지반공학 강의 자료 · 옹벽

중력식 옹벽

강의: 석재 또는 콘크리트 중력식 옹벽의 외적 안정; 벽체와 그와 함께 움직이는 지반, 주동토압과 수동토압, 물, 양압력, 지진; 활동, 전도, 지지력 검토; 각 주제별 계산 예제.

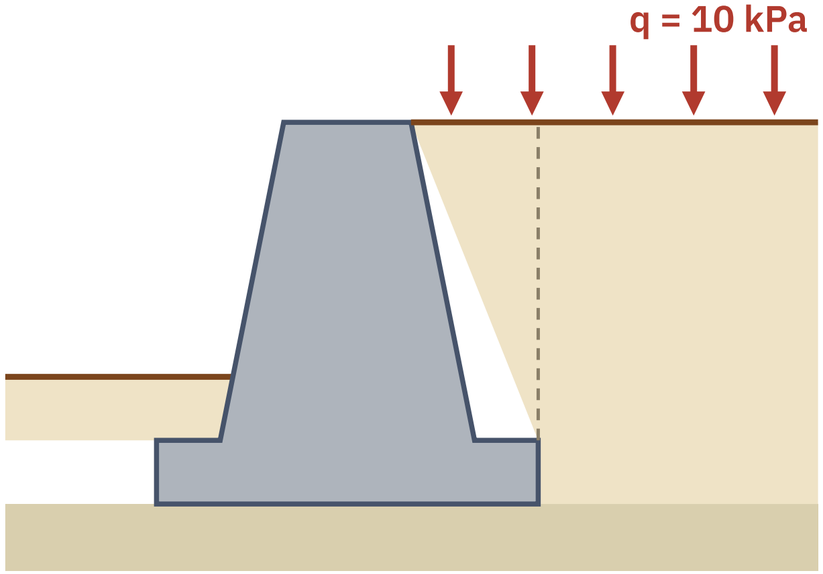
활동 · 전도 · 지지력

Rankine · Coulomb · Mononobe–Okabe

수압과 양압력

지진 시 관성력

하중 집계표



개요

이 강의에서 다루는 내용

중력식 옹벽의 **형상**과 중량을 부분으로 나누어(면적, 도심, 모멘트 팔) 계산하는 방법

벽체와 함께 움직이는 **흙 블록**과 기초 뒤쪽 가장자리를 지나는 **연직 압력면**

주동(Rankine = Coulomb, 연직면 기준), 상재하중, **수동 전면 저항**(K_{mob}), **물 + 양압력**의 힘

하중 집계표와 단일 부호 규약 $M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$를 사용한 **활동, 전도 및 지지력** 검토

지진 시 **Mononobe–Okabe** 추력, 지진 증분 및 옹벽 관성력의 반영

결과 읽기: 안전율, 편심, 기초 저면 응력

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

모든 값은 옹벽 길이 1.00 m당이다(kN/m, kN·m/m); 압력은 kPa. 예제 옹벽: H = 3 m 석조 옹벽(22 kN/m³).

무엇을 풀고 어떻게 그리는가?

이론

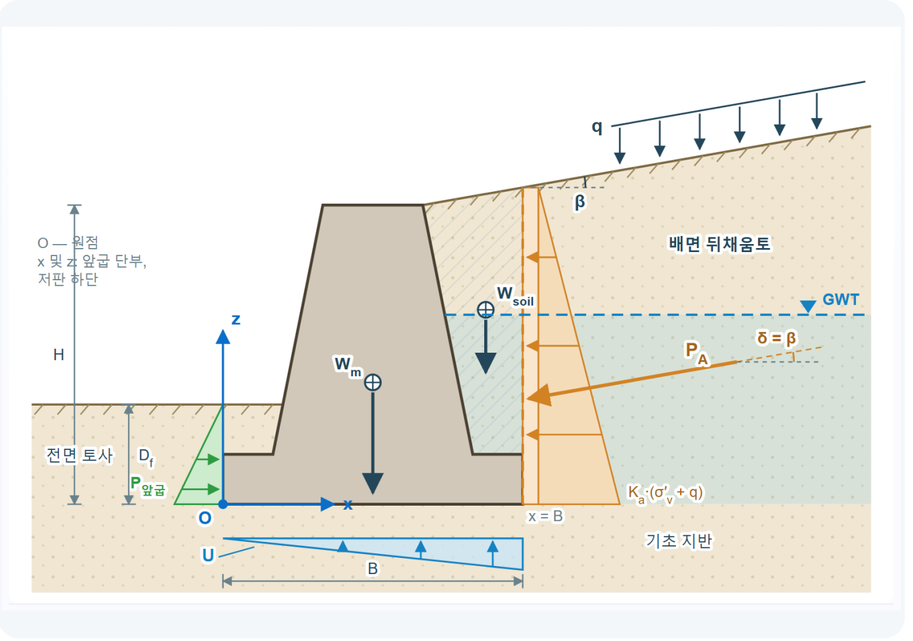
중력식 옹벽은 활동과 전도에 **자중으로** 저항한다. 이 모듈은 벽체가 경사진 사다리꼴 단면이고 양쪽에 계단식 굽이 있는 석조 또는 매스콘크리트 옹벽을 검토한다:

$$B = W_{bl} + W_{dl} + W_u + W_{dr} + W_{br}$$

옹벽: H 전체 높이, W_u 상단 폭, W_{dl}, W_{dr} 전면 및 배면 경사 오프셋, W_{bl}, W_{br} 기초부 돌출폭, H_{fl}, H_{fr} 기초부 높이; 단위중량은 석재 22, 콘크리트 24 kN/m³.

지반: 비점성 뒤채움($c' = 0$), 경사 지표면 β, 상재하중 q, 지하수, 전면에 있는 높이 D_f의 흙과 물.

세 가지 이론: Rankine, Coulomb(정적), Mononobe–Okabe(지진). **검토 항목**: 활동, 전도, 편심, 지지력.



자유물체도, 힘 집계표, 단일 부호 규약

이론

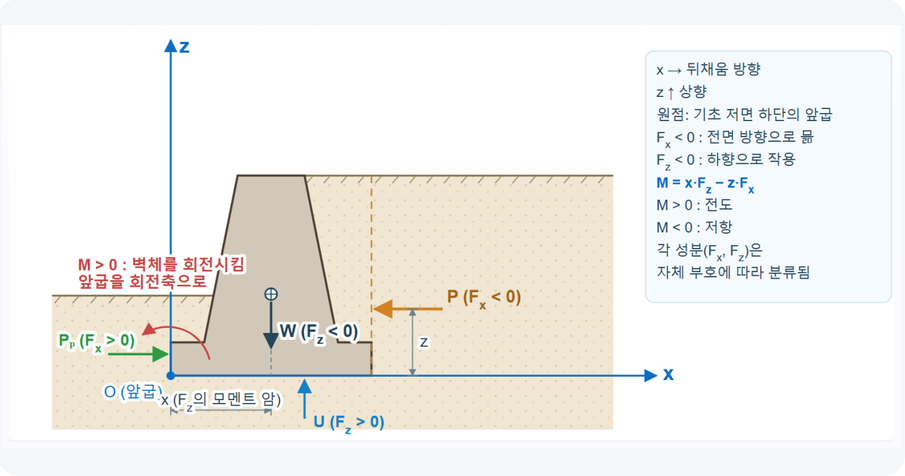
안정은 **평형** 문제이다: 먼저 무엇이 평형을 이루는지, 그리고 힘의 부호를 어떻게 부여할지를 정한다. 원점 O는 **앞굽**(앞쪽 아래 모서리)에 두며, x는 뒤채움 쪽, z는 위쪽이다. 힘은 (F_x, F_z) 성분과 작용점으로 표기하며, O에 대한 모멘트는 다음과 같다:

$$M = x\,F_z - z\,F_x \qquad M > 0:\ \text{전도}, \quad M < 0:\ \text{부착}$$

중량($F_z = -W$, $x > 0$)의 경우 $M = -xW < 0$: 벽체의 전도에 저항한다. 전방 추력($F_x < 0$)의 경우 $M = -zF_x > 0$: 벽체를 전도시킨다. 양압력($F_z > 0$)은 전도시키고, 전면 저항($F_x > 0$)은 전도에 저항한다.

