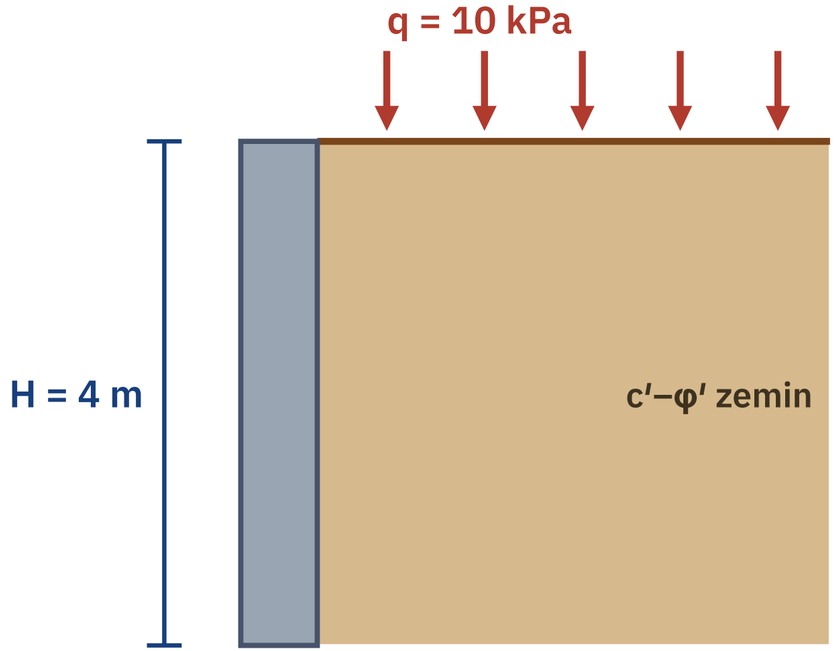
Geoteknik ders sunumu · Yanal toprak basıncı

Depremde pasif toprak basıncı

Ders anlatımı: depremde duvarın önündeki zeminin pasif direncinin pseudo-statik hesabı (Subba Rao ve Choudhury 2005): $K_{p\gamma(e)}$, $K_{pq(e)}$, $K_{pc'(e)}$ katsayıları, k_v, tabaka, su ve sürşarj; her konuda çözümlü örnek.

$$P_{pe} = [\tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}]/\cos\delta'$$

Subba Rao – Choudhury · k_h ve k_v · Tabaka · su · sürşarj



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Depremde pasif direncin **neden azaldığını**: kama atalet kuvvetiyle zemini duvardan uzaklaştırmaya yardım eder
- Pasif kuvveti **üç katsayıyla** hesaplamayı: $P_{pe} = [½\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}]/\cos\delta'$
- Katsayıların **abaklarını** ($\varphi' = 10–40°$, $\delta'/\varphi' = 0{,}5$ ve 1, $k_v = 0$ ve k_h) ve ara değerlerin nasıl okunduğunu
- Kuvvetin yerini (H/3 ve H/2) ve doğrultusunu (normalden δ') bulmayı
- k_v'nin, **suyun** (kısıtlı ya da serbest), tabakaların ve sürşarjın etkisini
- Abakların bittiği **k_h sınırını** ve modülün neden durduğunu

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); düşey duvar, yatay yüzey; k_v yukarı pozitif, $0 \le k_v \le k_h$.

Subba Rao ve Choudhury (2005)

