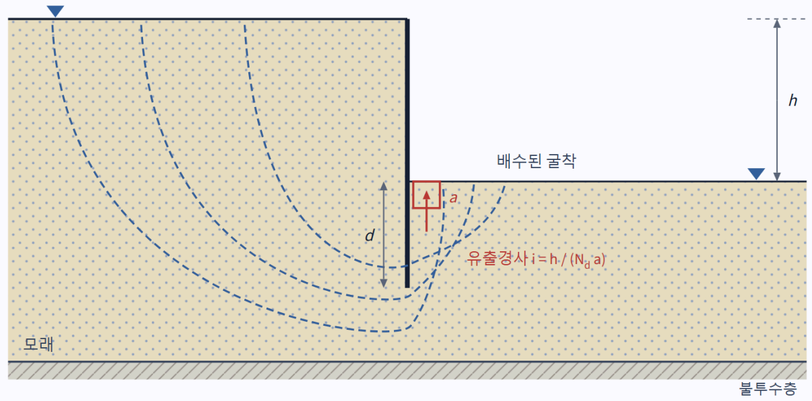
이론

모래 저면은 일반적으로 안정하며, 굴착 내부의 수위가 외부 지하수위보다 낮게 유지되지 않는 한 그 상태를 유지한다. 굴착 내부를 배수하면 물이 벽체 아래를 통과해 저면을 따라 위로 올라오며, 출구 지점의 큰 상향 동수경사는 입자를 들어 올릴 수 있다. 즉 **저면이 끓어오른다(파이핑)**. 벽체 옆의 최대 출구 동수경사는 유선망에서 읽는다:

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\,a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h는 유선망의 수두 손실, N_d는 수두 강하 수, a는 물이 벽체 옆에서 지반으로부터 빠져나오는 유선망 요소의 길이이다. i_{cr} 값은 대부분의 지반에서 0.9–1.1(평균 1)이며, 요구 FS ≈ **1.5**이다.

깊은 모래 지반에서 말뚝으로 흙막이한 굴착의 출구 동수경사는 이론적으로 풀려 있다. 두 도표로부터 모듈러스 m($2L_2/B$ 및 $2L_1/B$ 사용)과 $L_2 i_{exit}/h$를 구하며, $i = (L_2 i/h)_{nomograph} \cdot h/L_2$이다. L_1은 외측 모래의 저면 높이까지의 깊이이고, L_2는 벽체의 저면 아래 근입깊이이다.



문제

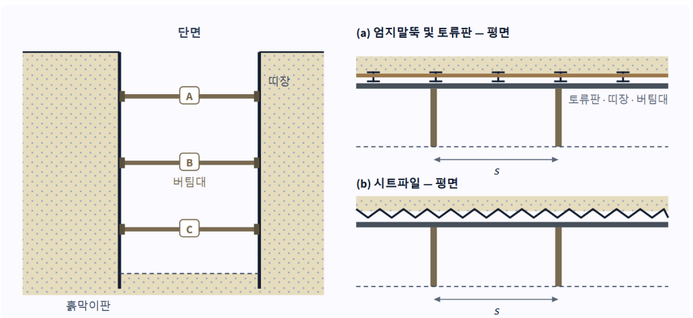
예제

조건

유선망 (초기 굴착)	**수두손실** $h = 3.0$ **m, 강하 수** $N_d = 8$**, 유출 요소** $a = 1.0$ **m;** $i_{cr} = 1.0$**;** $FS_{required} = 1.5$
도표 예제 (교재)	$h = 4.5$ m, $L_1 = 5$ m, $L_2 = 4$ m, $B = 5$ m: $2L_1/B = 2$, $B/2L_2 = 0.625$, $m \approx 0.033$, $L_2 i_{exit}/h = 0.54$

구하는 값

두 방법으로 i_{exit} 및 **FS** 산정; 요구값 1.5와 비교하여 판정.



풀이

풀이

1 유선망: $i_{exit} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3.0}{8(1.0)} = \mathbf{0.375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1.0}{0.375} = \mathbf{2.67} \;\geq 1.5 \;\checkmark$$

2 도표 이용 (깊은 모래)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{nomograph} \frac{h}{L_2} = 0.54 \cdot \frac{4.5}{4} = 0.6075$$

$$FS = \frac{1.0}{0.6075} = \mathbf{1.646} \;\geq 1.5 \;\checkmark$$

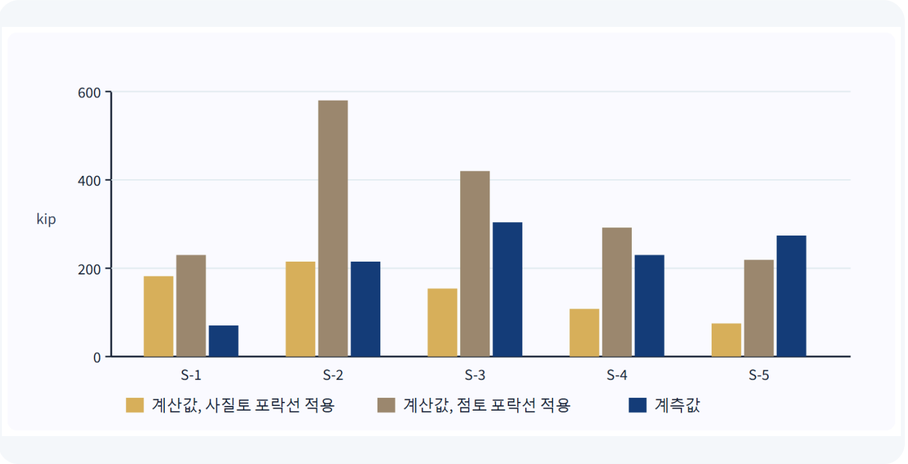
유선망에서 파이핑 안전율은 **2.67**, 도표에서는 **1.65**이며, 둘 다 요구값 1.5를 넘는다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