어떤 힘도 미리 "저항"으로 분류하지 않으며, 각 성분은 자신의 부호대로 계산한다(경사진 토압 합력의 연직 성분은 올바르게 저항으로 작용한다).

자유물체 = 벽체 + 벽체와 함께 움직이는 지반. **하중 집계표**의 각 항목은 세 가지 검토 모두에서 똑같이 읽히므로 어떤 힘도 한 검토에서는 빠지고 다른 검토에서는 포함될 수 없다.



구성 요소 분할, 무게중심 및 모멘트 팔

이론

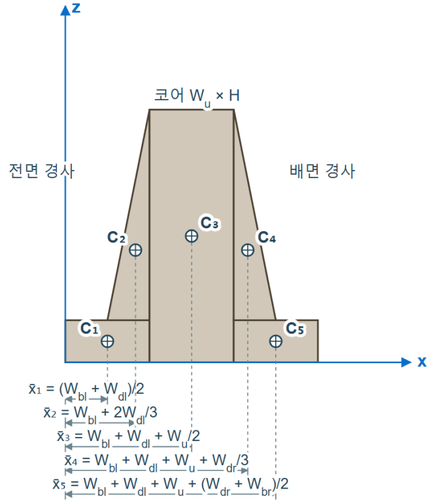
벽체의 무게와 앞굽에 대한 그 모멘트는 두 가지 안정 검토의 기초이기도 하다. 단면은 면적과 도심을 알 수 있는 단순한 형상(앞굽, 전면 경사부, 코어, 배면 경사부, 뒷굽)으로 분할한다:

$$W_i = \gamma_m A_i \qquad W_m = \sum W_i \qquad \bar{x}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{x}_i}{W_m} \qquad \bar{z}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{z}_i}{W_m}$$

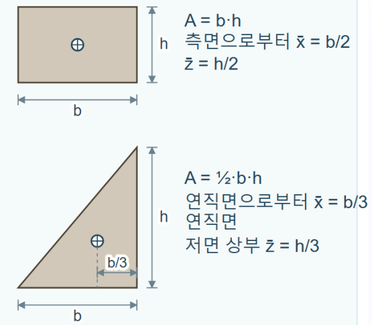
하중 집계표에서 벽체는 하나의 항목이다: $F_z = -W_m$이고 작용 위치는 $\bar{x}_m$이며, 모멘트는 $M = -W_m\bar{x}_m = -\Sigma M_i$이다.

높이 $\bar{z}_m$은 수평 관성력 $k_h W_m$(지진)에만 필요하다.

모듈은 전체 단면도 하나의 다각형으로 계산하며, 두 결과는 10^{-9} 이내로 일치한다.



단면 형상 라이브러리



임의 다각형 (신발끈 공식):

$A = \tfrac{1}{2}\cdot\Sigma(x_i\cdot z_{i+1} - x_{i+1}\cdot z_i)$

$\bar{x} = \Sigma(x_i + x_{i+1})(x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i) \,/\, 6A$

$\bar{z} = \Sigma(z_i + z_{i+1})(x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i) \,/\, 6A$

문제

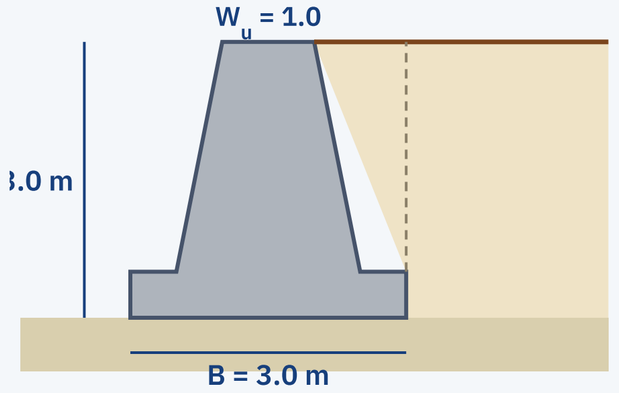
예제

구하는 값

다섯 부분의 면적과 중량; W_m, $\bar{x}_m$, $\bar{z}_m$.

조건

단면	$H = 3.0$ m; $W_u = 1.0$ m; $W_{dl} = W_{dr} = 0.5$ m; $W_{bl} = W_{br} = 0.5$ m; $H_{fl} = H_{fr} = 0.5$ m (B = 3.0 m)
재료	**석조 옹벽:** $\gamma_m = 22$ kN/m^3



풀이

풀이

1 구성 부분(예: 앞쪽 경사부: A = ½(0.5)(3.0 − 0.5) = 0.625; $\bar{x} = W_{bl} + 2W_{dl}/3 = 0.833$; $\bar{z} = H_{fl} + (H - H_{fl})/3 = 1.333$)

부분	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 22A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
앞굽	0.500	0.500	0.250	11.00	5.50	2.75
전면 사면	0.625	0.833	1.333	13.75	11.46	18.33
본체 (코어)	3.000	1.500	1.500	66.00	99.00	99.00
배면 사면	0.625	2.167	1.333	13.75	29.79	18.33
뒷굽	0.500	2.500	0.250	11.00	27.50	2.75
합계	**5.250**			**115.50**	**173.25**	**141.17**

2 벽체의 무게중심

$$\bar{x}_m = \frac{173.25}{115.50} = \mathbf{1.500}\ \text{m} \qquad \bar{z}_m = \frac{141.17}{115.50} = \mathbf{1.222}\ \text{m}$$

옹벽의 중량은 **W_m = 115.50 kN/m**, 앞굽으로부터 $\bar{x}_m$ = 1.50 m, 저면으로부터 $\bar{z}_m$ = 1.22 m이며, 모멘트는 M = −173.25 kN·m/m (저항)이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

연직 압력면과 지반 블록

이론

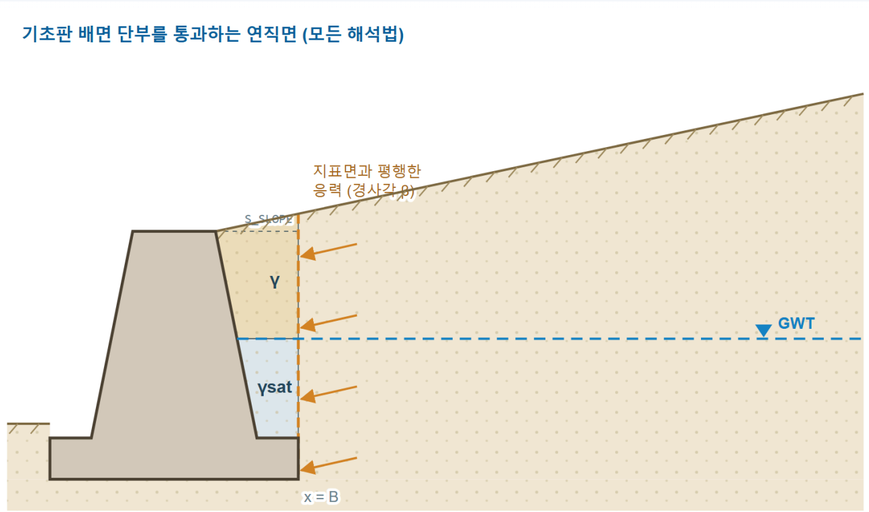
토압은 왜 옹벽의 배면 경사면이 아니라 **저판의 뒤쪽 끝**에 작용하는가? 뒷굽 위의 흙은 옹벽에 대해 미끄러질 수 없으며, 옹벽이 움직이면 함께 움직인다. 뒤채움 속의 파괴면은 배면 경사면이 아니라 **뒷굽의 뒤쪽 끝**에서 시작한다. 일관된 자유물체는 옹벽 + 이 흙 블록이며, 그 외면의 **외부 압력면**은 x = B에서 연직이다:

이 평면은 저판 뒤쪽 끝 위의 지표면에서 저판 아래로 내려가며, 경사진 뒤채움에서는 지표면의 상승분도 포함한다. 평면과 벽체 배면 사이의 모든 것은 **중량**이다; 평면은 지반 대 지반이므로 벽면마찰은 고려하지 않으며 추력은 $\delta = \beta$로 작용한다.

