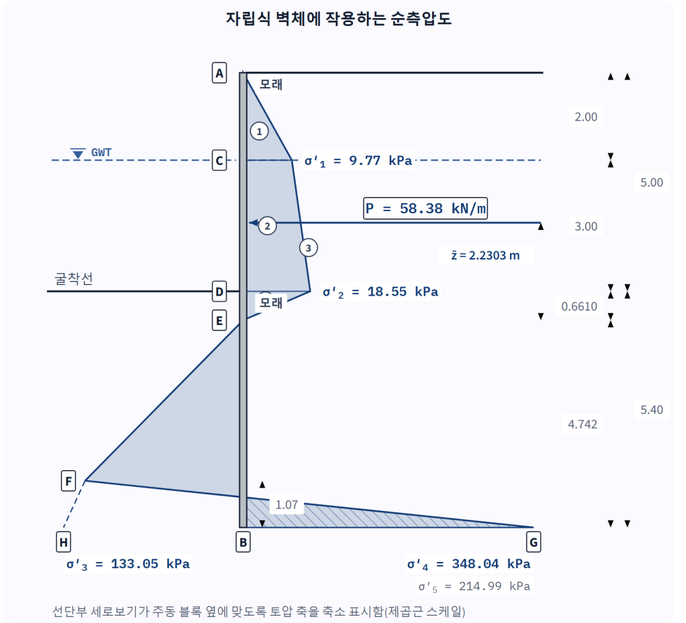
지반공학 강의 자료 · 시트파일 흙막이와 버팀대식 흙막이

모래 지반의 자립식 시트파일 벽체

강의: 모래에서 자립식 시트파일 벽체의 설계; 굴착저면 상·하부의 압력, 근입깊이, 최대 모멘트, 단면 검토, 지진과 변위; 각 주제별 계산 예제.

자립식 시트파일 · 순압력 선도 · 근입깊이 · 최대 모멘트 · EN 1993 · AISC 360 · 지진 · 변위



개요

이 강의에서 다루는 내용

자립식 시트파일이 **어떻게 회전하는지**와 굴착 저면 위, 아래 및 선단에서 어떤 압력이 발생하는지

굴착 저면 위의 **주동압력**(물, 상재하중)과 그 아래의 **순압력 직선**; 영점 E

수평 및 모멘트 평형으로부터 **근입깊이**: L_4에 대한 4차 방정식, $D_{theoretical}$

설계 깊이에 **안전 여유**를 더하는 방법 (계수 f, K_p/FS_p, 지정 깊이)

최대 모멘트(전단력이 0인 위치)와 시트파일의 **EN 1993-1-1 / AISC 360-22**에 의한 검증

물, 상재하중, 경사 지표면 및 **지진**의 영향; 지반반력계수법으로 구한 **변위**

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 벽체: 굴착 바닥 위 L = 5 m의 모래(γ = 15.9; γ_{sat} = 19.33 kN/m³; φ' = 32°), 지하수위는 상단에서 2 m 아래이며 양면에서 같은 높이이다. 시트파일은 같은 모래에 타입되어 있다. 힘은 벽체 1 m당 값이다.

어떻게 작동하며 어떻게 회전하는가?

이론

시트파일 벽체는 서로 맞물리는 강재 말뚝을 나란히 박은 것이다. 굴착저면(L) 위의 흙을 지지하며 **근입깊이 D**로 서 있다. **캔틸레버** 벽체에는 다른 지지가 없다. 울타리 기둥처럼 박힌 지반의 **수동저항**으로만 지지되므로 일반적으로 굴착저면으로부터 약 6 m까지가 경제적이다.

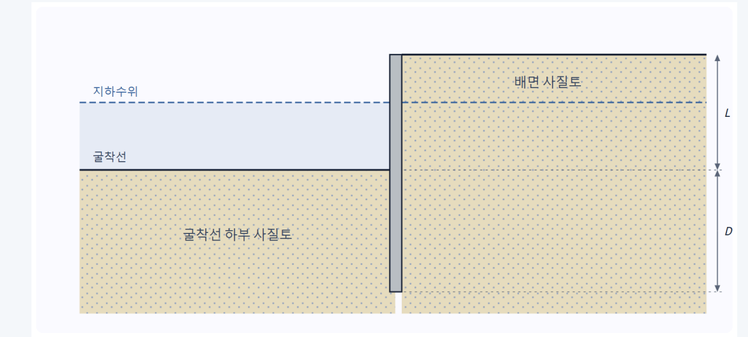
벽체는 O점(선단 부근)을 중심으로 강체 회전한다. **A 구역**(굴착저면 위): 배면 지반만 해당하며 주동 압력이 작용한다.

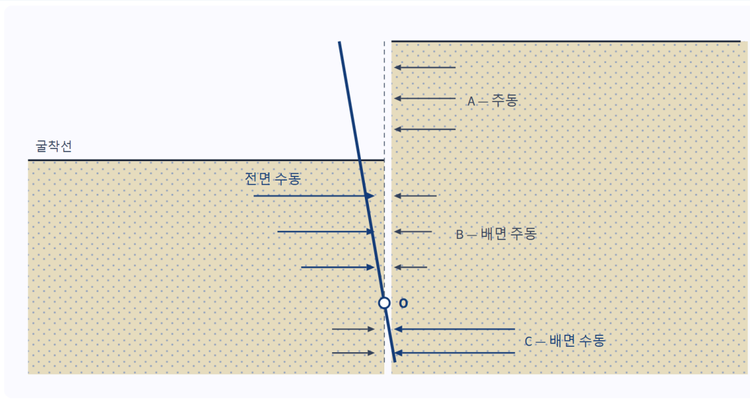
B 영역 (굴착 저면–O): 후면은 주동, 전면(밀리는 쪽)은 수동 압력.

C 영역 (O 하부): 양쪽의 역할이 바뀐다; 후면은 수동, 전면은 주동.

실제 분포는 곡선이다; 원 출처는 이를 **선형 근사**로 대체한다: 굴착 저면 아래의 순압력은 영점 E를 지나는 하나의 직선이며, 선단의 되돌림은 높이 L_5의 블록이다.

Rankine 토압은 **벽면마찰을 고려하지 않고** 유효연직응력을 기준으로 산정한다; 양면의 수위가 같으면 정수압은 서로 상쇄된다.





