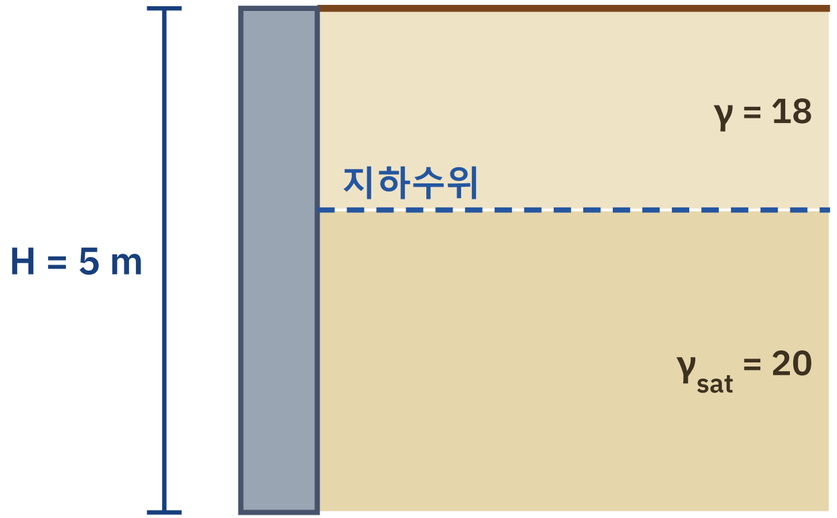
지반공학 강의 자료 · 측방토압

정지토압

강의: 변위가 불가능한 벽체(지하층 벽체, 아치 교대, 암거) 배면의 정지토압; K_0 계수의 관계식, 건조 및 수중 뒤채움, 다층 지반; 주제별 계산 예제.

$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_o$ · Jaky · Mayne–Kulhawy · Massarsch · Sherif · 층상 뒤채움 · 지하수



개요

이 강의에서 다루는 내용

정지토압이 언제 발생하는지와 주동 / 수동 상태와의 관계 이해

K_0 계수를 모래(Jaky, Sherif), 과압밀 지반(Mayne–Kulhawy) 및 점토(Massarsch)에 대해 계산하는 방법

건조 뒤채움에서의 힘 $P_0 = \frac{1}{2}K_0\gamma H^2$ 및 작용 높이 H/3

지하수가 압력을 어떻게 추가하는지와, 층상 뒤채움에서 K_0 값이 지층 경계에서 급변하는 것

주동 – 정지 – 수동 상태와 필요한 벽체 변위를 비교하는 방법

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

힘은 벽체 단위 길이당 값이며 (kN/m), 압력은 kPa 단위이고 응력은 유효응력이다.

움직일 수 없는 벽체

이론

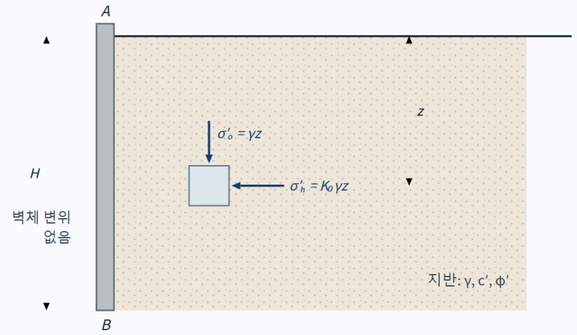
지하층 슬래브로 지지된 벽체, 말뚝 위의 아치 받침, 암거 벽체는 **변위할 수 없으며**, 그 뒤의 지반은 원위치 상태의 응력 상태를 그대로 유지한다. 수평 유효응력과 연직 유효응력의 비가 **정지토압계수**이다:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \qquad \sigma'_o = \gamma z \qquad \sigma'_h = K_0 \gamma z$$

벽체가 지반에서 멀어지면 압력은 주동 값으로 **떨어지고**, 지반 쪽으로 밀리면 수동 값으로 **상승한다**; $K_a < K_0 < K_p$.

필요한 변위는 주동 상태에서 작고 수동 상태에서 크다 (이론: 필요 변위).