KURAM

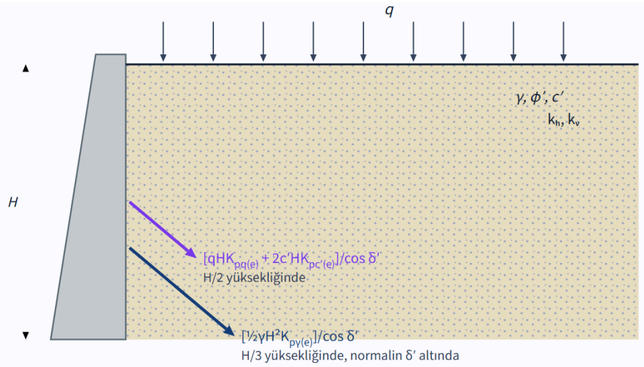
Depremde duvarın önündeki kamanın ataleti zemini duvardan uzaklaştırmaya yardım eder; **pasif direnç azalır**. Subba Rao ve Choudhury, pasif basıncın eğri yüzeyli (spiral + düz kısım) sınır dengesini $k_h W$ ve $k_v W$ kuvvetleriyle genişletti (düşey duvar, yatay c′–φ′ dolgu, q sürşarjı, duvar sürtünmesi δ′, yapışma c'_a):

$$P_{pe} = \left[\tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}\right]\frac{1}{\cos\delta'}$$

Üç katsayı duvara **dik** bileşenlerdir; bu yüzden cos δ′'ye bölünür. γ kısmı H/3'te, q ve c′ kısmı H/2'de etkir:

$$\bar{z} = \frac{P_\gamma\,(H/3) + (P_q + P_{c'})\,(H/2)}{P_{pe}}$$

> Kuvvet duvar yüzünün normalinden δ′ **aşağı** eğimlidir.



Abaklar ve ara değerlerin okunması

KURAM

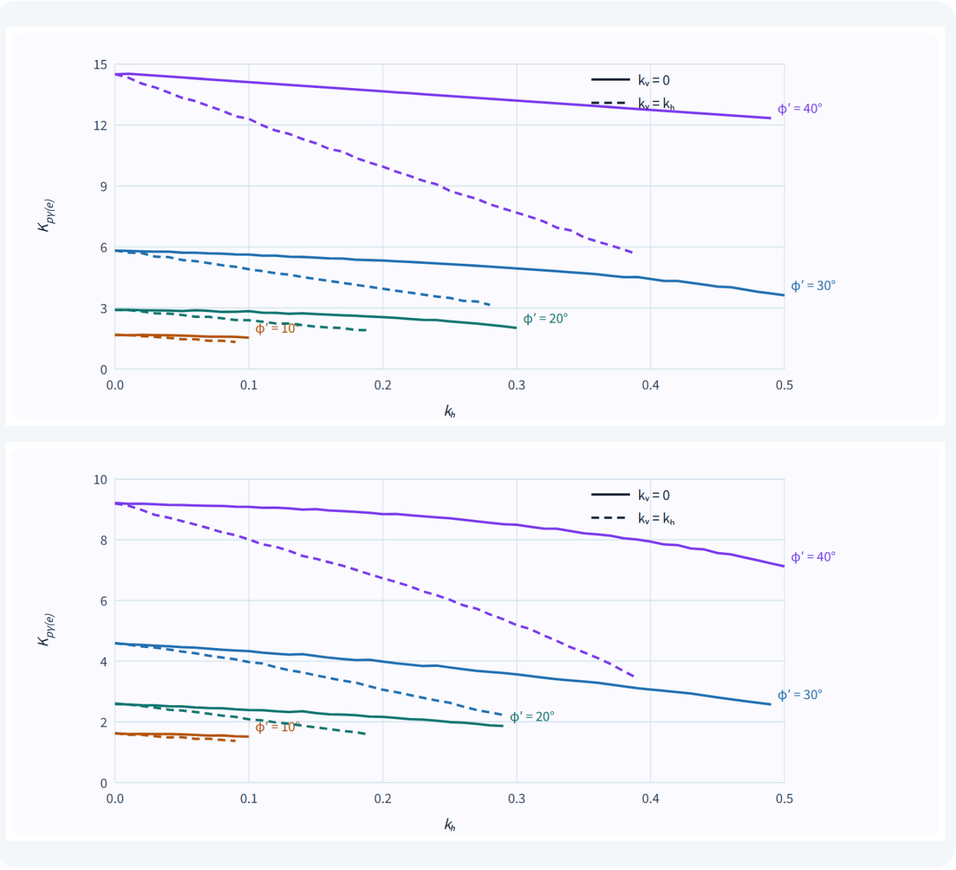
$K_{p\gamma(e)}$ ve $K_{pq(e)}$, $\varphi' = 10°, 20°, 30°, 40°$; $\delta'/\varphi' = 0{,}5$ ve 1; $k_v = 0$ ve $k_v = k_h$ için **abak eğrileri** olarak verilir (modül eğrileri $\Delta k_h = 0{,}01$ adımla taşır). Ara değerler: k_h ve δ'/φ''de doğrusal, φ''de **log-doğrusal**; dışarı ekstrapolasyon yoktur (φ' 10–40°, δ' $\varphi'/2 - \varphi'$).