σ′1과 σ′2

이론

굴착저면 위에는 배면의 모래만 있으며, Rankine 주동토압 = 유효 수직응력 × K_a이다. 지하수위는 벽체 상단에서 L_1 아래에 있고, 나머지 $L_2 = L - L_1$은 수면 아래에 있다($\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$):

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

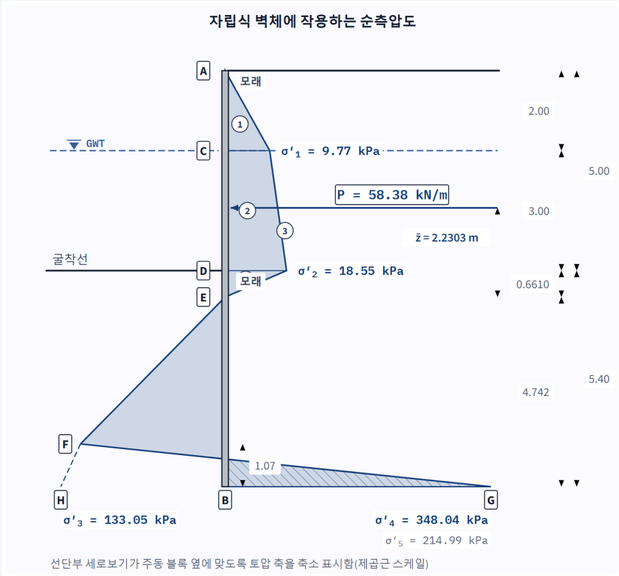
$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \qquad \sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2)\, K_a$$

벽체 양면의 수위가 같으면 정수압은 **상쇄되고**, 이 유효압력만이 벽체에 하중으로 작용한다.

등분포 상재하중 q(교통하중, 적재물)는 모든 깊이에서 유효응력에 q를 더한다: 압력도는 $\sigma'_0 = qK_a$에서 시작하고, 각 종좌표는 qK_a만큼 증가한다: $\sigma'_2 = (q + \gamma L_1 + \gamma' L_2)K_a$.

굴착 저면 아래에서 상재하중 q는 배면측(보유되는 쪽)의 연직응력에 남아 있다: 순압력선은 더 큰 σ'_2에서 시작하며 선단의 수동토압은 qK_p만큼 증가한다; 굴착면은 상재하중을 받지 않는다.

유한한 범위의 하중(띠하중, 집중하중)은 일정한 $K_a q$를 더하지 않는다: 측방압력은 반무한 매질 해에서 구하고, 강성 벽체에 대해서는 **거울상 방법으로 2배**로 한다. 모듈은 순압력 분포도를 수치적으로 적분한다.



계산 예제의 순압력도 (모듈이 그리는 형태).

문제

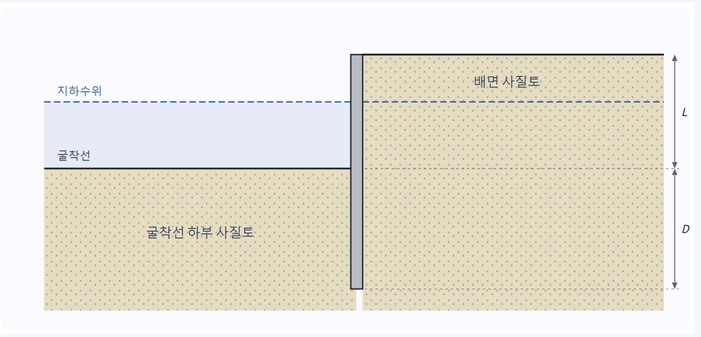
예제

조건

지반	**모래:** $\gamma = 15.9$, $\gamma_{sat} = 19.33$ **kN/m³,** $\varphi' = 32^\circ$ **(배면측 및 근입부는 동일한 모래)**
벽체	$L = 5$ **m; 지하수위는 상단에서** $L_1 = 2$ **m 아래, 양면에서 같은 높이; 상재하중 없음**

구하는 값

K_a, K_p, γ'; σ'_1 및 σ'_2(굴착 저면에서).



풀이

풀이

1 압력계수와 수중단위중량

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073} \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + 16^\circ) = \mathbf{3.2546}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 19.33 - 9.81 = 9.52 \text{ kN/m}^3$$

2 수위와 굴착저면에서의 주동압력

$$\sigma_1' = \gamma L_1 K_a = 15.9(2)(0.3073) = \mathbf{9.77} \text{ kPa}$$

$$\sigma_2' = (\gamma L_1 + \gamma' L_2)\, K_a = (15.9(2) + 9.52(3))\,(0.3073)$$

$$\sigma_v'(L) = 60.36 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; \sigma_2' = \mathbf{18.55} \text{ kPa}$$

주동토압은 수면에서 **9.77 kPa**, 굴착저면에서 **18.55 kPa**이며, 수동토압계수는 K_p = 3.2546이다. 수면 아래에서는 수중단위중량(γ' = 9.52 kN/m³)을 사용하므로 압력의 증가 속도가 완만해진다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

영점 E, P 및 z̄, 4차 방정식

이론

굴착저면 아래에서는 벽체 양면에 모두 지반이 있다. 뒤쪽에서는 주동압력, 앞쪽에서는 수동압력이 작용하며 수동압력이 더 빠르게 증가한다. 순압력은 σ'_2에서 시작하여 깊이에 따라 선형으로 감소하고 E점에서 0이 된다:

$$L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'\,(K_p - K_a)} \qquad \sigma'_5 = \sigma'_v(L)K_p + \gamma' L_3(K_p - K_a)$$

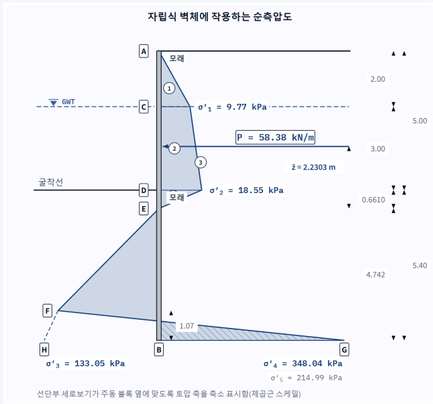
E 위쪽에서 분포도의 합력 **P**(면적)는 E의 **z̄** 위에 작용한다. L_4 = 선단의 E 아래 깊이; $\Sigma F_H = 0$과 선단에 대한 $\Sigma M = 0$ 조건으로부터:

$$\sigma'_3 = L_4(K_p - K_a)\gamma' \quad \sigma'_4 = \sigma'_5 + \gamma' L_4(K_p - K_a) \quad L_5 = \frac{\sigma'_3 L_4 - 2P}{\sigma'_3 + \sigma'_4}$$

$$L_4^4 + A_1 L_4^3 - A_2 L_4^2 - A_3 L_4 - A_4 = 0$$

$$A_1 = \frac{\sigma'_5}{m} \quad A_2 = \frac{8P}{m} \quad A_3 = \frac{6P\,(2\bar{z}m + \sigma'_5)}{m^2} \quad A_4 = \frac{P\,(6\bar{z}\sigma'_5 + 4P)}{m^2} \quad (m = \gamma'(K_p - K_a))$$

이론 근입깊이 **$D_{theoretical} = L_3 + L_4$**: 수동저항이 완전히 발현되어 여유가 전혀 남지 않는 깊이이다.