K_0 값은 시험(프레셔미터, 딜라토미터) 또는 상관식으로 구하며, 모듈은 각 지층에 대해 둘 중 하나를 사용한다.



모래, 과압밀 지반과 점토

이론

$$K_0 = 1 - \sin\varphi' \qquad \text{(Jaky 1944, 모래, NC)}$$

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(min)}} - 1\right) 5.5 \qquad \text{(Sherif 외 1984, 다짐 모래)}$$

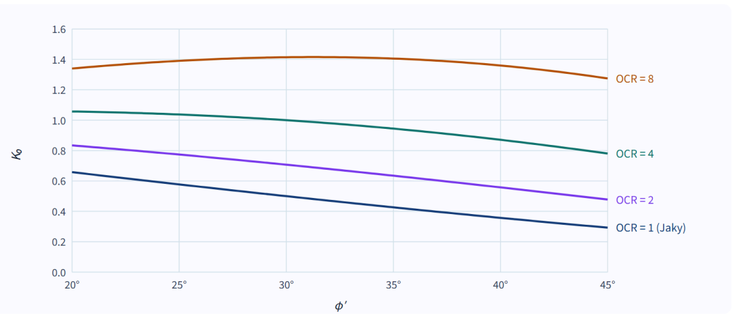
$$K_0 = (1 - \sin\varphi')\, OCR^{\sin\varphi'} \qquad \text{(Mayne–Kulhawy 1982)}$$

$$K_{0(NC)} = 0.44 + 0.42\frac{PI(\%)}{100} \qquad K_{0(OC)} = K_{0(NC)}\sqrt{OCR} \qquad \text{(Massarsch 1979, 점토)}$$

Jaky는 다진 모래에서 압력을 **작게** 산정한다: 다짐으로 뒤채움이 과압밀 상태가 되기 때문이며, Sherif는 이를 $\gamma_d/\gamma_{d,min}$으로 보정한다.

OCR = 과거의 최대 유효응력과 현재 유효응력의 비이다. OCR = 4, φ′ = 30°일 때 K_0 = 1이며, 수평응력과 연직응력이 같다.

K_0 – φ′ (OCR 곡선)



문제

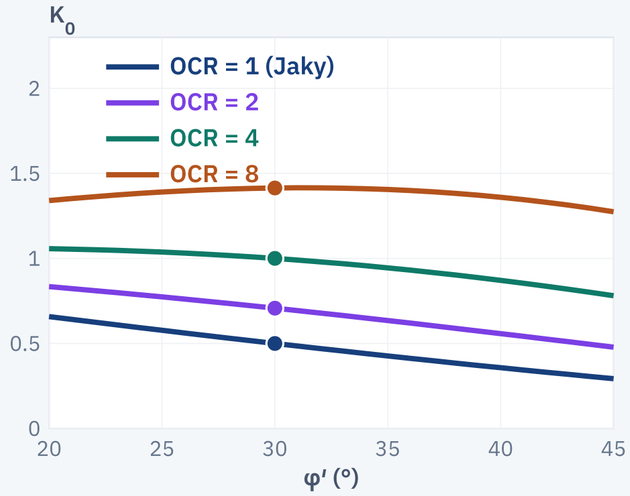
예제

조건

지반	**비점성 모래,** $\varphi' = 30^\circ$
경우	$OCR = 1,\ 2,\ 4,\ 8$ **(또한** $OCR = 1$**인 경우** $\varphi' = 25^\circ,\ 35^\circ,\ 40^\circ$**)**

구하는 값

각 경우의 **K_0**; $K_0 = 1$이 되는 OCR; Rankine K_a, K_p와의 비교.