k_h arttıkça katsayılar düşer; **$k_v = k_h$ ile çok daha hızlı**. Her eğri, pasif direncin tükendiği k_h'de biter; modül orada durur.

$k_h = 0$'da abaklar statik pasif katsayıdır: $\varphi' = \delta' = 40°$ için $K_{p\gamma(e)} = 14{,}49$; log-spiral modülünde $K_p \cos \delta' = 14{,}45$.

$0 \le k_v \le k_h$ (yukarı yönlü, pasif için olumsuz): $k_v = 0$ ve $k_v = k_h$ eğrileri arasında doğrusal ara değer; Coulomb katsayısıyla denendi, hata < %0,4 (düşük yönde).

$K_{pc'(e)}$ tabloda: $\varphi' = 40°$, $\delta'/\varphi' = 1$ için $c'_a = 0$'da 5,95, yapışmalıda 5,97.



Soru

SORU

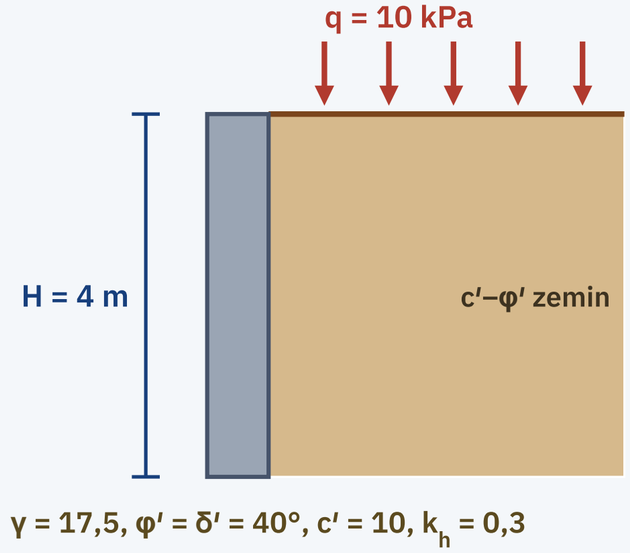
Verilenler

Duvar	$H = 4$ **m, düşey; yatay yüzey;** $q = 10$ **kPa**
Zemin	$\gamma = 17{,}5\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 40^\circ,\ c' = 10$ **kPa;** $\delta' = 40^\circ$**,** $c'_a = 0$
Deprem	$k_h = 0{,}3$**,** $k_v = 0$

İSTENEN

Abak katsayıları, $\mathbf{P_{pe}}$, doğrultusu ve $\bar{\mathbf{z}}$.

Modül bu duvarla açılır.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Katsayılar (δ′/φ′ = 1, k_h = 0,3, k_v = 0; modül abaklardan okur)

$$K_{p\gamma(e)} = \mathbf{13{,}20} \qquad K_{pq(e)} = \mathbf{11{,}00} \qquad K_{pc'(e)} = \mathbf{5{,}95}$$

$$(\text{statik, } k_h = 0: \; K_{p\gamma} = 14{,}49, \; K_{pq} = 11{,}11)$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Normal bileşenler ve toplam