문제

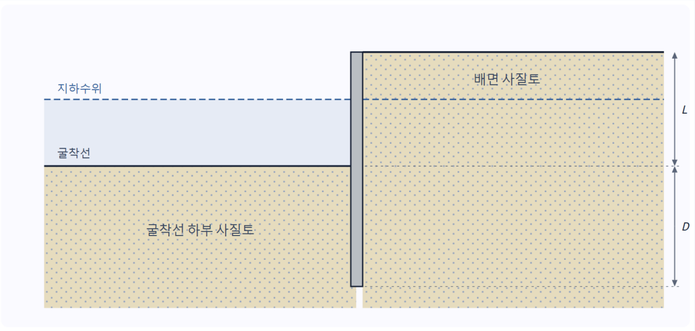
예제

조건

조건	**예제 1의 옹벽:** $\sigma'_1 = 9.77$, $\sigma'_2 = 18.55$ **kPa;** $K_a = 0.3073$, $K_p = 3.2546$, $\gamma' = 9.52$ **kN/m³**

구하는 값

순압력의 영점 **L_3**; E 위쪽 압력 분포도의 합력 **P**와 모멘트 팔 **z̄**.



풀이

풀이

1 영점

$$L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'(K_p - K_a)} = \frac{18.55}{9.52(3.2546 - 0.3073)} = \frac{18.55}{28.059} = \mathbf{0.6610}\ \text{m}$$

2 주동토압도의 각 부분 (상단에서 E까지): P = Σ 면적, z̄ = Σ(면적 × 모멘트 팔)/P

부분	그림	면적 (kN/m)	E까지의 모멘트 팔 (m)	면적 × 모멘트 팔
1	삼각형: 0–2 m	9.77	4.328	42.28
2	직사각형: 2–5 m	29.31	2.161	63.34
3	삼각형: 2–5 m	13.16	1.661	21.86
4	삼각형: 5 m–E	6.13	0.441	2.70
합계		**58.38**		**130.19**

P = 58.38 kN/m; z̄ = 130.19 / 58.38 = **2.2303 m**(E 위쪽). 굴착저면 0.661 m 아래에서 순토압이 영이 된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

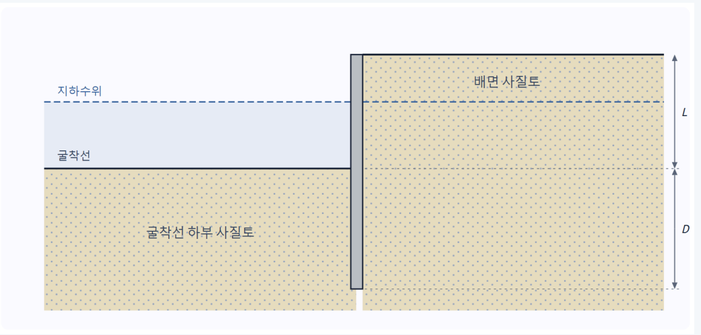
예제

조건

조건	**예제 2:** $L_3 = 0.661$ **m,** $P = 58.38$ **kN/m,** $\bar{z} = 2.2303$ **m;** $\sigma'_v(L) = 60.36$ **kPa**
계수	$K_a = 0.3073$**,** $K_p = 3.2546$**,** $m = \gamma'(K_p - K_a) = 28.06$ **kN/m³**

구하는 값

σ′5, A1…A4; 근 **L4**; **Dtheoretical**; σ′3, σ′4, **L5**.



풀이 (1/2)

풀이

1 선단의 종좌표 σ'_5 (배면측 수동토압 + 순압력 직선)

$$\sigma'_5 = \sigma'_v(L)K_p + \gamma' L_3(K_p - K_a) = 60.36(3.2546) + 28.059(0.6610) = \mathbf{214.99}\ \text{kPa}$$

2 방정식의 계수

$$A_1 = \sigma'_5/m = 214.99/28.059 = 7.6623 \qquad A_2 = 8P/m = 8(58.38)/28.059 = 16.6439$$

$$A_3 = 6P\left(2\bar{z}m + \sigma'_5\right)/m^2 = 151.328 \qquad A_4 = P\left(6\bar{z}\sigma'_5 + 4P\right)/m^2 = 230.633$$

3 양의 근 (방정식을 수치적으로 풀며, f = 0을 만족한다)

$$L_4^4 + 7.662L_4^3 - 16.644L_4^2 - 151.33L_4 - 230.63 = 0$$

$$L_4 = \mathbf{4.742}\ \text{m} \qquad D_{theoretical} = L_3 + L_4 = 0.6610 + 4.742 = \mathbf{5.40}\ \text{m}$$

이론 근입깊이 **D = 5.40 m**(굴착 저면으로부터); L_4 = 4.742 m. 이 깊이에서 수동저항은 완전히 발현되어 있으며 **여유가 전혀 없다**.

풀이 (2/2)

풀이

4 선단부 압력 블록

$$\sigma'_3 = L_4\, m = 4.742(28.059) = \mathbf{133.05}\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_4 = \sigma'_5 + L_4 m = 214.99 + 133.05 = \mathbf{348.04}\ \text{kPa}$$

$$L_5 = \frac{\sigma'_3 L_4 - 2P}{\sigma'_3 + \sigma'_4} = \frac{133.05(4.742) - 2(58.38)}{133.05 + 348.04} = \mathbf{1.0686}\ \text{m}$$

압력도가 완성되었다: E를 지나는 순 직선, 선단 위 **L_5 = 1.069 m** 지점에서 σ'_3 = 133.0 kPa에서 σ'_4 = 348.0 kPa로 바뀌는 블록. 검토: 4차 방정식의 좌변은 근에서 0.03에 불과하다(척도에 비해 영).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

안전 여유를 더하는 방법

이론

이론 깊이에는 여유가 없다. 출처는 두 가지 방법을 제시한다 (옆의 그림):

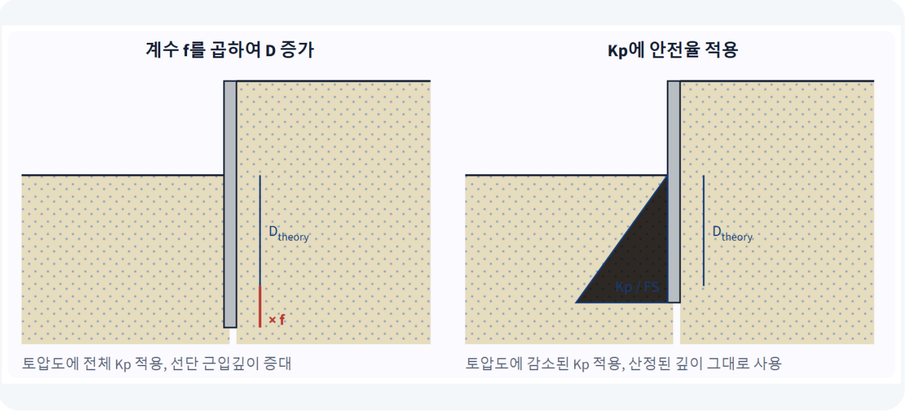
깊이 증가: 압력도는 K_p 전체 값으로 작성하고 깊이는 20–30% 증가시킨다: $D_{design} = f \cdot D_{theoretical}$, f = 1.2–1.3. 압력과 모멘트는 이론 벽체의 값이다.