풀이

풀이

1 정규압밀 모래 (Jaky)

$$\varphi' = 30^\circ:\ K_0 = 1 - \sin 30^\circ = \mathbf{0.5000}$$

$$\varphi' = 25^\circ:\ 0.577 \qquad 35^\circ:\ 0.426 \qquad 40^\circ:\ 0.357$$

2 과압밀 (OCR 지수 sin φ′ = 0.5)

OCR	1	2	4	8
$K_0 = 0.5 \cdot OCR^{0.5}$	0.500	0.707	1.000	1.414

OCR이 커질수록 K_0도 커진다: OCR = 4에서 **K_0 = 1**(정수압 응력), OCR = 8에서 1.41이다. Rankine K_a = 0.333과 K_p = 3.0은 모든 OCR 값의 범위 밖에 놓인다: $K_a < K_0 < K_p$는 항상 성립한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

지반	**다짐 모래 뒤채움: $\varphi' = 34^\circ$, 건조단위중량 $\gamma_d = 16.0$ kN/m^3; 가장 느슨한 상태에서 $\gamma_{d(min)} = 14.5$ kN/m^3**

구하는 값

K_0 (Sherif) 및 Jaky와의 비교.

풀이

풀이

1 Jaky (다짐 없음)

$$K_0 = 1 - \sin 34^\circ = \mathbf{0.4408}$$

2 Sherif: 다짐 보정분

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(min)}} - 1 = \frac{16.0}{14.5} - 1 = 0.1034$$

$$K_0 = 0.4408 + (0.1034)(5.5) = \mathbf{1.010}$$

다짐으로 K_0이 0.44에서 **1.01**로 증가하였다 (2.3배). 다짐된 뒤채움을 지지하는 벽체는 정규압밀 상태로 계산한 값보다 훨씬 큰 압력을 견뎌야 한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

지반	**점토: 소성지수** $PI = 25\%$
경우	$OCR = 1$ **및** $OCR = 2$**; 또한** $PI = 10,\ 40,\ 60\%$

구하는 값

정규압밀 및 과압밀 점토에 대한 K_0.

풀이

풀이

1 PI = 25 %

$$K_{0(NC)} = 0.44 + 0.42\frac{25}{100} = \mathbf{0.5450}$$

$$K_{0(OC)} = K_{0(NC)}\sqrt{OCR} = 0.5450\sqrt{2} = \mathbf{0.7707}$$

2 소성에 따른 증가

PI (%)	$K_{0(NC)}$	OCR = 2	OCR = 4
10	0.482	0.682	0.964
25	0.545	0.771	1.090
40	0.608	0.860	1.216
60	0.692	0.979	1.384

점토에서 K_0는 소성이 커질수록 증가하며, OCR = 2, PI = 25 %일 때 **0.771**이다. 과압밀 점토에서는 K_0에 √OCR을 곱한다(이 계수는 Massarsch 관계식의 일부가 아니라 널리 쓰이는 근사이다).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

압력 삼각형과 힘

이론

단위중량이 γ인 건조 뒤채움에서 수평 유효응력은 깊이에 따라 선형으로 증가한다. 벽체 단위길이당 힘은 삼각형의 면적이며 저면에서 H/3 위에 작용한다:

$$\sigma'_h = K_0 \gamma z \qquad P_0 = \tfrac{1}{2} K_0 \gamma H^2 \qquad \bar{z} = \tfrac{H}{3}$$

층상 뒤채움에서 σ′$_0$는 지층별로 합산되고 각 지층은 자신의 K_0 값을 가진다. K_0가 변하는 모든 경계에서 **σ′$_h$는 불연속적으로 변하지만 σ′$_0$는 변하지 않는다**.

힘은 H^2에 따라 증가하며, OCR과 다짐은 K_0에 정비례하여 힘을 증가시킨다.

문제

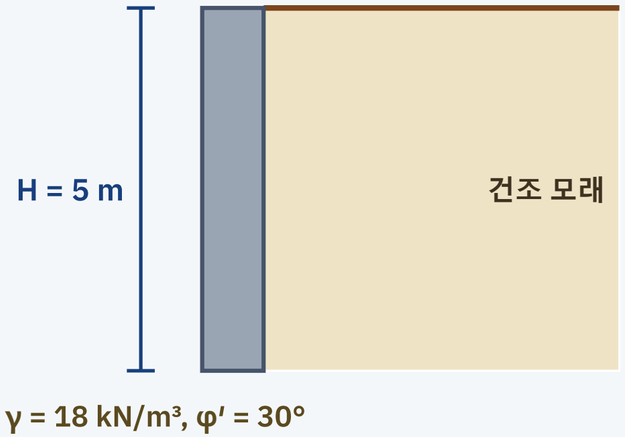
예제

구하는 값

각 경우의 $\sigma'_h(H)$, P_0 및 작용 높이.