$$P_\gamma = \tfrac{1}{2}(17{,}5)(4)^2(13{,}20) = 1\,848\ \text{kN/m}$$

$$P_q = 10(4)(11{,}00) = 440 \qquad P_{c'} = 2(10)(4)(5{,}95) = 476$$

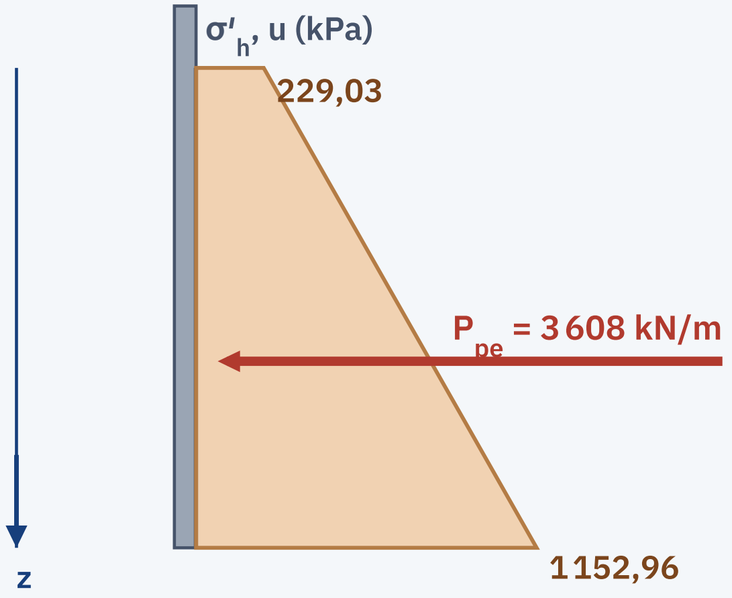
$$P_{pe} = \frac{1\,848 + 440 + 476}{\cos 40^\circ} = \frac{2\,764}{0{,}766} = \mathbf{3\,608}\ \text{kN/m}$$

3 Yer ve bileşenler

$$\bar{z} = \frac{2\,412{,}2(4/3) + 1\,195{,}9(2)}{3\,608} = \mathbf{1{,}554}\ \text{m}$$

$$P_h = P_{pe}\cos 40^\circ = 2\,764 \qquad P_v = P_{pe}\sin 40^\circ = 2\,319\ \text{kN/m}$$

$P_{pe} \approx$ **3 608 kN/m**, normalden 40° aşağı eğimli, tabandan **1,554 m** yukarıda; zemin ağırlığı payı 2 412, q ve c′ payı 1 196 kN/m (normalde bölününce).



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

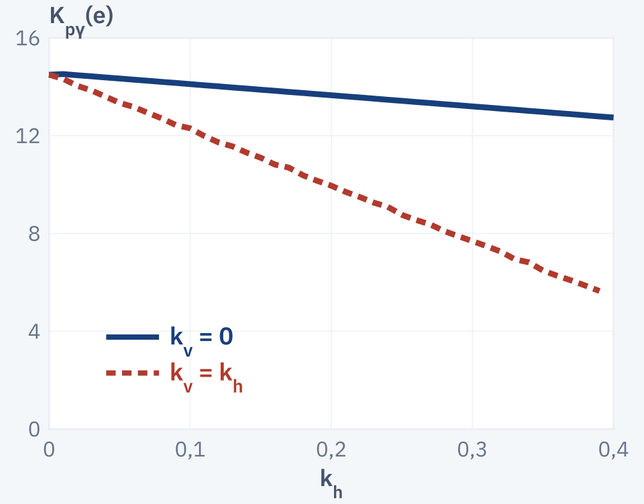
SORU

Verilenler

Zemin	$\varphi' = \delta' = 40^\circ$ ($\delta'/\varphi' = 1$); **kuru kum, kohezyonsuz**
Değişken	$k_h = 0,\ 0{,}1,\ 0{,}2,\ 0{,}3,\ 0{,}35$ ve $k_v = 0$ ya da $k_v = k_h$

İSTENEN

$K_{p\gamma(e)}$ değerleri; k_h = 0,3'te azalma oranları.