K_p에 대한 안전율: 분포도를 처음부터 K_p/FS_p (FS_p = 1.5–2)로 구성하고, 산출된 깊이를 그대로 사용한다. 굴착 바닥 아래의 모든 종좌표가 변하며, **모멘트도 증가한다**.

주어진 깊이: 깊이가 해석이 아니라 기술자로부터 주어지면, 선택한 방법이 요구하는 깊이와 비교하여 검증하고($D_{given} \geq D_{design,required}$) 발현 안전율($FS_{p,mob}$)을 구한다. K_p를 이 값으로 나누면 분포도는 주어진 깊이에서 정확히 평형을 이룬다.

$$D_{given} \geq D_{design,req} \qquad D(K_p/FS_{p,mob}) = D_{given}$$

주어진 깊이에서 **단면력**은 두 경우에 대해 검토한다. 필요 깊이 조건과 $K_p/FS_{p,mob}$로 주어진 깊이의 평형이다. 주어진 깊이의 모멘트가 다른 쪽보다 클 수 있으며(긴 벽체는 부분적으로 발현된 수동토압 때문에 더 많이 휜다), 시트파일 벽체는 **둘 중 큰 값**을 기준으로 선정한다.



문제

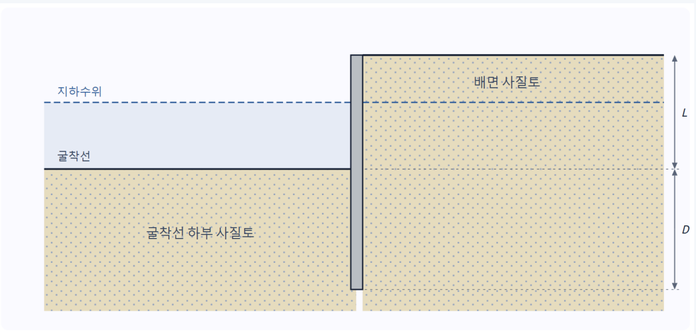
예제

조건

벽체	**예제 1–3의 벽체 ($D_{theoretical} = 5.40$ m, $M_{max} = 209.58$ kN·m/m)**
도로	**$f = 1.3$; $FS_p = 1.5$ 및 2.0; 주어진 깊이 6.0 및 8.0 m; 시트파일: $W_{el} = 1\,400$ cm³/m, S275(EN 1993-1-1, $\gamma_F = 1.35$)**

구하는 값

각 방법의 D_{design}, 전체 길이, M_{max} 및 시트파일 이용률 **η**.



풀이

풀이

1 경로 f: $D_{design} = 1.3 \times 5.403 = 7.023$ m (모멘트는 동일)

도로	D_{design} (m)	L + D (m)	M_{max} (kN·m/m)	η (EN 1993)	참고
f = 1.3 ($D = f \cdot D_{theoretical}$)	7.02	12.02	209.58	0.735	모멘트는 이론 벽체의 값이다
$FS_p = 1.5$ ($K_p/1.5$)	7.10	12.10	263.53	0.924	$K_p = 2.170$
$FS_p = 2.0$ ($K_p/2$)	8.84	13.84	325.91	1.143	**η > 1**
주어진 D = 6.0 m	6.00	11.00	227.74	0.799	D < 7.02: 부족; $FS_{p,mob} = 1.18$
주어진 D = 8.0 m	8.00	13.00	294.92	1.034	D ≥ 7.02; $FS_{p,mob} = 1.76$; **η > 1**

K_p/FS_p 경로에서는 분포도가 처음부터 약화되므로 깊이(7.10 m)와 모멘트(263.5 kN·m/m)가 함께 증가한다. $FS_p = 2$에서는 모멘트가 325.9 kN·m/m이고 시트파일 단면이 부족하다. **주어진 D = 8 m**가 설계 깊이보다 길더라도 부분적으로 발현된 수동으로 인해 모멘트(294.9)는 **커진다**. 깊이를 늘린다고 해서 항상 모멘트가 줄어드는 것은 아니다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

전단력이 0이 되는 위치

이론

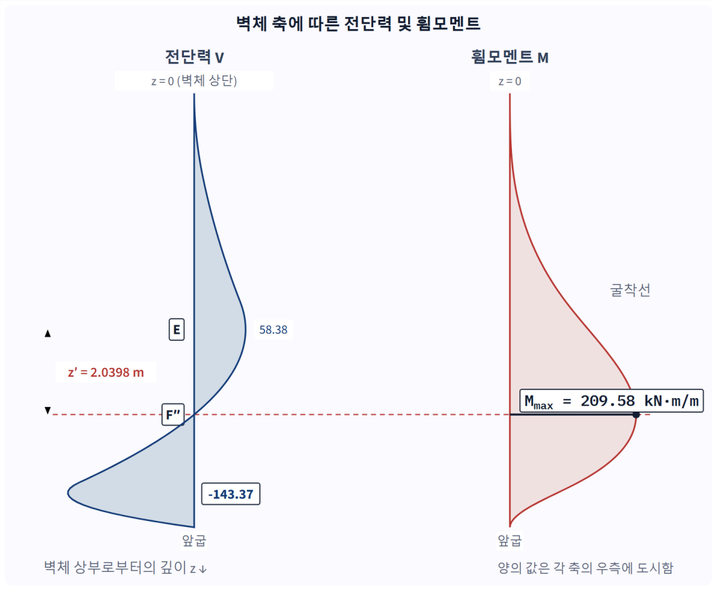
휨모멘트는 전단력이 0인 곳에서 최대이다. E 아래에서는 순 수동토압 삼각형(½γ′(K_p – K_a)z′²)이 커지며, P는 E 아래 **z′** 지점에서 이것과 평형을 이룬다:

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{\gamma'(K_p - K_a)}} \qquad M_{max} = P\,(\bar{z} + z') - \tfrac{1}{2}\gamma' z'^2\,(K_p - K_a)\,\frac{z'}{3}$$

전단력은 E점(순압력 0)에서 최댓값에 도달하고 깊이 z′에서 0이 된다; 모멘트는 이곳에서 최대이며 선단에서 0으로 돌아온다.

M_{max}는 이론 벽체의 모멘트이다(f 경로). K_p/FS_p 경로에서는 분포도를 저감된 K_p로 구성하므로 M_{max}가 더 크다.

시트파일 선정은 **S = M_{max}/σ_{allow}**(고전적 방법) 또는 한계상태 검증(아래의 EN 1993-1-1, AISC 360-22)으로 수행한다.



문제

예제

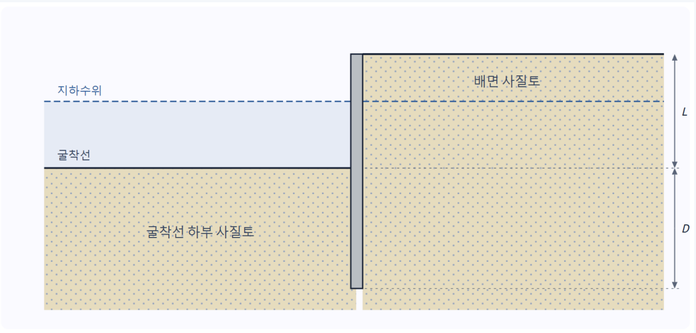
조건

조건

예제 2–3: $P = 58.38$ **kN/m,** $\bar{z} = 2.2303$ **m;**
$m = \gamma'(K_p - K_a) = 28.06$ **kN/m³**

구하는 값

전단력이 0이 되는 깊이 **z′**(E 아래)와 $\mathbf{M_{max}}$; 벽체 상단으로부터의 깊이.



