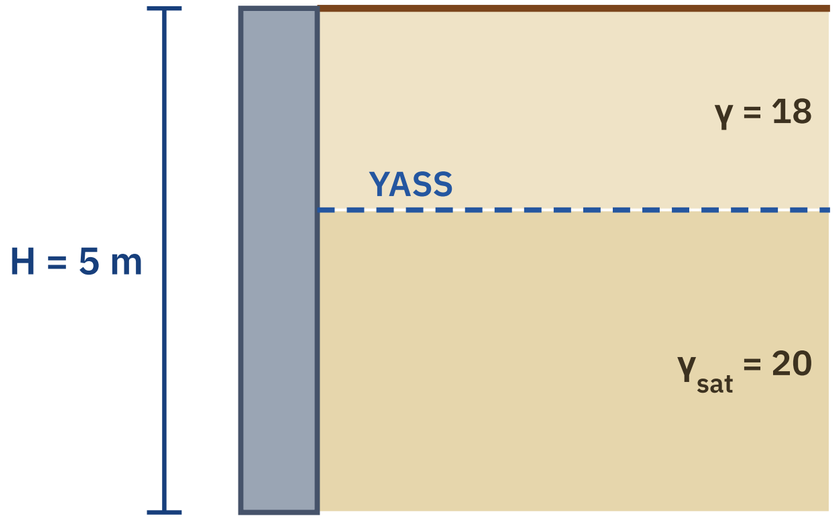
Geoteknik ders sunumu · Yanal toprak basıncı

Sükunetteki toprak basıncı

Ders anlatımı: hareket edemeyen bir duvarın (bodrum duvarı, kemer ayağı, menfez) arkasındaki sükunet basıncı; K_0 katsayısının bağıntıları, kuru ve su altındaki dolgu, tabakalı zemin; her konuda çözümlü örnek.

$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_o$ · Jaky · Mayne–Kulhawy · Massarsch · Sherif · Tabakalı dolgu · Yeraltı suyu



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- **Sükunet basıncının** ne zaman oluştuğunu ve aktif / pasif durumla ilişkisini
- **K_0 katsayısını** kumda (Jaky, Sherif), aşırı konsolide zeminde (Mayne–Kulhawy) ve kilde (Massarsch) hesaplamayı
- Kuru dolguda $P_0 = \frac{1}{2}K_0\gamma H^2$ kuvvetini ve H/3 etkime yüksekliğini
- **Yeraltı suyunun** basıncı nasıl eklediğini; tabakalı dolguda K_0'ın tabaka sınırında sıçramasını
- Aktif – sükunet – pasif durumları ve gereken duvar hareketini karşılaştırmayı

DERS AKIŞI

Her konu **üç adımda** işlenir:

1 · **Kuram**: kural nedir, neden öyle?

2 · **Soru**: verilenler ve istenen

3 · **Çözüm**: adım adım, sayılarla

Kuvvetler duvarın birim uzunluğu başınadır (kN/m); basınçlar kPa, gerilmeler efektiftir.

Hareket edemeyen duvar

KURAM

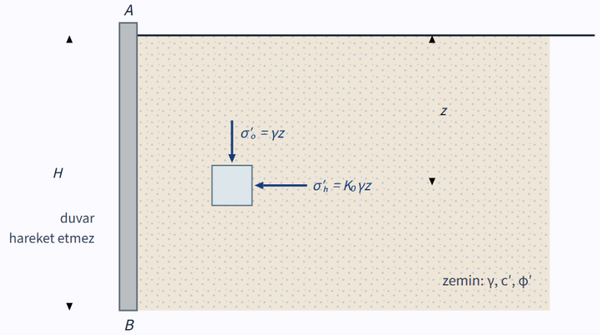
Bodrum katlarıyla tutulan bir duvar, kazık üstündeki bir kemer ayağı ya da menfez duvarı **yerinden oynayamaz**; arkasındaki zemin, yerinde olduğu hâldeki gerilme durumunu korur. Yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranı **sükunet katsayısıdır**:

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

Duvar zeminden uzaklaşırsa basınç aktif değere **düşer**, zemine itilirse pasif değere **çıkar**; $K_a < K_0 < K_p$.