보스턴과 시카고 사례 연구

이론

Boston(시험 단면 B): 깊이 17.7 m, 버팀대 5개(간격 3.66 m). 지반 주상도는 모래와 점토에 대한 두 포락선으로 범위가 한정되었다: 모래 포락선 53.5 kPa, 연약–중간 점토 포락선 146.1 kPa. 측정된 하중은 두 추정값 모두와 크게 달랐고 (지반 물성이 불확실함) 버팀대는 측정값보다 훨씬 큰 하중에 맞추어 설계되어 있었다. **Chicago, National Plaza**: 깊이 21.3 m, 버팀대 6개, 두께 13 ft의 모래 매립층 아래에 점토층이 분포한다. 지반 주상도는 등가 점토로 환산되었다: c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 > 4 \rightarrow \sigma_a = 282.0$ kPa. Peck 포락선은 관측값의 약 **1.8배**에 해당하는 압력을 제시하였다: 여러 굴착 사례를 둘러싸도록 그린 포락선은 개별 굴착 하나에 대해서는 보수적이며, 동일한 지반에서의 현장 경험은 과다 설계를 상당히 줄일 수 있다.



방법이 가정하는 사항

이론

포락선은 대략 6 m보다 깊은 굴착에서 수집한 자료로 작성되었으며, 이보다 얕은 굴착은 자료 범위 밖이고 모듈이 이를 명시한다. **포락선은 임의의 시점에 벽체에 작용하는 실제 압력이 아니다**: 안전한 버팀대 하중을 주며 벽체 처짐은 주지 않는다.

지하수는 굴착 저면 아래에 있는 것으로 가정한다. 모듈은 모래의 토압 포락선을 유효상재응력 기준으로 유지하며, 물이 위쪽에 있으면 정수압을 별도로 더한다. 굴착부로의 침투는 저면에서 검토한다.

시트파일 벽체는 각 버팀대 높이에서 힌지로 연결된 정정보의 연속으로 본다; 자체 강성과 굴착저면 아래의 근입부는 사용하지 않는다. **띠장**은 버팀대 사이의 단순 경간이다(여러 버팀대에 걸친 연속 띠장에 대해서는 보수적이다).

강재는 EN 1993-1-1에 따라 검증한다. 4등급 단면은 설계하지 않으며, 띠장의 횡비틀림 좌굴은 검토하지 않는다. AISC 360-22 LRFD/ASD 선택 사항이 있다.

벽체에는 어느 정도의 측방 변위가 예상된다. 변위량은 단계별 굴착과 띠장 및 버팀대 설치 사이의 시간에 따라 달라진다. 이 변위는 주변 지반에 **지반 손실**을 일으킨다. 150개 사례에서 최대 침하는 연약 점토에서 굴착깊이의 ≈ 1.1%, 단단한 점토에서 0.2%, 비점성토에서 0.3%이다.

요약

핵심 정리

포락선: 버팀대식 흙막이 벽체는 상단을 중심으로 회전하며, 압력은 Rankine 값이 아니라 측정된 하중의 주변에 그린 경험적 분포도이다. **모래에서는 직사각형 분포**: $\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$ (예제: 28.12 kPa)

여러 모래층: $K_a(\bar{\varphi})$, 평균 K_a, $K_a(\varphi'_{min})$은 서로 일치하지 않으며(볼록), φ'_{min}이 보수적이다

물과 상재하중은 별개이다: 물은 유효상재응력을 줄이지만 정수압 전체를 추가한다(R: 225 → 288 kN/m); q는 추가로 $\Delta p = K_a q$를 가져온다

버팀대 축력: 포락선을 힌지에서 구간으로 나누고, 반력은 정역학으로 구하며, P = (합산된 반력)·s이다; 예제에서 P_A = 318.75 kN

단면 산정: $S = M_{max}/\sigma_{allow}$(시트파일 벽체), 띠장 $M = R\,s^2/8$; 교재 예제 굴착에서 시트파일 벽체는 292 cm³/m, 띠장은 1 113 cm³

강재: EN 1993-1-1 η = 0.373 / 0.587 / 0.411 (시트파일 벽체 / 띠장 / 버팀대 좌굴); AISC LRFD 버팀대 0.460, ASD 0.432

파이핑: $FS = i_{cr}/i_{exit} \geq 1.5$; 예제에서 2.67(유선망)과 1.65(도표)

참고문헌

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning — Chapter 15, “Braced Cuts”; 이 페이지는 본 문헌을 참조함.

Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, 149–218.

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322.

Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York.

U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils and Foundations, 44(1), 87–98.

EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN.

EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.

EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN.

ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, 2022.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈에서도 같은 값이 얻어진다. 모듈 페이지의 계산 예제도 이 굴착들이다(교재 예제 굴착: 27 ft, γ = 112 pcf, φ′ = 32°; 모듈의 초기 굴착: 8 m).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

굴착 프로파일, 버팀대 단, 지하수, 상재하중, 구조 부재를 GeoTerva에 직접 입력한다. 모듈은 포락선, 버팀대 하중, 시트파일과 띠장의 모멘트, 강재 검증, 굴착저면 파이핑을 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com