앞쪽에서는 앞굽 위의 성토도 옹벽과 함께 움직인다: 연직 하중 W_{toe}; $D_f = 0$을 입력하면 전면 지반을 고려할 수 있다는 뜻이다.

뒷굽 위 **상재하중**의 연직 부분(Q_{heel})은 유리하게 작용하지만 있을 수도 없을 수도 있는 하중으로 간주되므로 **어떤 검토에도 포함되지 않는다**; 반면 그 수평 영향은 항상 계산에 포함한다.

해석은 전응력으로 수행한다: 수중 지반은 γ_{sat}로 무게를 계산하고, 물 자체는 별도의 힘(U_{rear}, 양압력)으로 더한다; γ'와 양압력은 함께 사용하지 않는다.



문제

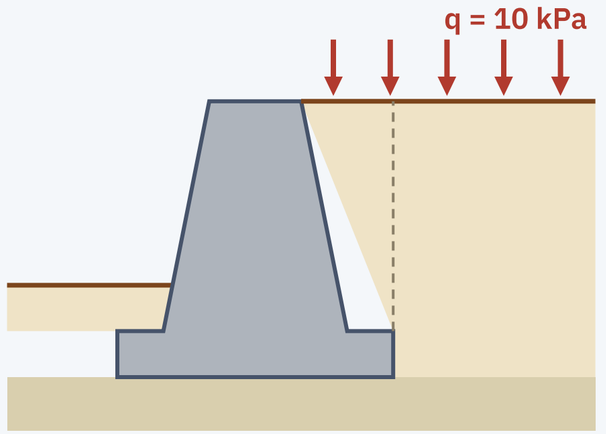
예제

조건

벽체	**예제 1의 단면; 전면 지반 높이 $D_f = 1.0$ m**
지반	**건조 뒤채움: $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$; 수평 지표면**
상재하중	$q = 10$ **kPa (지표면에서)**

구하는 값

옹벽과 함께 움직이는 **흙 블록**의 중량과 위치; **전면 성토**; Q_{heel} 항이 검토에 들어가지 않는 이유는?



풀이 (1/2)

풀이

1 뒷굽 위의 직사각형 + 배면 사면 옆의 삼각형(x = B = 3.0 평면까지)

$$A_r = W_{br}(H - H_{fr}) = 0.5(2.5) = 1.250\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.75,\ \bar{z} = 1.75)$$

$$A_t = \tfrac{1}{2} W_{dr}(H - H_{fr}) = 0.625\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.333,\ \bar{z} = 2.167)$$

$$W_s = \gamma(A_r + A_t) = 18(1.875) = \mathbf{33.75}\ \text{kN/m}$$

2 위치

$$\bar{x}_s = \frac{1.250(2.75) + 0.625(2.333)}{1.875} = \mathbf{2.611}\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = \mathbf{1.889}\ \text{m}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 전면 성토 (앞굽 위, D_f = 1.0 m)와 상재하중

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(0.5 + 0.60)(0.5) = 0.275\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.275) = \mathbf{4.95}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0.276)$$

$$Q_{heel} = q(B - x_{BT}) = 10(3 - 2) = \mathbf{10.0}\ \text{kN/m}\ \text{(어떤 검토에도 포함되지 않음)}$$

전체 연직하중 N = W_m + W_s + W_{toe} = 115.50 + 33.75 + 4.95 = **154.20 kN/m**. Q_{heel} = 10.00 kN/m는 집계표에서 "미사용" 항목이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

연직면에서의 Rankine과 Coulomb

이론

뒤채움 표면이 β로 경사져 있으면, Rankine의 반무한 사면 해에서 연직면의 응력은 **표면과 평행하다**: $\sigma'_a = K_{a\beta}\sigma'_v$:

$$K_{a\beta} = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'}\ (\beta = 0)$$

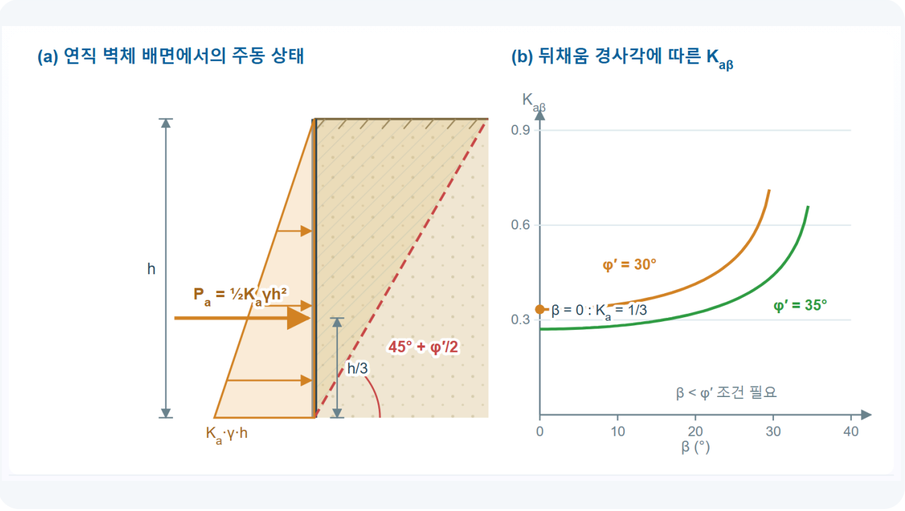
$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ \ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ \ (h/2)$$

제곱근이 성립하려면 $\beta < \varphi'$이어야 하며, $\beta \geq \varphi'$이면 사면 자체가 불안정하므로 계산이 차단된다.

Coulomb: 연직면($\alpha = 90°$)에서 $\delta = \beta$인 경우 K_a는 Rankine $K_{a\beta}$와 **모든 β에 대해 정확히 같다**. 두 방법은 이 면에서 같은 압력을 산출한다. h = 면의 높이(지표면 상승분 포함).

수평 성분 P cos β, 연직 성분 P sin β (상향 경사면에서는 아래 방향: 저항 작용).

상재하중은 두 번 계산한다 (q를 포함한 경우와 q 없이); P_Q는 그 차이이다.



문제

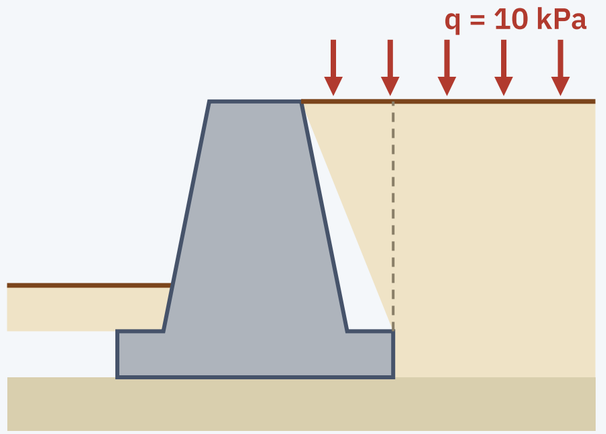
예제

구하는 값

K_a, 흙의 토압 합력 P_A, 상재하중에 의한 토압 합력 P_Q 및 이들의 모멘트.