Gereken hareketler aktifte küçük, pasifte büyüktür (Kuram: Gereken hareket).

K_0 deneyden (pressiyometre, dilatometre) ya da bağıntıyla alınır; modül her tabaka için birini kullanır.



Kum, aşırı konsolide zemin ve kil

KURAM

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

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(min)}} - 1\right) 5{,}5 \qquad \text{(Sherif vd. 1984, sıkıştırılmış kum)}$$

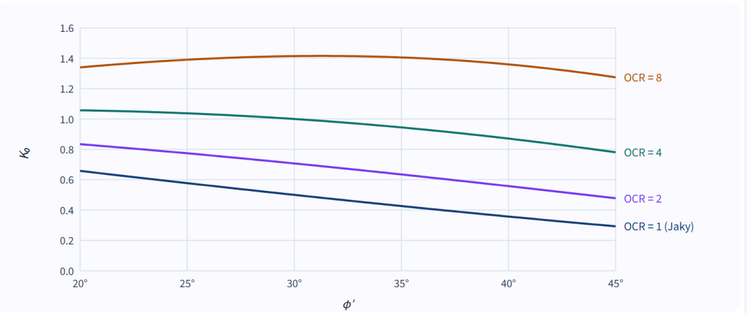
$$K_0 = (1 - \sin\varphi')\, OCR^{\sin\varphi'} \qquad \text{(Mayne–Kulhawy 1982)}$$

$$K_{0(NC)} = 0{,}44 + 0{,}42\frac{PI(\%)}{100} \qquad K_{0(OC)} = K_{0(NC)}\sqrt{OCR} \qquad \text{(Massarsch 1979, kil)}$$

Jaky, sıkıştırılmış kumda basıncı **az** verir: sıkıştırma dolguyu aşırı konsolide yapar; Sherif bunu $\gamma_d/\gamma_{d,min}$ ile düzeltir.

OCR = geçmişteki en büyük efektif gerilmenin bugünkü efektif gerilmeye oranı. OCR = 4, φ′ = 30° için K_0 = 1: yatay ve düşey gerilme eşit.

K_0 – φ′ (OCR eğrileri)



Soru

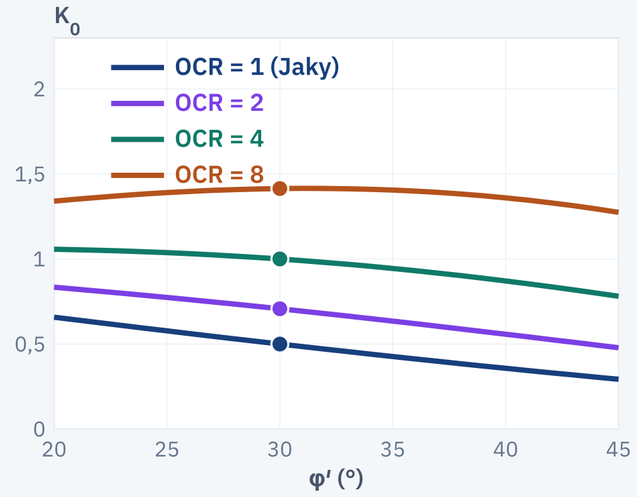
SORU

Verilenler

Zemin	**kohezyonsuz kum,** $\varphi' = 30^\circ$
Durumlar	$OCR = 1,\ 2,\ 4,\ 8$ **(ayrıca** $OCR = 1$ **için** $\varphi' = 25^\circ,\ 35^\circ,\ 40^\circ$**)**

İSTENEN

Her durum için **K_0**; K_0 = 1 olduğu OCR; Rankine K_a, K_p ile karşılaştırma.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 NC kum (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 Aşırı konsolide (OCR üssü 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