조건

벽체	$H = 5$ m, 움직일 수 없음
지반	건조 모래: $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$
경우	$OCR = 1$ 및 $OCR = 2$



풀이

풀이

1 OCR = 1 (Jaky: $K_0 = 0.5$)

$$\sigma'_h(5) = K_0 \gamma H = 0.5(18)(5) = \mathbf{45.00}\ \text{kPa}$$

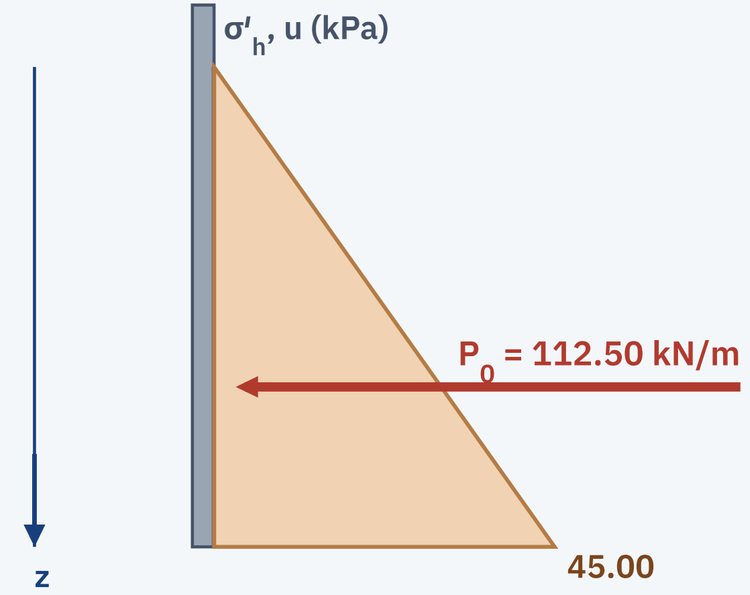
$$P_0 = \tfrac{1}{2}(45.00)(5) = \mathbf{112.50}\ \text{kN/m} \qquad \bar{z} = \tfrac{5}{3} = 1.67\ \text{m}$$

2 OCR = 2 (Mayne–Kulhawy: $K_0 = 0.7071$)

$$\sigma'_h(5) = 0.7071(18)(5) = \mathbf{63.64}\ \text{kPa}$$

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(63.64)(5) = \mathbf{159.10}\ \text{kN/m}$$

P_0 = **112.50 kN/m**(OCR = 1)과 **159.10 kN/m**(OCR = 2)이며 둘 다 저면 위 1.67 m에 작용한다. 과압밀로 인해 합력이 41% 증가했다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

유효응력 + 수압

이론

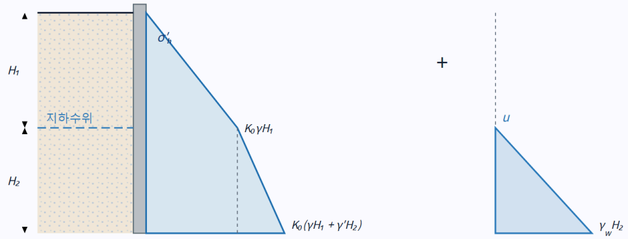
지하수가 깊이 H_1에 있으면(벽체 앞에는 물이 없음) 그 위에서는 $\sigma'_h = K_0\gamma z$이고, 그 아래에서는 유효응력을 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$로 구하며 수압은 K_0 값과 **무관하게** 전부 더한다:

$$\sigma'_h = K_0\left[\gamma H_1 + \gamma'(z - H_1)\right] \qquad u = \gamma_w(z - H_1) \qquad \sigma_h = \sigma'_h + u$$

$$P_0 = \tfrac{1}{2}K_0\gamma H_1^2 + K_0\gamma H_1 H_2 + \tfrac{1}{2}\left(K_0\gamma' + \gamma_w\right)H_2^2$$

작용 높이는 각 면적의 저면점에 대한 모멘트로부터 구한다.