조건

벽체와 지반	**예제 2의 옹벽과 뒤채움:** $h = H = 3.0$ **m;** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$**; 수평 지표면**
상재하중	$q = 10$ **kPa**



풀이

풀이

1 K_a = (1 − sin30°)/(1 + sin30°) = 0.3333; 추력 (연직면 내, 수평)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(9) = \mathbf{27.00}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.00\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(3) = \mathbf{10.00}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.50\ \text{m})$$

2 전체 수평 추력과 전도 모멘트 (앞굽 기준)

$$\Sigma H_{drive} = 27.0 + 10.0 = \mathbf{37.0}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 27.0(1.00) + 10.0(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

흙의 토압 합력 27.00, 상재하중에 의한 합력 10.00 kN/m: 합계 **37.00 kN/m**, 앞굽에 대한 모멘트 **42.00 kN·m/m**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

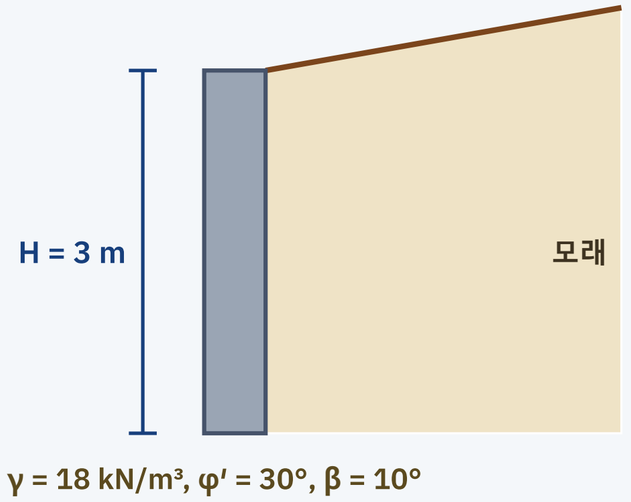
예제

구하는 값

$K_{a\beta}$, 토압 합력 성분; 결과의 수평 뒤채움 대비 변화(활동, 전도, 편심).

조건

벽체와 지반	**예제 2의 벽체; 동일한 뒤채움이나 지표면이 $\beta = 10^\circ$ 상승하는 경우 (벽체에서 멀어질수록)**
상재하중	$q = 10$ **kPa**



풀이 (1/2)

풀이

1 계수 $K_{a\beta}$ ($\cos\beta = 0.9848$, $\sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'} = 0.4689$)

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - r}{\cos\beta + r} = 0.9848\,\frac{0.5159}{1.4537} = \mathbf{0.3495}\ \ (\text{수평으로 } 0.3333)$$

2 작용력 (h = 평면의 높이 = H + 지표면 상승분; 엔진)

$$P_A:\ F_x = 31.25,\ F_z = 5.51\ \text{kN/m}\ \ (\text{수평 및 수직})$$

$$P_Q:\ F_x = 10.93,\ F_z = 1.93\ \text{kN/m}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 검토 항목 (엔진)

$$\Sigma F_z = -N = -163.23 \text{ kN/m} \quad (\text{지반 블록 } 35.34)$$

$$FS_s = 2.412 \qquad FS_o = 5.734 \qquad e = 0.037 \text{ m} \qquad q_{max} = 58.4 \text{ kPa}$$

상향 경사 뒤채움은 토압 합력을 키우지만($K_{a\beta}$ 0.333 → 0.350), **합력의 연직 성분**과 더 무거워진 흙 블록이 안정에 유리하게 작용한다: 활동 FS 2.62 → 2.41, 전도 FS 6.26 → 5.73; 편심 0.068 → 0.037 m.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

정지 상태와 수동 상태 사이의 복합 계수

이론

벽 앞쪽 지반(c′ = 0)은 Rankine 수동토압계수와 Jaky 정지토압계수의 **혼합**으로 정의된다. 완전한 수동 저항은 기능을 유지하는 벽체가 허용하지 않을 크기의 변위를 필요로 하기 때문이다:

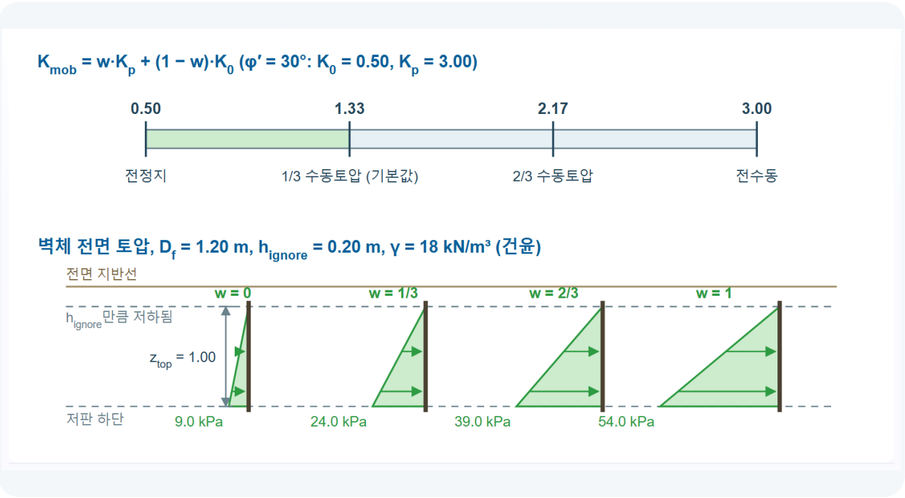
$$K_{mob} = w\,K_p + (1-w)\,K_0 \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

$$p(z) = K_{mob}\,\sigma'_v(z) \qquad P_P = \tfrac{1}{2} K_{mob}\gamma D_f^2 \;\; (D_f/3)$$

w = 0은 완전 정지 상태, 1/3(기본값), 2/3, 1은 완전 수동 상태이다. 앞쪽 지반의 상부 $\mathbf{h_{ignore}}$ 두께(굴착될 수 있거나 연약해질 수 있는 부분)는 계산에서 제외한다.

전면 저항은 **활동에서만**(정적 조건에서는 전부, 지진 시에는 $\eta_{p,E}$를 적용) 반영하며, **전도와 지지력 검토에서는 전혀** 사용하지 않는다.

전면의 물(h_{wf})에 의한 추력은 뒤쪽을 향하며 순추력을 감소시킨다.



문제

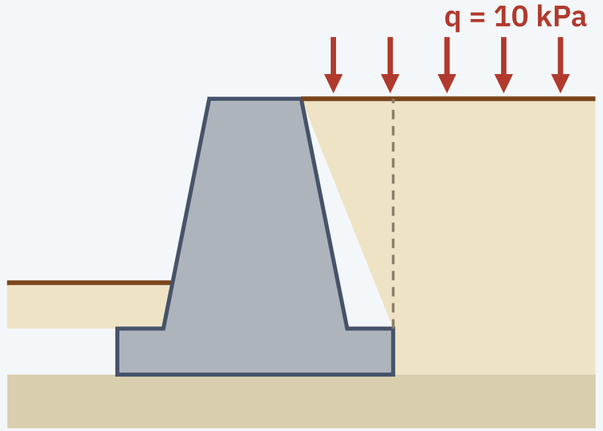
예제

조건

전면 지반	$D_f = 1.0$ **m;** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$**;** $h_{ignore} = 0$
경우	**완전 정지상태, 1/3, 2/3, 완전 수동; 그리고 전면 저항을 전혀 반영하지 않는 경우**

구하는 값

K_{mob}, P_P 및 활동 안전율 FS_s(예제 2의 벽체 기준).