OCR arttıkça K_0 artar: OCR = 4'te **$K_0 = 1$** (hidrostatik gerilme), OCR = 8'de 1,41. Rankine K_a = 0,333 ve K_p = 3,0 ise bütün OCR'ların dışında kalır: $K_a < K_0 < K_p$ hep sağlanır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

SORU

Verilenler

Zemin	**sıkıştırılmış kum dolgu: $\varphi' = 34^\circ$, kuru birim hacim ağırlık $\gamma_d = 16{,}0\ \mathrm{kN/m^3}$; en gevşek durumda $\gamma_{d(min)} = 14{,}5\ \mathrm{kN/m^3}$**

İSTENEN

K_0 (Sherif) ve Jaky ile karşılaştırma.

Çözüm

ÇÖZÜM

1 Jaky (sıkıştırmasız)

$$K_0 = 1 - \sin 34^\circ = \mathbf{0{,}4408}$$

2 Sherif: sıkıştırma payı

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(min)}} - 1 = \frac{16{,}0}{14{,}5} - 1 = 0{,}1034$$

$$K_0 = 0{,}4408 + (0{,}1034)(5{,}5) = \mathbf{1{,}010}$$

Sıkıştırma K_0'ı 0,44'dan **1,01'ya** çıkardı (2,3 kat): sıkıştırılmış dolgunun arkasındaki duvar normal konsolide hesaptan çok daha büyük basınca dayanmalıdır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

SORU

Verilenler

Zemin	**kil: plastisite indisi** $PI = 25\%$
Durumlar	$OCR = 1$ **ve** $OCR = 2$**; ayrıca** $PI = 10,\ 40,\ 60\%$

İSTENEN

K_0, normal ve aşırı konsolide kil için.

Çözüm

ÇÖZÜM

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 Plastisiteyle artış

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

Kilde K_0 plastisiteyle artar; OCR = 2 için PI = 25 % iken **0,771**. Aşırı konsolide kilde K_0 √OCR ile çarpılır (bu çarpan Massarsch bağıntısının parçası değil, yaygın bir yaklaşımdır).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Basınç üçgeni ve kuvvet

KURAM

Birim hacim ağırlığı γ olan kuru dolguda yatay efektif gerilme derinlikle doğrusal artar; duvarın birim uzunluğuna gelen kuvvet üçgenin alanıdır ve tabandan H/3 yukarıda etkir:

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

Tabakalı dolguda σ'_o tabaka tabaka toplanır ve her tabaka kendi K_0 değerini alır: K_0'ın değiştiği her sınırda **σ'_h sıçrar, σ'_o sıçramaz**.

Kuvvet H^2 ile büyür; OCR ve sıkıştırma K_0 ile doğru orantılı olarak kuvveti artırır.

Soru

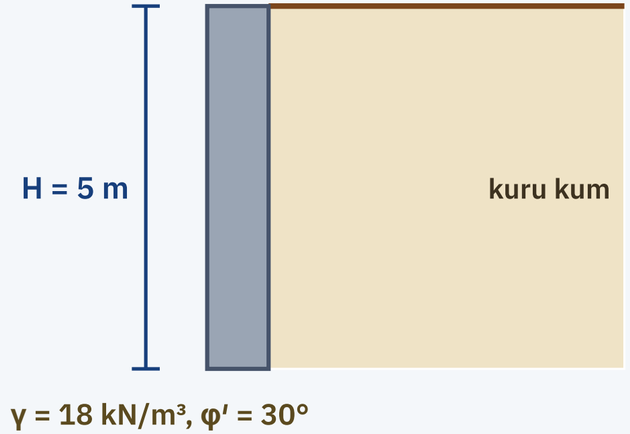
SORU

İSTENEN

Her durum için $\sigma'_h(H)$, P_0 ve etkime yüksekliği.