풀이

풀이

1 전단력이 0이 되는 위치 (E 아래)

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{m}} = \sqrt{\frac{2(58.38)}{28.059}} = \mathbf{2.0398}\ \text{m}$$

2 최대 모멘트

$$M_{max} = P(\bar{z} + z') - \tfrac{1}{6}\, m\, z'^{3}$$

$$= 58.38(2.2303 + 2.0398) - \tfrac{1}{6}(28.059)(2.0398)^{3} = \mathbf{209.58}\ \text{kN·m/m}$$

M_{max} = 209.58 kN·m/m, 벽체 상단으로부터 L + L_3 + z′ = 5 + 0.661 + 2.040 = **7.70 m** 깊이에서 발생한다. 시트파일 벽체는 이 모멘트를 기준으로 선정한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

같은 구성, 다른 입력값

이론

물이 없는 경우: 같은 구성에 자연 단위중량을 적용한다. $\sigma'_2 = \gamma L K_a$, $L_3 = \sigma'_2/(\gamma(K_p - K_a))$; 식의 모든 γ' 자리에 γ가 들어가며, 근입깊이 식은 같은 형태를 유지한다.

균일 상재하중 q: 각 종좌표가 qK_a만큼 증가한다; 순압력 직선은 더 큰 σ'_2에서 시작하며, 선단의 수동 qK_p만큼 커진다(앞 절).

양면의 지하수위가 다른 경우(원전 방법의 범위를 넘어선 확장): 정수압은 서로 상쇄하지 않으며, 침투가 없는 경우 순수압을 추가한다. 순압력은 구간별 직선이며, E와 평형방정식은 분포도 위에서 수치적으로 푼다.

경사진 배면 지표(β, 무한): 지지되는 쪽에는 Rankine 경사 뒤채움 주동토압계수의 수평 성분을 사용하며, 굴착 측과 선단의 수동토압은 수평 지표면 조건을 유지한다(안전 측). $\beta \geq \varphi'$이면 해가 없다.

$$u_{net}(z) = \gamma_w(z - D_w) - \gamma_w(z - D_{w,exc}) \quad (\text{각 항} \geq 0)$$

$$p(z) = K_a \sigma'_{v,r}(z) - K_p \sigma'_{v,e}(z) + u_{net}(z)$$

$$K_{a,\beta} = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_{a,h} = K_{a,\beta}\cos\beta$$

문제

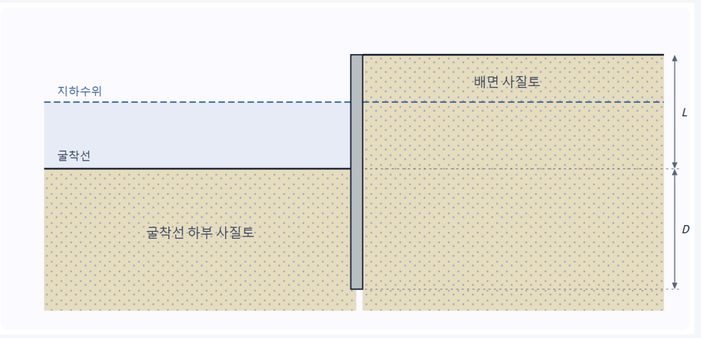
예제

조건

벽체	**예제 1–5의 벽체 (f = 1.3; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m)**
변경 사항	**(a) 물 없음; (b) 등분포 상재하중 $q = 10$ kPa; (c) 전면의 물이 $z = 6$ m에 위치 (굴착면 건조, 배면 2 m); (d) 배면 지표면이 $\beta = 15°$ 경사**

구하는 값

각 경우의 **L_3**, P, **$D_{theoretical}$**, D_{design}, **M_{max}**, η; 물이 없으면 손계산으로 검증.



풀이

풀이

1 물 없음(수계산): $\sigma'_2 = \gamma L K_a$, $L_3 = \sigma'_2/(\gamma(K_p - K_a))$

$$\sigma'_2 = 15.9(5)(0.3073) = 24.43 \text{ kPa} \qquad L_3 = \frac{24.43}{15.9(3.2546 - 0.3073)} = \mathbf{0.521} \text{ m}$$

2 다섯 경우의 요약 (나머지는 모듈이 같은 방법으로 푼다)

상태	L_3 (m)	P (kN/m)	$D_{theoretical}$ (m)	D_{design} (m)	M_{max} (kN·m/m)	η (EN 1993)
초기 굴착 (물 2 m, 양면 동일)	0.661	58.38	5.40	7.02	209.6	0.735
(a) 물 없음	0.521	67.43	4.53	5.89	212.1	0.744
(b) 상재하중 q = 10 kPa	0.770	75.94	6.15	7.99	305.5	**1.071**
(c) 전면 수위 z = 6 m	1.319	126.29	8.00	10.39	543.8	**1.907**
(d) 경사진 지표면 β = 15°	0.713	63.00	5.64	7.33	232.1	0.814

물이 없으면 γ′ 대신 γ를 사용한다: 영점이 가까워지고 근입깊이는 4.53 m로 **감소한다**. **상재하중**은 D를 6.15 m로, 모멘트를 306 kN·m/m로 키운다(η > 1); **서로 다른 수위**가 최악의 경우이다: M = 544 kN·m/m (P = 126 kN/m). 경사 β = 15°: $K_{a,h}$ = 0.3289 (수평: 0.3073).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

EN 1993-1-1 및 AISC 360-22

이론

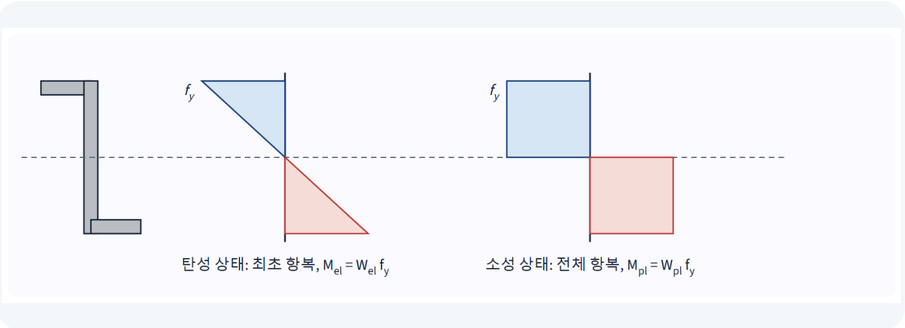
고전적 방법: S = M_{max}/σ_{allow}. 모듈은 이를 한계상태 검증으로 대체한다. 순압력 분포도의 모멘트는 특성 작용이며, 부분계수가 이를 설계값으로 증가시킨다:

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \quad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} \quad M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \quad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1$$

표에는 두 가지 단면계수가 있다: **W_{el}**은 최초 항복까지(단면 등급 3까지 유효), **W_{pl}**은 완전 소성 모멘트까지(등급 1–2)이다. 근입깊이의 할증은 강구조 기준에서 별도로 곱하지 않는다.

$$\text{LRFD: } M_u = \gamma_H M_{max} \le \phi_b M_n,\ \phi_b = 0.90 \qquad \text{ASD: } M_a = M_{max} \le \frac{M_n}{\Omega_b},\ \Omega_b = 1.67$$

$M_n = F_y Z$(조밀 단면) 또는 최초 항복 시의 $F_y S$. 지반 압력은 측방토압 H로 취급한다: LRFD 조합에서 γ_H = 1.6, ASD에서는 1.0.