$\gamma_w = 9.81$, $K_0\gamma' \approx 0.5\cdot 10 = 5$: **수압의 기여가 흙의 기여보다 큰 경우가 많다**.



문제

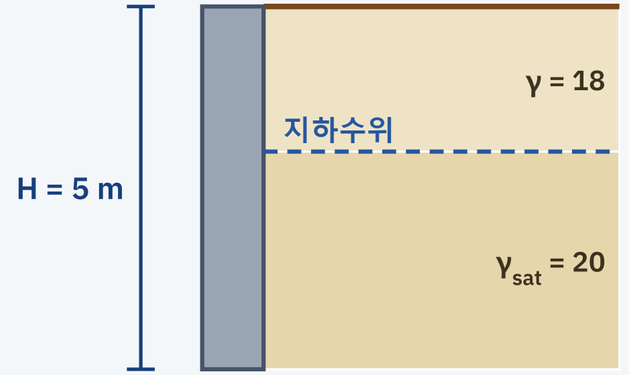
예제

조건

벽체	$H = 5$ m, 움직일 수 없음
지반	**모래:** $c' = 0$, $\varphi' = 30°$, $OCR = 2$; $\gamma = 18$ kN/m^3 **(상부),** $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3 **(하부)**
지하수	**깊이 2 m에서; 벽체 앞쪽에는 물이 없다**

구하는 값

압력 분포도, 합계 P_0(흙 + 물)과 작용 높이.
모듈은 이 벽체로 시작한다.



풀이 (1/2)

풀이

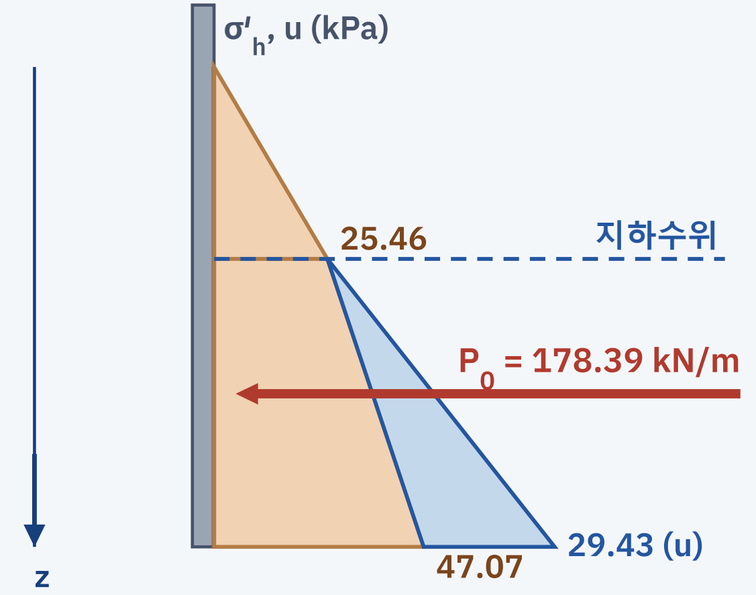
1 K_0 및 응력

$$K_0 = (1-\sin 30^\circ)\,2^{\sin 30^\circ} = \mathbf{0.7071}$$

$$z = 2:\ \sigma_o' = 36 \ \rightarrow\ \sigma_h' = 0.7071(36) = 25.46 \text{ kPa}$$

$$z = 5:\ \sigma_o' = 36 + 3(20-9.81) = 66.57 \ \rightarrow\ \sigma_h' = \mathbf{47.07} \text{ kPa}$$

$$u = 9.81(3) = \mathbf{29.43} \text{ kPa}$$



풀이 (2/2)

풀이

2 면적: 상부 삼각형 · 하부 직사각형 · 하부 삼각형 · 물 삼각형

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(2)(25.46) + 3(25.46) + \tfrac{1}{2}(3)(21.62) + \tfrac{1}{2}(3)(29.43)$$
$$= 25.46 + 76.37 + 32.42 + 44.14 = \mathbf{178.39}\ \text{kN/m}$$