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, hareket edemez**
Zemin	**kuru kum:** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ$
Durumlar	$OCR = 1$ **ve** $OCR = 2$



Çözüm

ÇÖZÜM

1 OCR = 1 (Jaky: $K_0 = 0{,}5$)

$$\sigma'_h(5) = K_0 \gamma H = 0{,}5(18)(5) = \mathbf{45{,}00}\ \mathrm{kPa}$$

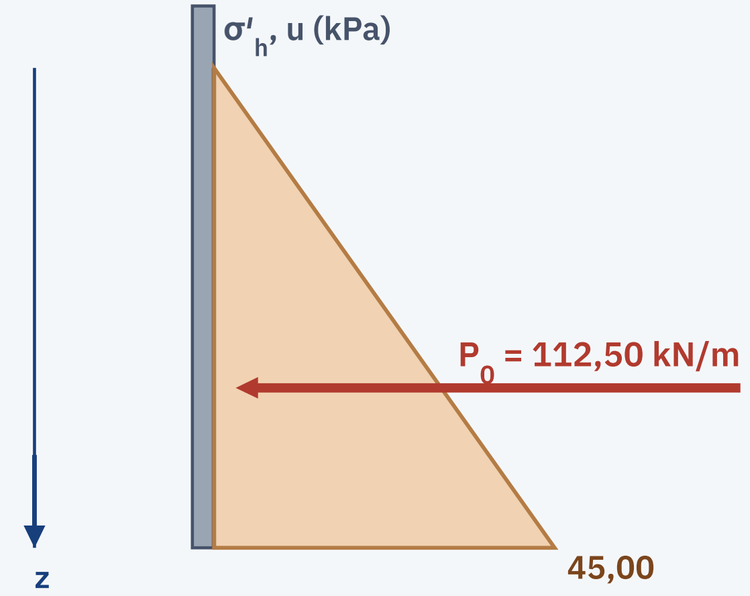
$$P_0 = \tfrac{1}{2}(45{,}00)(5) = \mathbf{112{,}50}\ \mathrm{kN/m} \qquad \bar{z} = \tfrac{5}{3} = 1{,}67\ \mathrm{m}$$

2 OCR = 2 (Mayne–Kulhawy: $K_0 = 0{,}7071$)

$$\sigma'_h(5) = 0{,}7071(18)(5) = \mathbf{63{,}64}\ \mathrm{kPa}$$

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(63{,}64)(5) = \mathbf{159{,}10}\ \mathrm{kN/m}$$

P_0 = **112,50 kN/m** (OCR = 1) ve **159,10 kN/m** (OCR = 2), ikisi de tabandan 1,67 m yukarıda; aşırı konsolidasyon kuvveti %41 artırdı.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Efektif basınç + su basıncı

KURAM

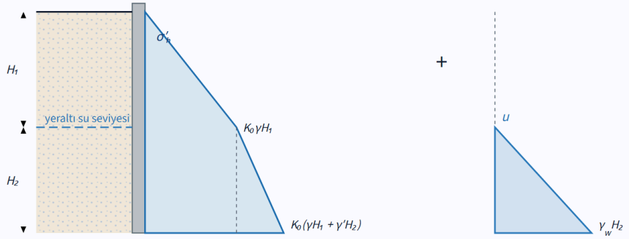
Yeraltı suyu H_1 derinliğindeyse (duvarın önünde su yok), üstünde $\sigma'_h = K_0\gamma z$; altında efektif gerilme $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ile bulunur ve su basıncı K_0'dan **bağımsız**, tam olarak eklenir:

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

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

Etkime yüksekliği alanların taban noktasına momentinden bulunur.

$\gamma_w = 9{,}81$, $K_0\gamma' \approx 0{,}5\cdot 10 = 5$: **su payı çoğu kez toprak payından büyüktür**.