문제

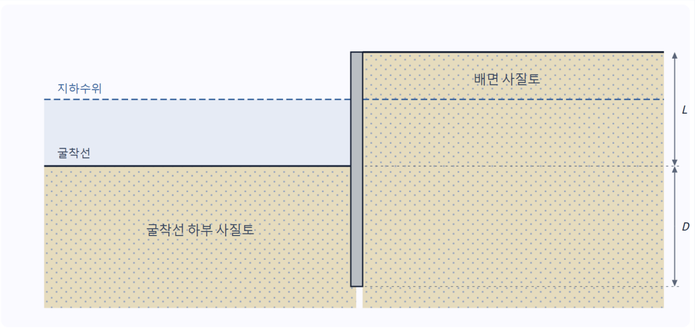
예제

조건

단면	**S275 ($f_y = 275$ MPa); 탄성 단면계수 $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
모멘트	**예제 5: $M_{max} = 209.58$ kN·m/m; EN 1993-1-1: $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = 1.00$; AISC: $\gamma_H = 1.6$, $\Omega_b = 1.67$ ($M_n = F_y S$)**

구하는 값

EN 1993-1-1에 대한 **M_{Ed}**, **W_{req}**, $M_{c,Rd}$, **η**; AISC LRFD 및 ASD에 대한 η.



풀이 (1/2)

풀이

1 EN 1993-1-1

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} = 1.35(209.58) = \mathbf{282.93}\ \text{kN·m/m}$$

$$W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} = \frac{282.93(1.00)}{275\,000} = \mathbf{1{,}028.8}\ \text{cm}^3\text{/m}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} = 1\,400 \cdot 10^{-6}(275\,000) = 385.00\ \text{kN·m/m} \qquad \eta = \frac{282.93}{385.00} = \mathbf{0.735} \le 1\ \checkmark$$

선정한 시트파일은 EN 1993-1-1에 따라 적합하다: η = **0.735**; 필요 W = 1,029 cm³/m < 1 400 cm³/m. 표에 W_{pl}이 기재되어 있고 단면 등급이 1–2이면 소성 모멘트를 사용할 수 있다(W_{pl} = 1 650 cm³/m로 가정하면 η = 0.624).

풀이 (2/2)

풀이

1 AISC 360-22: 공칭 휨강도 $M_n = F_y S = 275\,000\,(1\,400 \cdot 10^{-6}) = 385.0$ kN·m/m

LRFD: $M_u = 1.6(209.58) = 335.32$ kN·m/m $\leq \phi_b M_n = 0.90(385.0) = 346.5 \quad \eta = \mathbf{0.968}$

ASD: $M_a = 209.58$ kN·m/m $\leq \dfrac{M_n}{\Omega_b} = \dfrac{385.0}{1.67} = 230.5 \quad \eta = \mathbf{0.909}$

AISC 기준으로도 만족한다: LRFD η = **0.968** (최초 항복), ASD η = **0.909**. 동일한 모멘트에 대해 EN 1993-1-1에서는 이용률이 0.735, LRFD에서는 0.968이며, 기준마다 안전 개념이 다르므로 이용률도 서로 다르다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

의사정적 Mononobe–Okabe 해석 체계

이론

지진은 흙 쐐기에 일정한 관성력(수평 $k_h W$, 수직 $k_v W$)을 추가함으로써 정적 한계평형 체계를 유지한다. 수직 벽체, 수평 지표면, 벽면마찰 없음(정적 Rankine 설계와 같은 이상화):

$$\tan\theta = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin\varphi' \sin(\varphi' - \theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad K_{PE} = \ldots \left[1 - \sqrt{\ldots}\right]^2$$

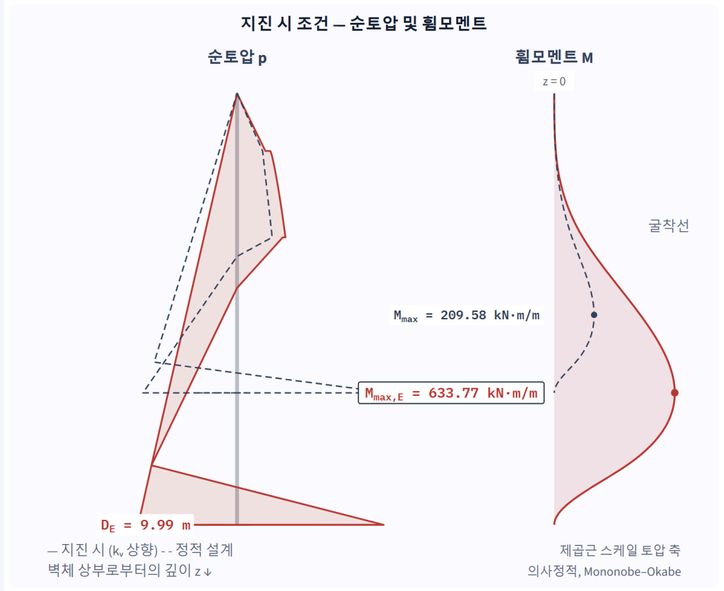
$$\text{수중:}\quad \tan\theta_w = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \cdot \frac{k_h}{1 \mp k_v}$$

압력은 $(1 \mp k_v)K_{AE}\sigma'_v$와 $(1 \mp k_v)K_{PE}\sigma'_v$이며, **$k_v$의 두 방향** 모두 검토한다. $\theta = 0$에서는 K_a와 K_p가 되고, $\theta > \varphi'$이면 평형 쐐기가 존재하지 않는다.

투수성이 중간 정도인 모래에서는 간극수가 지반과 함께 움직이므로(**구속**) 관성은 포화 질량에 작용하며 각도가 커진다. 굴착부에 자유수가 있으면 Westergaard 동수압(반대 방향)이 추가된다.

검토: 순압력 분포도는 정적 경우와 같이 구성하며, 두 평형방정식으로 **D_E**가 구해진다. 지진은 우발 상황이므로 K_{PE}에는 계수를 적용하지 않는다. 벽체는 **$D_E \le D_{design}$**이면 지진을 견딘다. 캔틸레버 벽체에서는 지진 시 압력을 정적 경우와 같이 유효응력에 비례하여 분포시킨다.