3 작용 높이 (모멘트 팔 3.67; 1.50; 1.00; 1.00 m)

$$\bar{z} = \frac{25.46(3.67) + 76.37(1.50) + 32.42(1.00) + 44.14(1.00)}{178.39} = \mathbf{1.59}\ \text{m}$$

P_0 = **178.39 kN/m**, 저면으로부터 **1.59 m** 위; 흙 134.25, 물 44.14 kN/m(물의 몫 25%).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

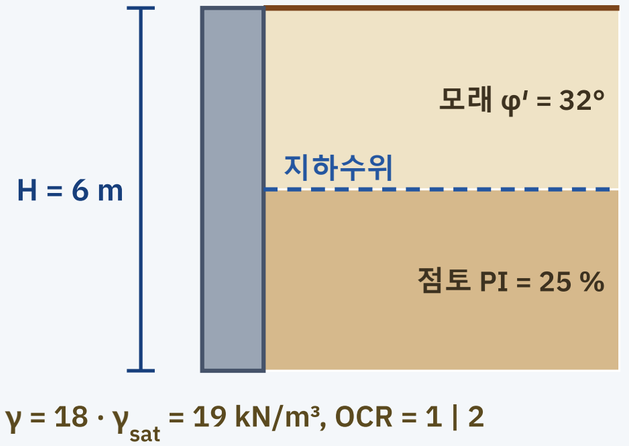
예제

조건

벽체	$H = 6$ m, 움직일 수 없음
상부 지층 (0–3 m)	**모래:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 32°$, $OCR = 1$
하부 지층 (3–6 m)	**점토:** $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3, $PI = 25\%$, $OCR = 2$
지하수	**점토 위 (3 m)**

구하는 값

경계에서의 압력 급변, P_0 및 $\bar{z}$.



풀이 (1/2)

풀이

1 K_0 값: 모래는 Jaky, 점토는 Massarsch

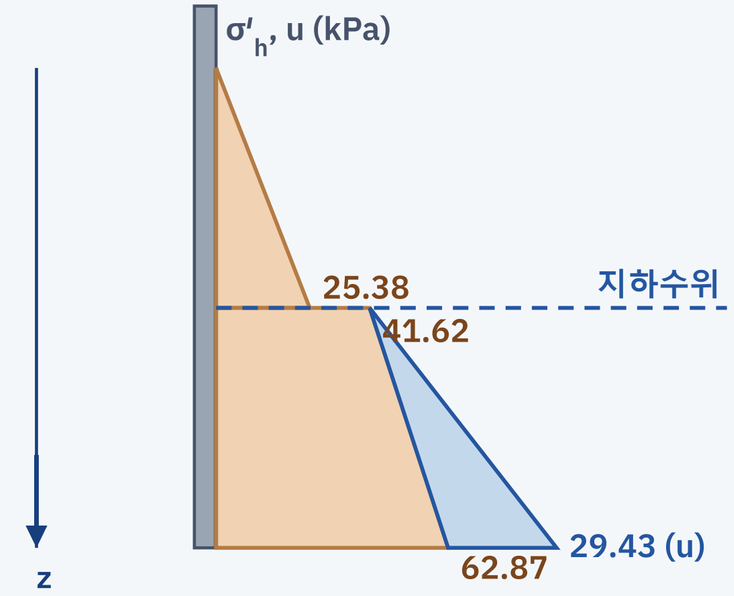
$$K_{0(kum)} = 1 - \sin 32^\circ = \mathbf{0.4701}$$

$$K_{0(kil)} = \left[0.44 + 0.42\frac{25}{100}\right]\sqrt{2} = 0.5450\sqrt{2} = \mathbf{0.7707}$$

2 응력 ($\sigma'_o(3) = 54$; $\sigma'_o(6) = 54 + 3(19 - 9.81) = 81.57$)

$$z = 3:\ \sigma'_h = 0.4701(54) = 25.38\ (\text{모래});\ \ 0.7707(54) = 41.62\ (\text{점토})$$

$$z = 6:\ \sigma'_h = 0.7707(81.57) = \mathbf{62.87}\ \text{kPa};\ \ u = \mathbf{29.43}\ \text{kPa}$$