Soru

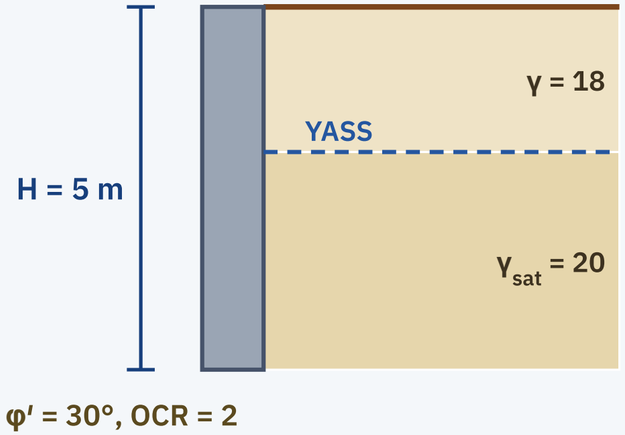
SORU

İSTENEN

Basınç diyagramı, toplam $\mathbf{P_0}$ (zemin + su) ve etkime yüksekliği. Modül bu duvarla açılır.

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, hareket edemez**
Zemin	**kum:** $c' = 0,\ \varphi' = 30^\circ,\ OCR = 2;\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(üstte),** $\gamma_{sat} = 20\ \mathrm{kN/m^3}$ **(altta)**
Yeraltı suyu	**2 m derinlikte; duvarın önünde su yok**



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

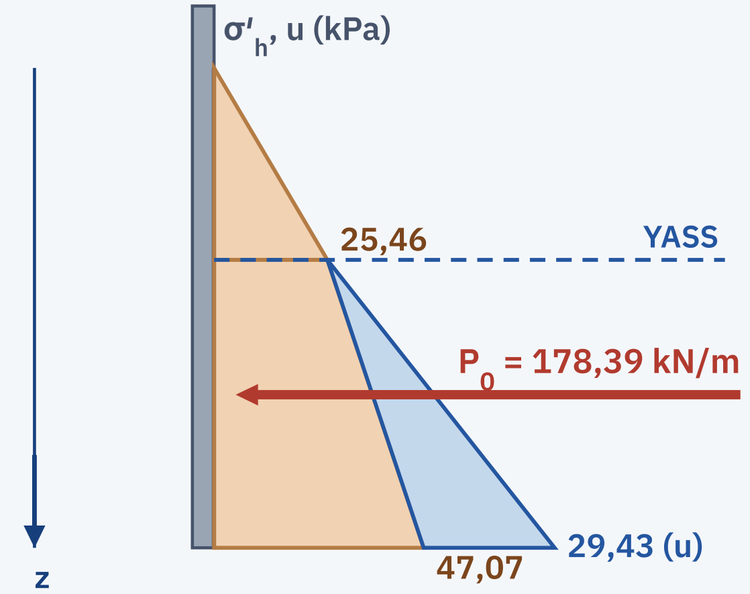
1 K_0 ve gerilmeler

$$K_0 = (1 - \sin 30^\circ)\, 2^{\sin 30^\circ} = \mathbf{0{,}7071}$$

$$z = 2:\ \sigma'_o = 36 \ \rightarrow\ \sigma'_h = 0{,}7071(36) = 25{,}46\ \text{kPa}$$

$$z = 5:\ \sigma'_o = 36 + 3(20 - 9{,}81) = 66{,}57 \ \rightarrow\ \sigma'_h = \mathbf{47{,}07}\ \text{kPa}$$

$$u = 9{,}81(3) = \mathbf{29{,}43}\ \text{kPa}$$



Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Alanlar: üst üçgen · alt dikdörtgen · alt üçgen · su üçgeni

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(2)(25{,}46) + 3(25{,}46) + \tfrac{1}{2}(3)(21{,}62) + \tfrac{1}{2}(3)(29{,}43)$$
$$= 25{,}46 + 76{,}37 + 32{,}42 + 44{,}14 = \mathbf{178{,}39}\ \mathrm{kN/m}$$