풀이

풀이

1 K_{mob}과 추력 (기본값 w = 1/3)

$$K_{mob} = \tfrac{1}{3}(3.000) + \tfrac{2}{3}(0.500) = \mathbf{1.333}$$

$$P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_f^2 = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1)^2 = \mathbf{12.0}\ \text{kN/m} \quad (z = D_f/3 = 0.333\ \text{m})$$

2 네 가지 경우($FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive} = (84.81 + P_P)/37.0$)

상태	w	K_{mob}	P_P (kN/m)	FS_s
완전 정지 상태	0	0.500	4.50	2.414
수동 1/3 + 정지 2/3 (기본값)	1/3	1.333	12.00	2.616
2/3 수동 + 1/3 정지	2/3	2.167	19.50	2.819
완전 수동	1	3.000	27.00	3.022
선단지지력은 반영하지 않는다	–	–	0	2.292

전면 저항의 반영분에 따라 FS_s는 2.29에서 3.02 사이에서 변한다(기본값 **2.62**). 전면 지반을 굴착할 수 있으면 반영분이 0이 되므로, D_f와 h_{ignore}는 신중하게 선택해야 한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

동일한 하중 집계표에서 도출하는 세 가지 검토

이론

활동: 저면은 마찰로 저항한다. 필요 전단력 $\Sigma H_{drive} - \Sigma P_{resist}$, 이용 가능한 전단력 $\mu_b N$(부착력 없음; N은 양압력을 포함한 유효 수직력). 저항은 분모에 합산된다:

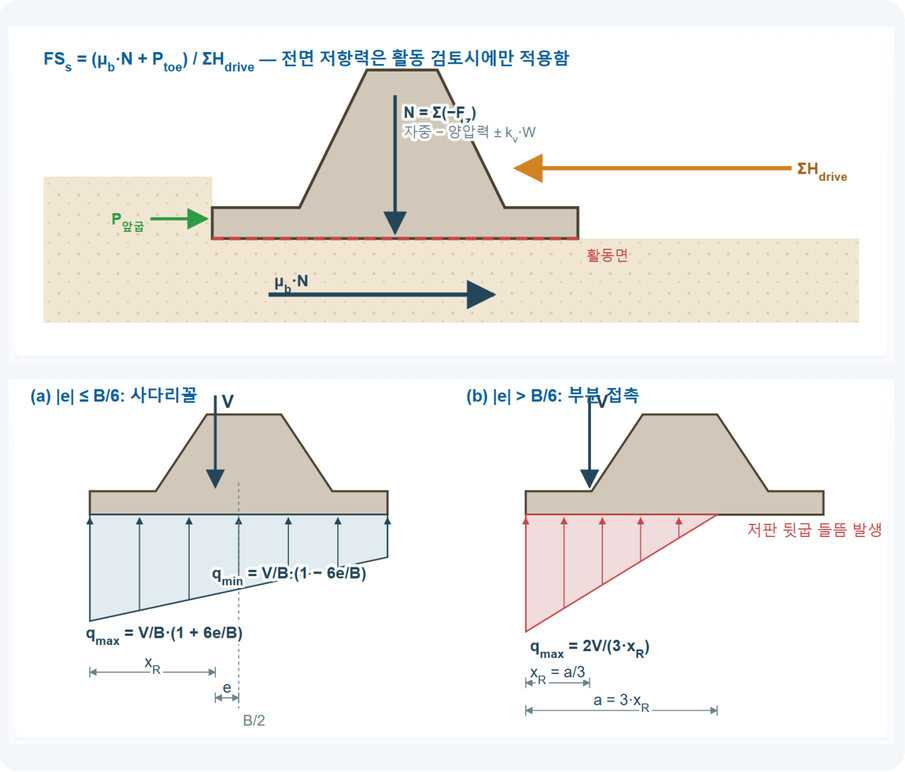
$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad \mu_b = \tan\delta_b$$

전도는 앞굽을 중심으로 한다: 각 요소의 $-zF_x$와 xF_z 성분은 부호에 따라 $\Sigma M_{overturning}$ 또는 $\Sigma M_{resisting}$에 포함되며, 앞쪽 저항은 포함하지 않는다:

$$FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

지지력: |e| ≤ B/6이면 저면 전체가 접촉하며, 그렇지 않으면 지반이 인장을 받지 못해 일부만 접촉한다:

$$q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$



문제

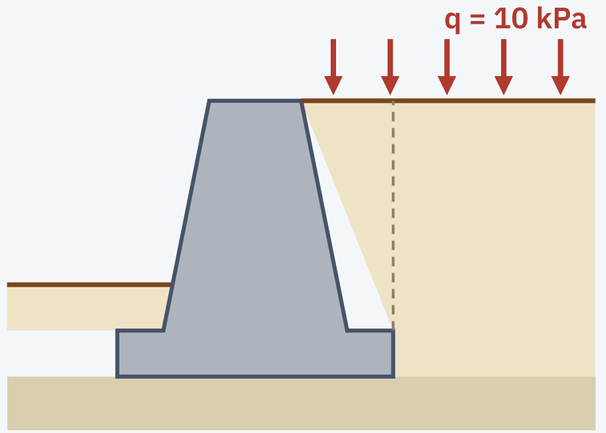
예제

조건

옹벽과 하중	**예제 1–5의 벽체:** $B = 3.0$ **m;** $W_m = 115.5,\ W_s = 33.75,\ W_{toe} = 4.95$ kN/m**;** $P_A = 27.0,\ P_Q = 10.0$ kN/m
저항	$\mu_b = 0.55$**; 전면 수동저항** $P_P = 12.0$ **kN/m (w = 1/3);** $q_{all} = 200$ **kPa**
필요	$FS_s \geq 1.5,\ \ FS_o \geq 2.0$**; 저면이 완전히 접촉해야 한다**

구하는 값

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} 및 각 검토의 결과.



풀이 (1/3)

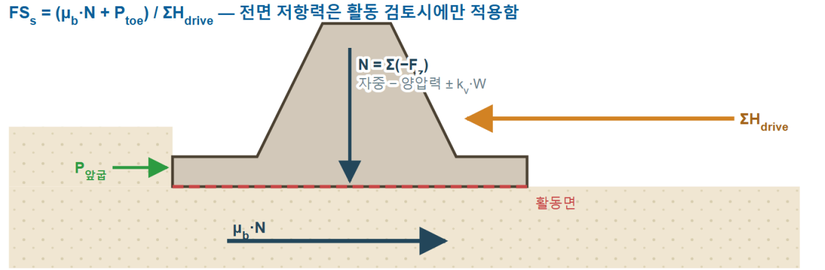
풀이

1 저면 마찰: N = W_m + W_s + W_{toe} (Q_{heel} 제외)

$$N = 115.50 + 33.75 + 4.95 = \mathbf{154.20}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(154.20) = 84.81\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{84.81 + 12.0}{37.0} = \mathbf{2.616}\ \geq 1.5\ \checkmark$$



풀이 (2/3)

풀이

2 전도 모멘트 (앞굽 기준; 추력만)

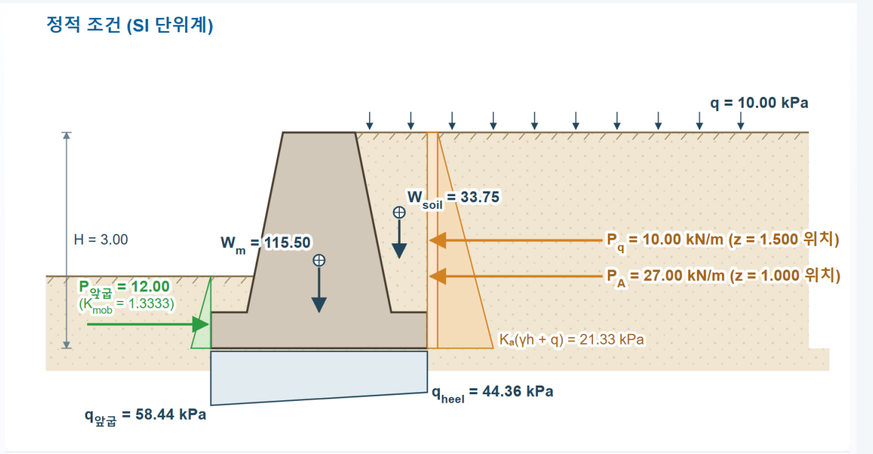
$$M_o = P_A(1.00) + P_Q(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