풀이 (2/2)

풀이

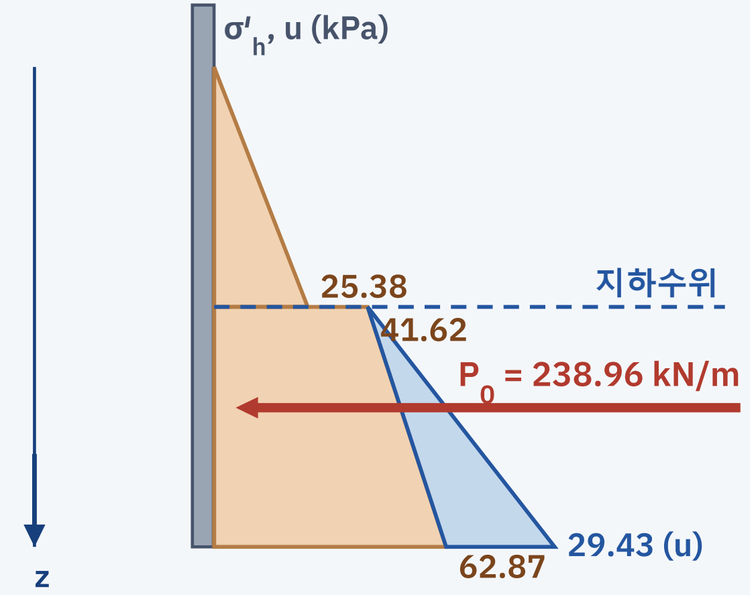
3 힘

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(3)(25.38) + 3(41.62) + \tfrac{1}{2}(3)(21.25) + \tfrac{1}{2}(3)(29.43)$$
$$= 38.08 + 124.86 + 31.87 + 44.14 = \mathbf{238.96}\ \text{kN/m}$$

4 작용 높이 (모멘트 팔 4.00; 1.50; 1.00; 1.00 m)

$$\bar{z} = \frac{38.08(4) + 124.86(1.5) + 31.87(1) + 44.14(1)}{238.96} = \mathbf{1.74}\ \text{m}$$

P_0 = **238.96 kN/m**, $\bar{z}$ = **1.74 m**. σ'_h는 점토층 상단에서 25.38 → 41.62 kPa로 급변한다(K_0 값이 바뀜); σ'_o = 54 kPa은 양쪽이 동일하다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

주동 및 수동 상태에 이르는 변위

이론

벽체가 움직일 수 없으면 정지토압이 발생한다. 벽체가 지반에서 멀어지면 압력은 K_0에서 K_a로 떨어지고, 지반 쪽으로 이동하면 K_p까지 올라간다. 필요한 이동량은 높이에 대한 비로 나타내며(주동은 매우 작고 수동은 열 배 더 크다):

지반	주동 $\Delta L_a/H$	수동 $\Delta L_p/H$
느슨한 모래	0.001–0.002	0.01
조밀한 모래	0.0005–0.001	0.005
연약 점토	0.02	0.04
견고한 점토	0.01	0.02

왜 중요한가?

지하 외벽, 말뚝캡에 연결된 아치 지점부 또는 암거 벽체는 움직일 수 없다: 설계 토압은 **주동이 아닌 정지** 토압 값이며 K_0 관계식에만 의존한다.

문제

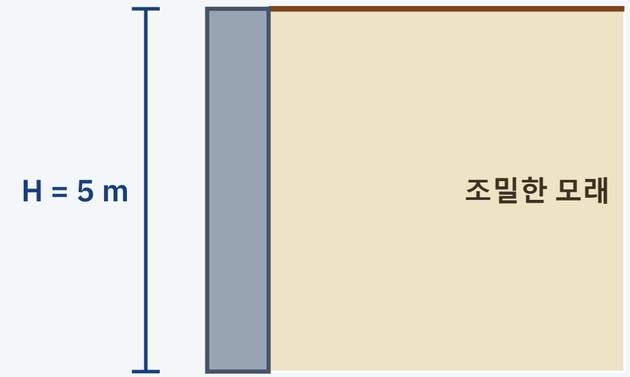
예제

조건

벽체	$H = 5$ m, 조밀한 모래 뒤채움
지반	**건조:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$, **NC (Jaky)**

구하는 값

주동, 정지 및 수동 **힘**; 각각에 필요한 벽체 변위 (조밀한 모래).