3 Etkime yüksekliği (kollar 3,67; 1,50; 1,00; 1,00 m)

$$\bar{z} = \frac{25{,}46(3{,}67) + 76{,}37(1{,}50) + 32{,}42(1{,}00) + 44{,}14(1{,}00)}{178{,}39} = \mathbf{1{,}59}\ \mathrm{m}$$

P_0 = **178,39 kN/m**, tabandan **1,59 m** yukarıda; zemin 134,25, su 44,14 kN/m (su payı %25).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

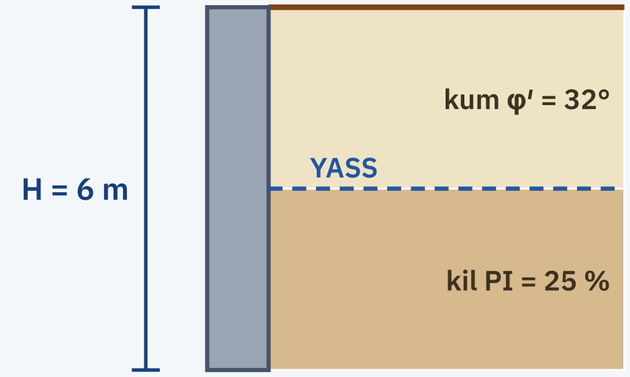
SORU

Verilenler

Duvar	$H = 6$ **m, hareket edemez**
Üst tabaka (0–3 m)	**kum:** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 32^\circ,\ OCR = 1$
Alt tabaka (3–6 m)	**kil:** $\gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3},\ PI = 25\%,\ OCR = 2$
Yeraltı suyu	**kilin üstünde (3 m)**

İSTENEN

Sınırdaki basınç sıçraması, $\mathbf{P_0}$ ve $\bar{\mathbf{z}}$.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 K_0 değerleri: kum Jaky, kil Massarsch

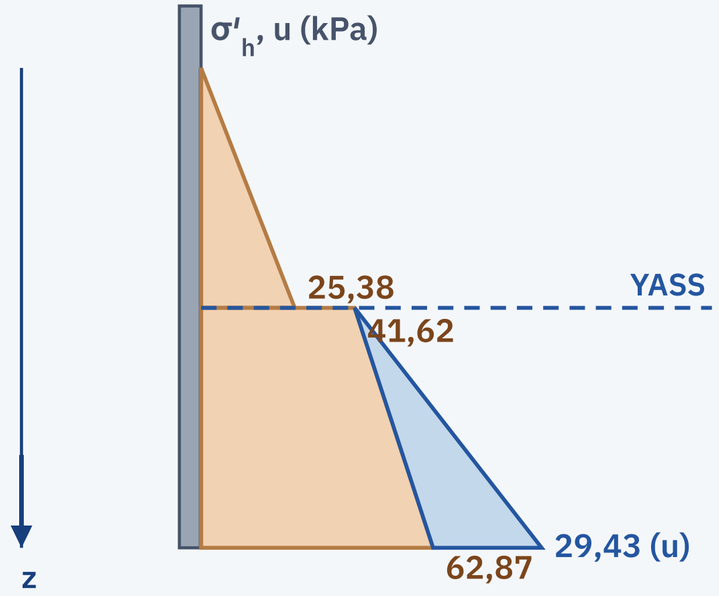
$$K_{0(kum)} = 1 - \sin 32^\circ = \mathbf{0{,}4701}$$

$$K_{0(kil)} = \left[0{,}44 + 0{,}42\frac{25}{100}\right]\sqrt{2} = 0{,}5450\sqrt{2} = \mathbf{0{,}7707}$$