3 저항 모멘트: 벽체 + 흙 블록 + 전면 성토

$$M_r = W_m\bar{x}_m + W_s\bar{x}_s + W_{toe}\bar{x}_{toe}$$

$$= 173.25 + 88.13 + 1.36 = \mathbf{262.74}$$

$$FS_o = \frac{262.74}{42.0} = \mathbf{6.256}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



풀이 (3/3)

풀이

4 합력의 위치와 편심

$$\Sigma M = M_o - M_r = 42.00 - 262.74 = -220.74$$

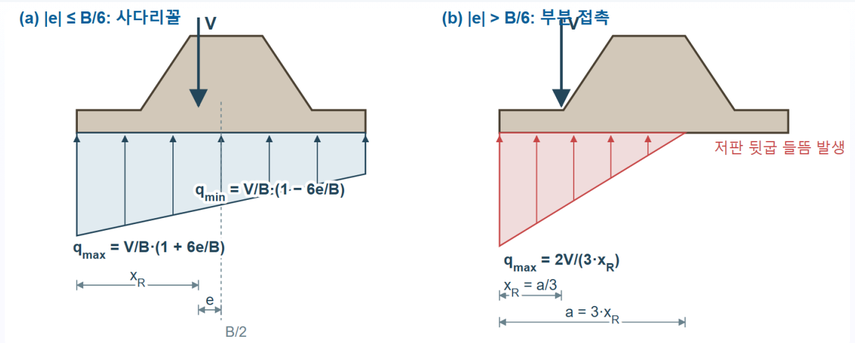
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{220.74}{154.2} = \mathbf{1.4315}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.0685}\ \text{m} \le \frac{B}{6} = 0.500\ \checkmark$$

5 기초 저면 응력 (완전 접촉)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.0685)}{3}\right) = \mathbf{58.44}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{44.36}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.62**, FS_o = **6.26**, e = 0.068 m, q_{max} = **58.4 kPa** ≤ 200, q_{min} = 44.4 kPa > 0: **정적 상태에서 모든 검토 항목을 만족한다.**

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

양쪽 모두 정수압, 저면에는 선형 분포 양압력

이론

수압은 등방성이며 접하는 모든 면에 수직으로 작용한다. 자유물체는 세 경계에서 물로 둘러싸여 있다: 배면 압력면, 벽체 전면, 저판 하면. 각각은 하중 집계표에서 별도 항목이다:

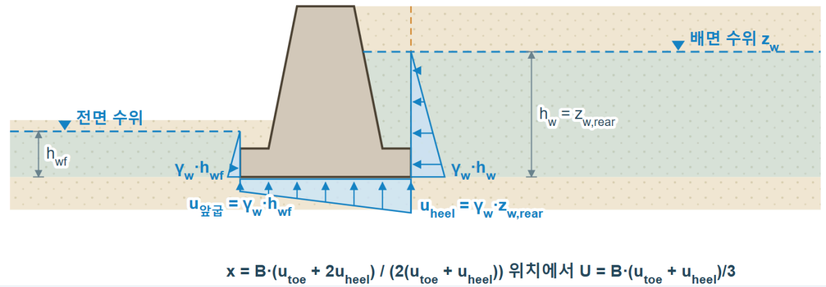
$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \;\; (h_w/3) \qquad U_{front} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_{wf}^2 \;\; (h_{wf}/3,\ \text{뒤로})$$

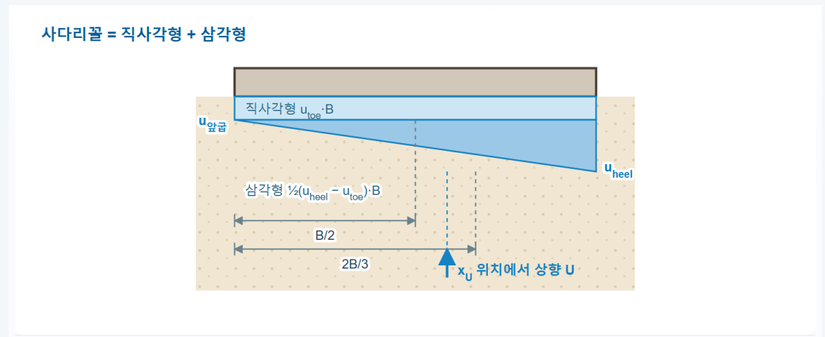
저면 아래의 간극수압은 앞굽의 수두에서 뒷굽 끝의 수두까지 **선형**으로 변한다 (직선 수두 손실):

$$U = \frac{B\,(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B\,(u_{toe} + 2u_{heel})}{3\,(u_{toe} + u_{heel})}$$

양압력은 위쪽으로 작용하며(F_z = +U) N을 감소시키고 그에 따라 저면 마찰도 감소하며, 전도 모멘트 $U \cdot x_U$를 추가한다.

$h_W = H - z_W$ (z_W: 벽체 상단에서 지하수면까지의 깊이); 전면 수위 h_{wf}는 배면 방향으로 작용하여 순 추력을 감소시킨다. 수위가 서로 다르면 수리학적 안정성(침투)을 별도로 검토해야 한다.





문제

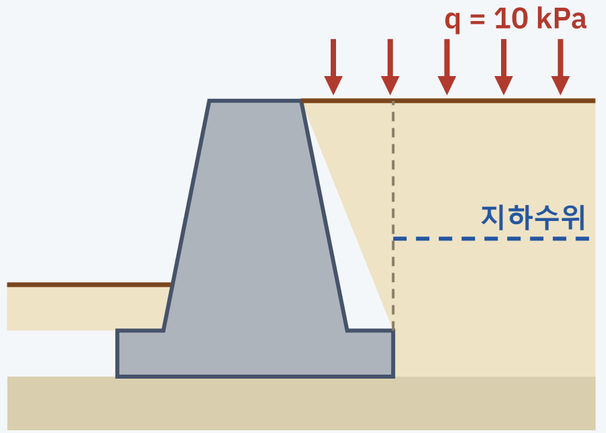
예제

조건

벽체와 지반	**예제 1–5의 옹벽과 뒤채움 ($\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$, $q = 10$ kPa); 정적 상태**
물	**뒤채움의 지하수위는 벽체 상단 1.5 m 아래($h_w = 1.5$ m); 전면에 물 없음; 저면 아래 선형 양압력**

구하는 값

흙의 토압 합력과 물의 변화; **양압력**과 **N**; FS_s, FS_o, e, q_{max}.



풀이 (1/2)

풀이

1 토압 합력 (위쪽 γ, 아래쪽 γ′ = 20 − 9.81 = 10.19) 및 수압 합력

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma d_1^2 + K_a\gamma d_1 d_2 + \tfrac{1}{2}K_a\gamma' d_2^2$$

$$= 6.75 + 13.50 + 3.82 = \mathbf{24.07}\ \text{kN/m}\ \ (z = 1.061\ \text{m})$$

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}(9.81)(1.5)^2 = \mathbf{11.04}\ \text{kN/m}\ \ (z = 0.50\ \text{m}) \qquad P_Q = 10.0$$

2 양압력 (앞굽에서 u = 0, 뒷굽에서 u = 9.81·1.5 = 14.72 kPa; 삼각형 분포)

$$U = \tfrac{1}{2}(14.72)(3.0) = \mathbf{22.07}\ \text{kN/m (상향)}\ \ \text{at}\ x_U = \tfrac{2B}{3} = 2.00\ \text{m}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 유효 수직력과 마찰력(흙 블록에 γ_{sat} 적용: $W_s = 34.95$)

$$N = W_m + W_s + W_{toe} - U = 115.50 + 34.95 + 4.95 - 22.07 = \mathbf{133.33}\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{0.55(133.33) + 12.0}{24.07 + 10.0 + 11.04} = \frac{85.33}{45.11} = \mathbf{1.892}$$