풀이

풀이

1 $P = \frac{1}{2}K\gamma H^2 = \frac{1}{2}K(18)(25) = 225\ K$

상태	K	P (kN/m)	변위 (조밀한 모래, H = 5 m)
주동	0.3333	75.0	0.0005–0.001·5 = 2.5–5 mm
정지	0.50	112.5	0 (벽체가 움직이지 않음)
수동	3.00	675.0	0.005·5 = 25 mm

주동토압 **75.0** < 정지토압 **112.5** < 수동토압 **675.0 kN/m**; 정지토압은 주동토압의 1.5배이다. 벽체가 2.5–5 mm 변위할 수 있으면 주동토압을, 전혀 움직일 수 없으면 정지토압을 기준으로 하며, 수동저항을 발휘하려면 최소 25 mm의 변위가 필요하다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

풀이의 범위

이론

벽체는 마찰이 없고 연직인 것으로 가정하며, 정지토압은 수평으로 작용한다 ($\delta' = 0$).

수평 지표면; 경사진 지표면과 경사 벽체의 경우 Rankine(경사 뒤채움) 및 Coulomb 모듈을 참조한다.

K_0 값은 지층마다 별도이며 일정하다: Jaky, Sherif, Mayne–Kulhawy, Massarsch 또는 시험으로부터 입력한 값.

물은 정수압 분포이며 벽체 앞쪽에는 물이 없다; 수압은 K_0에 의존하지 않는다.

상재하중, 다짐응력 및 지진은 이 모듈에 포함되지 않으며, 다짐의 영향은 K_0 값(Sherif) 또는 OCR에 반영한다.

요약

핵심 정리

정지토압: 움직일 수 없는 벽체에서 $\sigma'_h = K_0\sigma'_o$; $K_a < K_0 < K_p$

K_0: Jaky $1 - \sin\varphi'$; Mayne–Kulhawy $\times$ OCR$^{\sin\varphi'}$; Massarsch $0.44 + 0.42\ PI/100$ (과압밀 시 $\times \sqrt{OCR}$); Sherif 다짐 모래의 경우 $+ (\gamma_d/\gamma_{d,min} - 1)\cdot 5.5$

건조 뒤채움: $P_0 = \frac{1}{2}K_0\gamma H^2$, 저면으로부터 $H/3$ 높이

물: γ'로 계산한 유효응력에 $u = \gamma_w(z - H_1)$ 값이 전부 더해지며, 물이 차지하는 비중이 큰 경우가 많다

층상 뒤채움재에서 σ'_o는 연속이고, σ'_h는 K_0 값이 변하는 경계에서 급변하며, $\bar{z}$는 면적의 모멘트로 구한다

이동량: 주동에서는 $\Delta L/H \sim 0.001$, 수동에서는 ~ 0.01 (조밀한 모래에서는 절반); 벽체가 움직일 수 없으면 정지토압 조건이 지배한다

참고문헌

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning.

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

Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H. (1982). K_o–OCR relationships in soil. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 108(GT6), 851–872.

Massarsch, K.R. (1979). Lateral earth pressure in normally consolidated clay. Proc. 7th European Conf. SMFE, Brighton, 2, 245–250.

Sherif, M.A., Fang, Y.S. and Sherif, R.I. (1984). KA and K0 behind rotating and non-yielding walls. J. Geotech. Eng., ASCE, 110(GT1), 41–56.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈도 같은 값을 준다. 모듈의 초기 예제는 예제 5의 벽체이다 (단일 지층; 두 지층의 경우 예제 6).

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

GeoTerva에 직접 설계 중인 벽체의 지층, K_0 방법, OCR 값, 지하수를 입력하면 모듈이 압력 분포도, 힘, 작용 높이를 함께 제시한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com