2 Gerilmeler ($\sigma'_o(3) = 54$; $\sigma'_o(6) = 54 + 3(19 - 9{,}81) = 81{,}57$)

$$z = 3:\ \sigma'_h = 0{,}4701(54) = 25{,}38\ (\text{kum});\quad 0{,}7707(54) = 41{,}62\ (\text{kil})$$

$$z = 6:\ \sigma'_h = 0{,}7707(81{,}57) = \mathbf{62{,}87}\ \text{kPa};\quad u = \mathbf{29{,}43}\ \text{kPa}$$



Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

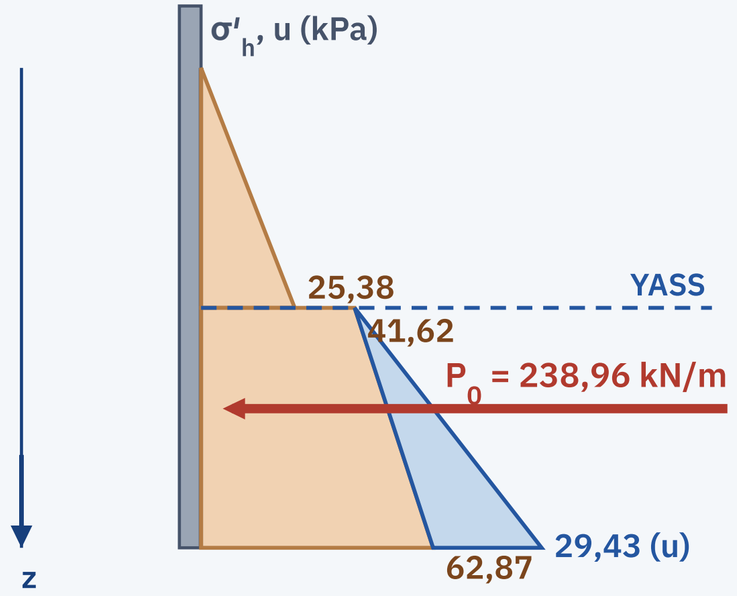
3 Kuvvetler

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(3)(25{,}38) + 3(41{,}62) + \tfrac{1}{2}(3)(21{,}25) + \tfrac{1}{2}(3)(29{,}43)$$
$$= 38{,}08 + 124{,}86 + 31{,}87 + 44{,}14 = \mathbf{238{,}96}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Etkime yüksekliği (kollar 4,00; 1,50; 1,00; 1,00 m)

$$\bar{z} = \frac{38{,}08(4) + 124{,}86(1{,}5) + 31{,}87(1) + 44{,}14(1)}{238{,}96} = \mathbf{1{,}74}\ \mathrm{m}$$

P_0 = **238,96 kN/m**, $\bar{z}$ = **1,74 m**. σ'_h kil tabakasının tepesinde 25,38 → 41,62 kPa sıçrar (K_0 değişir); σ'_o = 54 kPa her iki yanda aynıdır.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Aktif ve pasif duruma ulaşan hareketler

KURAM

Duvar hareket edemiyorsa sükunet basıncı oluşur. Duvar zeminden uzaklaşırsa basınç K_0'dan K_a'ya düşer, zemine yaklaşırsa K_p'ye çıkar; gereken hareket yüksekliğe oranla (aktif çok küçük, pasif on kat fazla):

Zemin	Aktif $\Delta L_a/H$	Pasif $\Delta L_p/H$
Gevşek kum	0,001–0,002	0,01
Sıkı kum	0,0005–0,001	0,005
Yumuşak kil	0,02	0,04
Katı kil	0,01	0,02

NEDEN ÖNEMLİ?

Bodrum duvarı, kazık başlığına bağlı kemer ayağı ya da menfez duvarı hareket edemez: tasarım basıncı **aktif değil, sükunet** değeridir ve yalnızca K_0 bağıntısına bağlıdır.