4 전도와 저면

$$M_o = 25.54 + 15.00 + 5.52 + 44.14 = 90.20\ \ (P_A,\ P_Q,\ U_{rear},\ \text{양압력}) \qquad M_r = 265.98$$

$$FS_o = \frac{265.98}{90.20} = \mathbf{2.949} \qquad x_R = \frac{175.78}{133.33} = 1.318\ \text{m} \quad e = 0.182\ \text{m}$$

$$q_{max} = \mathbf{60.58} \qquad q_{min} = \mathbf{28.30}\ \text{kPa}$$

물의 영향으로 FS_s는 2.62 → **1.89**로, FS_o는 6.26 → **2.95**로, q_{min}은 44.4 → 28.3 kPa로 감소하였다(양압력이 N을 22.1 kN/m만큼 줄이고 44.1 kN·m/m의 전도 모멘트를 추가하였다). 검토는 여전히 만족한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

Mononobe–Okabe 토압합력과 벽체의 관성력

이론

의사정적 방법에서는 각 질량에 수평 $k_h mg$와 연직 $\pm k_v mg$의 힘이 작용하며, 임계 방향은 관성력이 앞쪽(토압과 같은 방향)으로 미는 경우이다. 중력과 관성력은 함께 θ만큼 회전한 중력장처럼 작용하며, Coulomb 쐐기는 관성력을 포함하여 해석한다(Mononobe–Okabe). 연직 평면, 수평 뒤채움(δ = β = 0)에서:

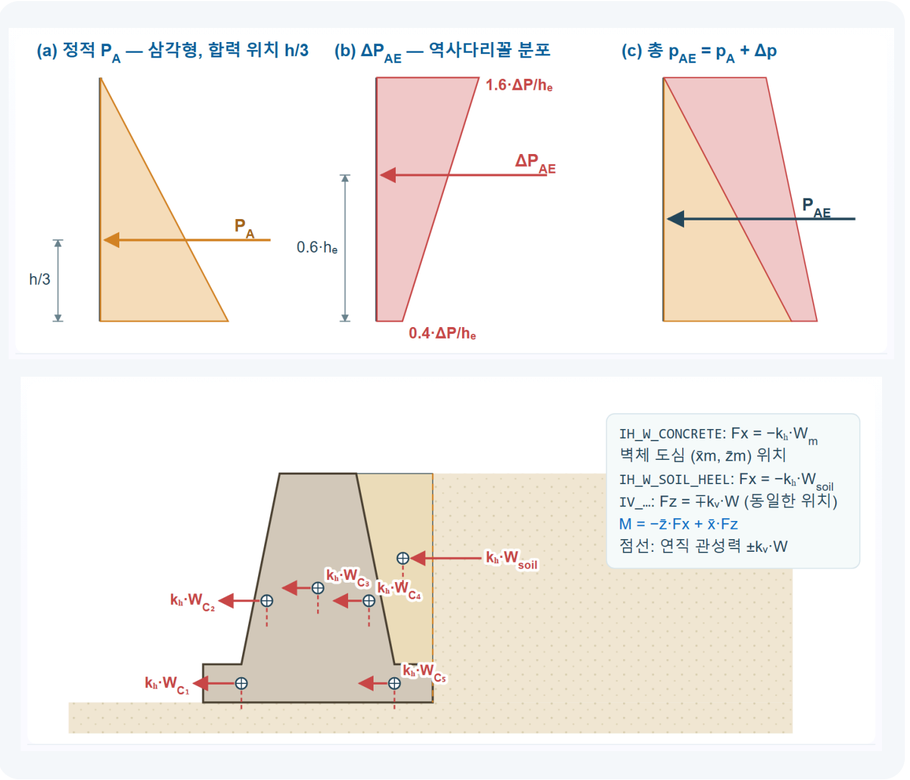
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE}$$

φ′ − θ < 0이면 어떤 쐐기도 평형을 유지할 수 없다. "해 없음"이며, 검토 조건은 만족되지 않는 것으로 간주한다.

분포: P_{AE}는 크기를 주며 위치는 주지 않는다. $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_{A,static}$의 분포는 역사다리꼴이며 (상단 1.6ΔP/h, 하단 0.4ΔP/h; 합력은 **0.6h** 위치), 정적 부분은 정적 분포 형태를 유지한다.

관성: 옹벽, 지반 블록, 전면 채움토에 $k_h W$가 무게중심에서 앞쪽으로 작용한다; $k_v > 0$이면 $(1 \pm k_v)$로 두 경우를 모두 검토하며 최소 FS가 기준이다. 물의 동수압 $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ (작용 위치 $0.4h_w$)을 더한다.

전면 수동저항은 지진 시 $\eta_{p,E}$를 곱하며, 기본값은 **0**이다 (저항 반영 없음).



문제

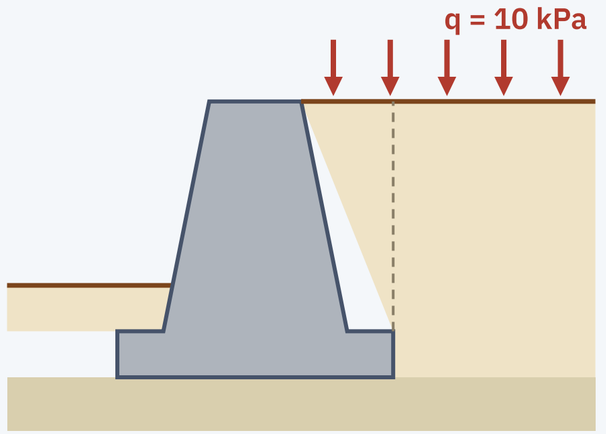
예제

구하는 값

θ, **K_{AE}**, **P_{AE}**, **ΔP_{AE}**, **$\bar{z}$**; 관성력; FS_s, FS_o, e, q_{max}.

조건

벽체와 지반	**예제 1–6의 옹벽과 뒤채움 (정적 FS_s = 2.62; FS_o = 6.26)**
지진	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **전면 수동저항 반영 비율** $\eta_{p,E} = 0$; **필요값** $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$



풀이 (1/3)

풀이

1 지진 각도와 계수

$$\theta = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ$$

$$\sqrt{\sin 30^\circ \sin(30^\circ - 8.53^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.4302$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(21.47^\circ)}{\cos^2 8.53^\circ\,(1+0.4302)^2} = \mathbf{0.4329}$$

2 동적 추력과 지진 증분 (정적 $P_A + P_Q = 37.0$ kN/m)

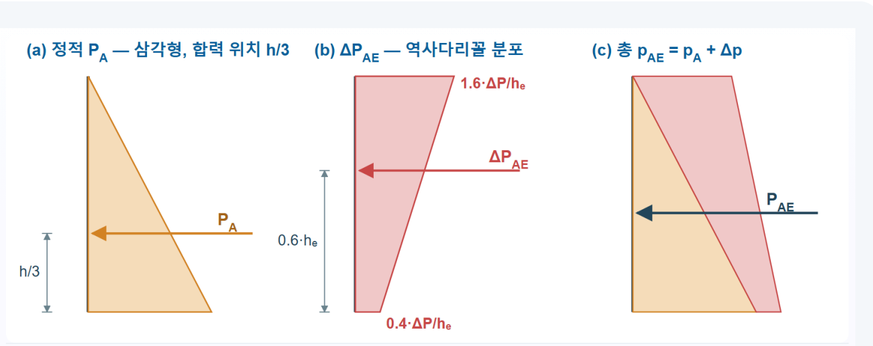
$$P_{AE} = (81+30)(0.4329) = \mathbf{48.06}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 48.06 - 37.0 = \mathbf{11.06}\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

3 하중 작용 높이

$$\bar{z}_{AE} = [27.0(1.00) + 10.0(1.50) + 11.06(1.80)]/48.06$$

$$= 61.90/48.06 = \mathbf{1.288}\ \text{m}$$



풀이 (2/3)