지진 조합에서는 작용 효과를 1.0으로 취한다: $M_{Ed,E} = M_{max,E}$.



문제

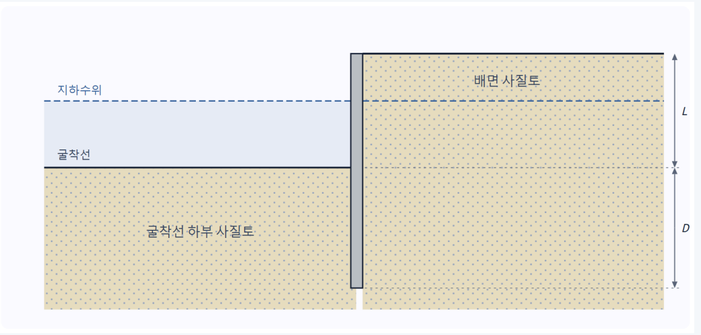
예제

조건

벽체	**예제 1–5의 벽체:** $D_{design} = 7.02$ **m,** $M_{max} = 209.58$ **kN·m/m; S275,** $W_{el} = 1\,400$ **cm³/m**
지진	$k_h = 0.15$**,** $k_v = \pm 0.075$ **(두 방향); 간극수 제한; 굴착부에 자유수 3 m**

구하는 값

지진 시의 각도와 계수; D_E(k_v의 두 방향), $M_{max,E}$; 정적 조건의 벽체가 이 지진에 견디는가?



풀이 (1/2)

풀이

1 지진 각도와 계수($\varphi' = 32°$; 정적 $K_a = 0.3073$, $K_p = 3.2546$)

$$\tan\theta = 0.15/(1-0.075) = 0.1622 \;\Rightarrow\; \theta = 9.21^\circ$$

$$\tan\theta_w = \frac{19.33}{19.33-9.81}(0.1622) = 0.3293 \;\Rightarrow\; \theta_w = 18.22^\circ$$

k_v	$f_v = 1 - k_v$	θ (상단)	θ_w (수중)	K_{AE} / K_{PE} (상부)	K_{AE} / K_{PE} (수중)
+0.075	0.925	9.21°	18.22°	0.411 / 2.948	0.562 / 2.589
−0.075	1.075	7.94°	15.82°	0.395 / 2.992	0.514 / 2.693

수중에서는 각이 더 크다(포화 질량의 관성). K_{AE}는 0.411에서 0.562로 증가하고 K_{PE}는 2.948에서 2.589로 감소하며, 주동 압력은 증가하고 수동 저항은 감소한다.

풀이 (2/2)

풀이

2 지진 시 순압력도 및 근입깊이 D_E

상태	L_3 (m)	D_E / $D_{theoretical}$ (m)	M_{max} (kN·m/m)	D ≤ 7.02?
정적 (f = 1.3)	0.661	— / 5.40	209.58	D_{design} = 7.02
지진, k_v = +0.075	1.756	9.987	**633.77**	**아니요**
지진, k_v = −0.075	1.497	8.988	603.87	**아니요**

3 단면과 결과

$$W_{req,E} = \frac{M_{Ed,E}}{f_y} = \frac{633.77}{275\,000} = 2{,}305\ \text{cm}^3/\text{m} \ > \ 1\,400 \qquad \eta_E = \mathbf{1.646} \ > 1 \ \text{✗}$$

정적 설계 벽체는 이 지진을 **견디지 못한다**. 지진 시 분포도는 근입을 **2.96 m** 더 깊게 요구하며 (D_E = 9.99 > 7.02 m) 정적 모멘트의 **3.0배**(633.8 kN·m/m)를 요구한다. 시트파일 단면도 부족하다(η_E = 1.65). 지진 하중 조합에 대해서는 근입깊이와 단면을 함께 키워야 한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

지반반력계수법: 스프링 지반 위의 탄성 보

이론

한계평형은 근입깊이와 모멘트를 주지만, 벽체가 **얼마나 변위하는지**는 주지 않는다(수동저항이 완전히 발휘되는 파괴 시점을 나타낸다). 사용 상태의 변위를 구하기 위해서는 벽체를 탄성 보(EI)로, 양면의 지반을 서로 독립적인 스프링(Winkler)으로 취한다:

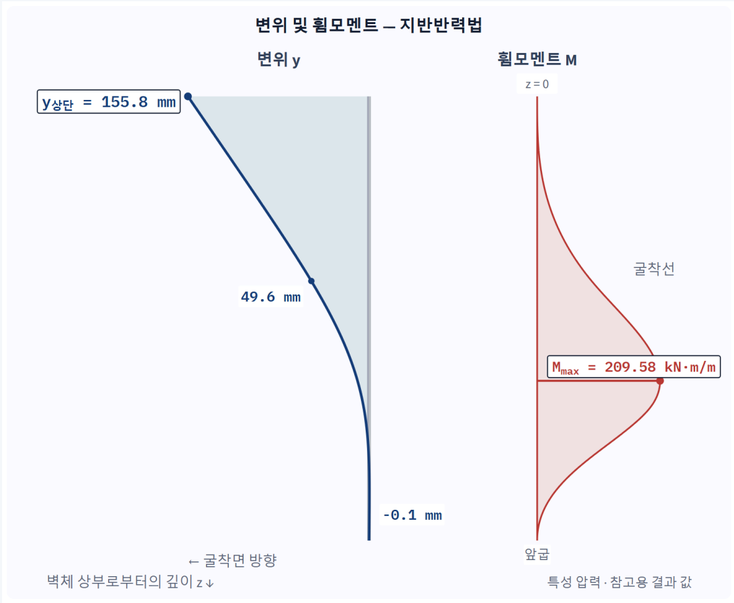
$$EI\frac{d^4y}{dz^4} = p_R(z) - p_E(z) + u_{net}(z)$$

$$p_R = K_0\sigma'_{v,r} - k_h y \;\; (K_a\sigma'_{v,r} \le p_R \le K_p\sigma'_{v,r}) \qquad p_E = K_0\sigma'_{v,e} + k_h y \;\; (\dots) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

스프링은 정지토압에서 시작하여 변위에 비례해 변하며 주동 및 수동 한계를 넘지 않는다. k_h는 지반 특성이라기보다 **모델 매개변수**이다; 모래에 대한 참고값: 느슨 4.8–16, 중간 조밀 9.6–80, 조밀 64–128 MN/m³.

벽체는 설계 길이(L + D_{design})이고 양단은 자유이다. 압력은 특성값이며 Rankine K_p를 그대로 사용하고 안전율은 적용하지 않는다. K_0의 값은 Jaky(1944)에 따른다. 벽체는 굴착 전에 설치되어 있으며 굴착은 단일 단계이다.

방정식은 보 유한요소로 풀며, 스프링이 탄성/주동/수동 상태에 이를 때까지 반복하여 계산하고, 결과는 **한계 없는 추정값**으로 제시한다.