Soru

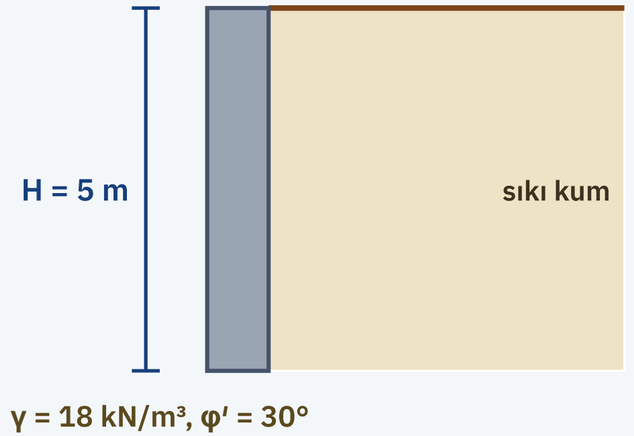
SORU

İSTENEN

Aktif, sükunet ve pasif **kuvvet**; her biri için duvarın gerekli hareketi (sıkı kum).

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, sıkı kum dolgu**
Zemin	**kuru:** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$**, NC (Jaky)**



Çözüm

ÇÖZÜM

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

Durum	K	P (kN/m)	Hareket (sıkı kum, H = 5 m)
Aktif	0,3333	75,0	0,0005–0,001·5 = 2,5–5 mm
Sükunet	0,50	112,5	0 (duvar hareket etmez)
Pasif	3,00	675,0	0,005·5 = 25 mm

Aktif **75,0** < sükunet **112,5** < pasif **675,0 kN/m**; sükunet kuvveti aktifin 1,5 katıdır. Duvar 2,5–5 mm yerinden oynayabiliyorsa aktif basınç, hiç oynayamıyorsa sükunet basıncı esas alınır; pasif direnç için ise en az 25 mm hareket gerekir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Çözümün kapsamı

KURAM

Duvar sürtünmesiz ve düşey kabul edilir; sükunet basıncı yatay etkir (δ′ = 0).

Yüzey yatay; eğimli yüzey ve eğik duvar için Rankine (eğimli dolgu) ve Coulomb modüllerine bakın.

K_0 her tabaka için ayrı ve sabittir: Jaky, Sherif, Mayne–Kulhawy, Massarsch ya da deneyden girilen değer.

Su hidrostatiktir, duvarın önünde su yoktur; su basıncı K_0'a bağlı değildir.

Sürşarj, sıkıştırma gerilmesi ve deprem bu modülde yoktur; sıkıştırma etkisi K_0 değerinde (Sherif) ya da OCR'da yansıtılır.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Sükunet basıncı: hareket edemeyen duvarda $\sigma'_h = K_0\sigma'_o$; $K_a < K_0 < K_p$

K_0: Jaky $1 - \sin\varphi'$; Mayne–Kulhawy $\times$ OCR$^{\sin\varphi'}$; Massarsch $0{,}44 + 0{,}42\ PI/100$ (aşırı konsolidede $\times \sqrt{OCR}$); Sherif sıkıştırılmış kum için $+ (\gamma_d/\gamma_{d,min} - 1)\cdot 5{,}5$

Kuru dolgu: $P_0 = \tfrac{1}{2}K_0\gamma H^2$, tabandan $H/3$

Su: γ' ile efektif gerilme, $u = \gamma_w(z - H_1)$ tam eklenir; su payı çoğu kez büyüktür

Tabakalı dolguda σ'_o süreklidir, σ'_h K_0'ın değiştiği sınırda sıçrar; $\bar{z}$ alanların momentinden bulunur

Hareket: aktif için $\Delta L/H \sim 0{,}001$; pasif için $\sim 0{,}01$ (sıkı kumda yarısı); duvar hareket edemiyorsa sükunet esastır

Kaynaklar

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.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül Örnek 5'teki duvarla açılır (tek tabaka; iki tabaka için Örnek 6).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın tabakalarını, K_0 yöntemini, OCR değerini ve yeraltı suyunu GeoTerva'da girin; modül basınç diyagramını, kuvveti ve etkime yüksekliğini birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.