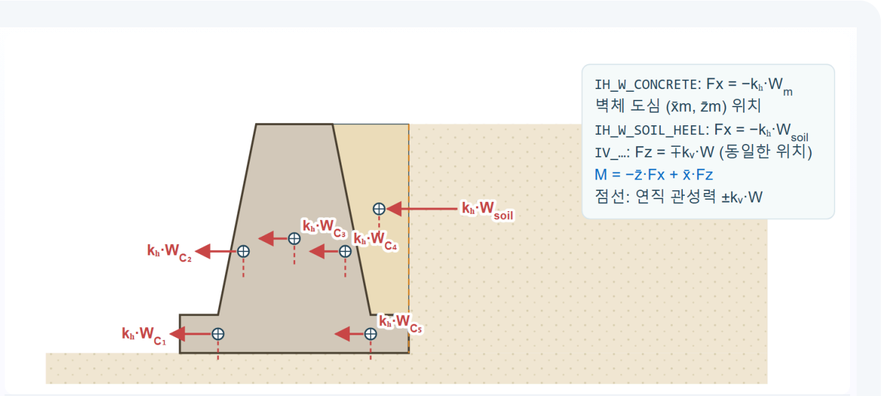
풀이

4 관성력 $k_h W$ (무게중심에서 앞쪽으로 작용)

$$IH_m = 0.15(115.50) = 17.325 \;\; (z = 1.222\ \text{m})$$
$$IH_s = 0.15(33.75) = 5.062 \;\; (z = 1.889\ \text{m})$$
$$IH_{toe} = 0.15(4.95) = 0.743 \;\; (z = 0.758\ \text{m})$$

5 활동 (전면 저항 미산입)

$$\Sigma H_{drive} = 48.06 + 17.32 + 5.06 + 0.74 = 71.19$$
$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{84.81}{71.19} = \mathbf{1.191} \;\geq 1.1 \;\checkmark$$



풀이 (3/3)

풀이

6 전도와 합력의 위치

$$M_{o,E} = P_{AE}\bar{z} + \Sigma IH\, z = 61.90 + 21.18 + 9.56 + 0.56 = 93.20$$

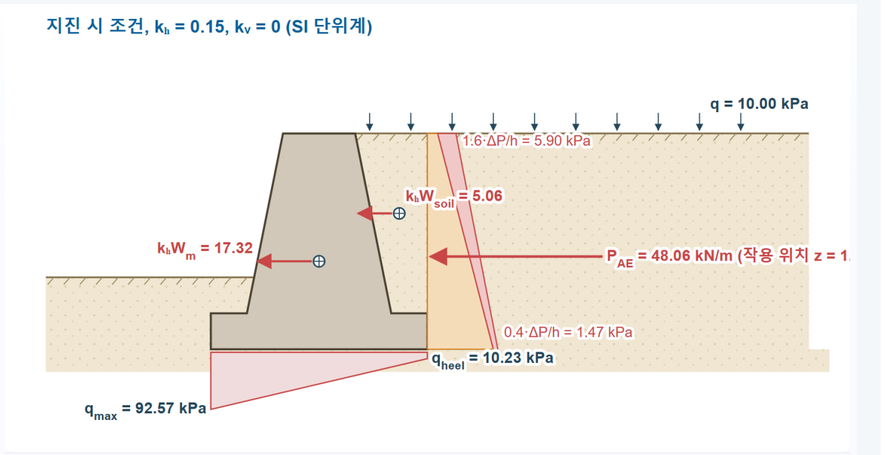
$$FS_{o,E} = \frac{262.74}{93.20} = \mathbf{2.819} \;\geq 1.1$$

$$x_R = \frac{262.74 - 93.20}{154.2} = 1.099 \text{ m} \qquad e = \mathbf{0.401} \text{ m}$$

7 저면 응력 (|e| = 0.401 m ≤ B/6 = 0.50 m: 완전 접촉)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.401)}{3}\right) = \mathbf{92.57} \text{ kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{10.23} \text{ kPa}$$



지진 시 FS_s = **1.19**, FS_o = **2.82**, e = **0.401 m**, q_{max} = **92.6 kPa**이다; 지진으로 FS_s는 2.62 → 1.19로, e는 0.068 → 0.401 m로 변하였다: **활동**과 **편심** 검토가 지배적이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

검토가 끝나는 지점

이론

이 검토는 기초 위의 벽체를 **하나의 강체 블록**으로 취급한다. 즉 벽체의 **외적 안정**을 검토한다. 석재 또는 매스콘크리트 중력식 옹벽은 자체 **내부**에서도 파괴될 수 있다(특히 높거나 가는 단면, 건식 석축, 약한 모르타르, 지진 시). 이에 대한 검토는 이 모듈이 제공하는 작용력(단면력)으로부터 수행한다.

비점성 뒤채움($c' = 0$); 두 종류의 흙 또는 층상 뒤채움은 이 모듈에 포함되지 않는다. 뒤채움 표면은 수평이거나 단일 경사이다.

저면 마찰 $\mu_b = \tan \delta_b$ (석조/콘크리트의 경우 일반적으로 $2/3\varphi'–\varphi'$); 부착력은 사용하지 않는다. 전면 수동저항의 전부를 마찰 저항분에 더하며, 전도와 지지력 검토에는 사용하지 않는다.

계산은 벽체 길이 1.00 m당 수행하며, 띠형 및 집중 상재하중에 의한 측압은 Boussinesq(강성 벽체)에 의해 가산된다.

활동 유발 영향(수리적 안정, 침투, 전체 안정성, 침하)은 이 모듈의 범위 밖이다.

요약

핵심 정리

자유물체 = 벽체 + 벽체와 함께 움직이는 지반; 압력은 **저판 뒤쪽 모서리의 연직면**($\delta = \beta$)에 작용한다; 단일 부호 규약: $M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$, 전도 +

중량: $W_i = \gamma_m A_i$, $\bar{x} = \Sigma W_i \bar{x}_i / \Sigma W_i$; 지반 블록과 벽체 앞쪽 흙도 벽체와 함께 거동하며, 뒷굽 위의 상재하중(Q_{heel})은 어떤 검토에도 포함되지 않는다

주동: $P_A = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2$ (h/3), $P_Q = K_a q h$ (h/2); 경사진 뒤채움에서는 $K_{a\beta}$ (수직면에서 Rankine = Coulomb); **수동**: $K_{mob} = wK_p + (1 - w)K_0$, 활동 검토에서만 적용

활동 $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive}$; **전도** $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$ (앞굽); **지지력**: $x_R = -\Sigma M/V$, $e = B/2 - x_R$, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$, $|e| > B/6$이면 $q_{max} = 2V/(3x_R)$

물: γ_{sat}를 적용한 중량과 별도 항목 U_{rear}; 양압력은 앞굽에서 u_{toe} – 뒷굽에서 u_{heel}로 선형 분포하며 N을 감소시키고 전도 모멘트를 추가한다

지진: $\theta = \tan^{-1} k_h/(1 - k_v)$; $P_{AE} = (\frac{1}{2}\gamma h^2 + qh)K_{AE}$; ΔP_{AE}의 작용점 0.6h; $k_h W$ 관성력; 전면 수동저항 반영분 $\eta_{p,E}$(기본값 0)

참고문헌

본 모듈에서 사용한 세 가지 이론과 매뉴얼이 따르는 폐합형 산정식(Ka, Kp, KAE)의 출처이다. 이로부터 유도되지 않은 모든 항목은 본 모듈의 가정사항이며 본문에 표기하였다.

Coulomb C.A. (1776) Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7, Paris.

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

Mononobe N., Matsuo H. (1929) On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo, 9:177–185.

Okabe S. (1926) General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers 12(1).

Rankine W.J.M. (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, 모듈도 동일한 값을 제공한다. 모듈 페이지의 단계별 예제 역시 이 벽체이다(H = 3 m 석조 옹벽, q = 10 kPa, k_h = 0.15).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

GeoTerva에 사용자의 벽체 단면, 뒤채움, 상재하중, 지하수 및 지진계수를 입력하면 모듈이 하중 집계표, 세 가지 검토, 저면 응력을 함께 제시한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com