문제

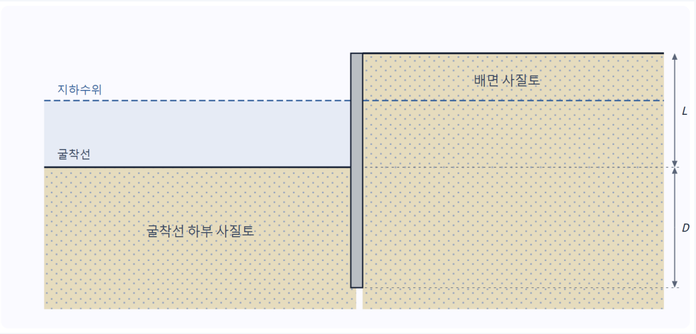
예제

조건

벽체	**예제 1–5의 벽체, 설계 길이 $L + D = 12.02$ m**
시트파일	$I = 21\,000$ **cm⁴/m,** $E = 210\,000$ **MPa (** $EI = 44\,100$ **kN·m²/m)**
지반	$k_h = 20$ **MN/m³ (양면);** $K_0 = 1 - \sin 32^\circ$**; 단일 단계 굴착**

구하는 값

벽체 상단, 굴착저면 및 선단에서의 **변위**; 모델의 최대 모멘트가 극한평형 모멘트와 일치하는가?



풀이

풀이

1 정지토압계수와 모델

$$K_0 = 1 - \sin 32^\circ = 0.4701 \qquad EI = 210\,000\,000(21\,000 \cdot 10^{-8}) = 44{,}100\ \text{kN·m}^2/\text{m}$$

$$EI\, y^{IV} = p_R - p_E \ \text{(유한요소, 스프링: 탄성/주동/수동)}$$

2 결과 (굴착면 방향, mm)

$$y_{üst} = \mathbf{155.8}\ \text{mm} \qquad y_{excavation\ base} = \mathbf{49.6}\ \text{mm} \qquad y_{tip} = -0.1\ \text{mm}$$

$$M_{max}^{model} = 209.58\ \text{kN·m/m}\ \ (z = 7.70\ \text{m}) \ \approx\ M_{max}^{limit\ equilibrium} = 209.58$$

벽체 상단은 굴착 쪽으로 **155.8 mm**, 굴착저면에서는 49.6 mm 이동하며, 선단은 거의 제자리에 머문다(-0.1 mm). 벽체는 선단 근처의 한 점을 중심으로 회전한다. 모델의 모멘트(209.58)는 한계평형 모멘트(209.58)와 같다. 배면의 주동 압력과 전면의 수동 압력이 모멘트가 발생하는 높이 전체에서 한계에 도달해 있다. 스프링에서는 수동 저항의 약 40%가 사용되었다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

풀이의 범위

이론

Rankine 압력은 벽면마찰 없이 유효 연직응력을 기준으로 계산한다; 지반 단면은 처음부터 끝까지 모래이며(층 수 제한 없음), 점토에 근입되는 경우는 별도의 모듈이다. 근입부에서는 모래가 하나인 경우 원자료의 닫힌 해를 사용하고, 모래가 여럿인 경우 같은 압력도를 수치적으로 푼다.

출처의 단순화된 순압력 분포도: 점 E를 지나는 하나의 직선과 선단 블록으로 구성되며, 회전점 O는 더 정밀하게 탐색하지 않는다. 물은 양면에서 같은 수위이거나 서로 다른 수위(침투 없음)이며, 침투와 그것이 수동저항에 미치는 영향은 모델링하지 않는다.

근입깊이는 자체 산정 경로의 여유(f 또는 FS_p)를 포함하며, 강구조 기준으로 다시 곱하지 않는다. 시트파일은 휨에 대해 주어진 단면계수로 검증하며, 전단, 국부좌굴, 부식 손실은 검토하지 않는다.

변위는 지반반력계수법으로 특성 토압을 사용하여 한계 없이 제시하며, 벽체 배면의 침하는 계산하지 않는다.

자립식 벽체는 D ≈ 1.5–2 L을 넘으면 경제적인 경우가 드물다; 이론 근입깊이가 3L을 초과하면 모듈이 경고한다. 앵커식 벽체는 다른 모듈(별도의 강의)에서 다룬다.

요약

핵심 정리

자립식 시트파일은 굴착 저면 아래의 수동저항으로 자립하며, 굴착 저면 위에서는 주동토압이, 아래에서는 순압력이 작용한다: σ'_2에서 시작하여 E에서 0이 되는 직선($L_3 = \sigma'_2/(\gamma'(K_p - K_a))$) 및 선단의 L_5 블록

평형: P, $\bar{z}$, $\Sigma F_H = 0$ 및 $\Sigma M = 0 \rightarrow L_4$에 대한 4차 방정식; $\mathbf{D_{theoretical} = L_3 + L_4}$ (예제: 5.40 m)

분자: f = 1.2–1.3을 적용한 D(예: 7.02 m, 모멘트는 동일) 또는 K_p/FS_p(깊이와 모멘트가 증가); 주어진 깊이에서의 $FS_{p,mob}$ 값과 **두 가지 힘 경우 중 큰 값**

$\mathbf{M_{max}}$는 전단력이 0인 위치에서 발생한다: $z' = \sqrt{(2P/m)}$, $M_{max} = P(\bar{z} + z') - m\,z'^3/6$ (예제: 209.58 kN·m/m)

물, 상재하중, 경사: 물이 없으면 $\gamma' \rightarrow \gamma$; q는 각 종좌표에 qK_a를 더하며; 지하수위가 달라지고 상재하중이 작용하면 D와 M이 크게 증가한다

단면: EN 1993-1-1 $M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \le W\,f_y/\gamma_{M0}$ ($\eta = 0.735$); AISC LRFD/ASD (0.968 / 0.909)

지진: K_{AE}, K_{PE}, θ_w; $D_E \le D_{design}$을 만족하는지 검토한다: 예제 벽체는 지진을 견디지 못한다 (D_E = 9.99 m, M = 634 kN·m/m)

변위: 스프링 지반 위의 탄성보; 예제에서 말뚝머리 ≈ 156 mm, 선단 ≈ 0

참고문헌

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning.

EN 1993-1-1:2005 — Design of steel structures, general rules.

ANSI/AISC 360-22 — Specification for Structural Steel Buildings.

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

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

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressure during earthquakes. World Engineering Congress, Tokyo. Okabe, S. (1926). General theory of earth pressure. Journal of the Japan Society of Civil Engineering, 12(1).

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98, 418–433.

참고

수치 예제는 모두 모듈의 자체 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈에서도 동일한 값이 얻어진다. 모듈 페이지의 단계별 예제도 이 벽체이다(L = 5 m, γ = 15.9; γ_{sat} = 19.33 kN/m³, φ′ = 32°, 지하수위 2 m).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

벽체 높이, 층상 모래 프로필, 지하수, 상재하중, 시트파일 단면, 지진계수를 GeoTerva에 입력하면 모듈이 압력도, 근입깊이, 모멘트, 단면 검토, 변위를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com