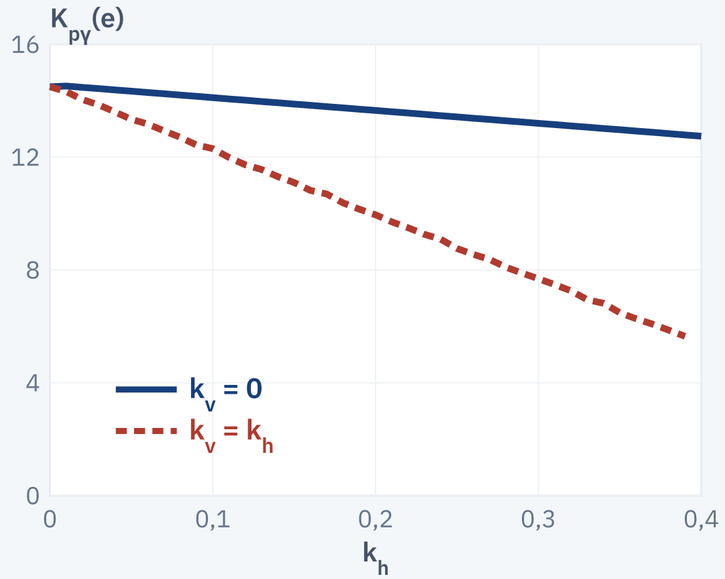
Çözüm

ÇÖZÜM

1 Abak okumaları (δ′/φ′ = 1)

k_h	$K_{p\gamma(e)}$ ($k_v = 0$)	$K_{p\gamma(e)}$ ($k_v = k_h$)
0,00	14,49	14,49
0,10	14,11	12,30
0,20	13,65	9,95
0,30	13,20	7,69
0,35	12,97	6,48

k_h = 0'dan 0,3'e $K_{p\gamma(e)}$ 14,49 → 13,20 (%9 azalma, k_v = 0); $k_v = k_h$ iken 7,69'a düşer (%47). Statikte 14,49, log-spiral modülündeki $K_p \cos \delta'$ = 14,45 ile uyumludur.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

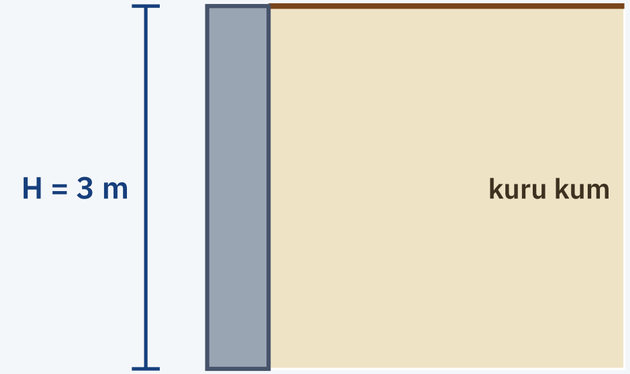
SORU

Verilenler

Duvar	$H = 3$ **m, düşey; yatay yüzey; sürşarj yok**
Zemin	**kuru kum:** $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30°$**;** $\delta' = 15°$ **(**$\delta'/\varphi' = 0{,}5$**)**
Deprem	$k_h = 0{,}2$**,** $k_v = 0$

İSTENEN

P_{pe}, $\bar{z}$, bileşenler; statik pasif kuvvetle karşılaştırma.



γ = 16 kN/m³, φ′ = 30°, δ′ = 15°, k_h = 0,2

Çözüm

ÇÖZÜM

1 Katsayılar (δ′/φ′ = 0,5)

$$k_h = 0:\ K_{p\gamma} = 4{,}592 \qquad k_h = 0{,}2:\ K_{p\gamma(e)} = \mathbf{3{,}987}$$

2 Kuvvet (c′ = q = 0)

$$P_{pe} = \frac{\frac{1}{2}(16)(3)^2(3{,}987)}{\cos 15^\circ} = \frac{287{,}1}{0{,}9659} = \mathbf{297{,}2}\ \mathrm{kN/m}$$

$$\text{statik: } P_p = 342{,}3\ \mathrm{kN/m}\ (K_p = 4{,}592)$$

3 Yer ve bileşenler

$$\bar{z} = \frac{H}{3} = \mathbf{1{,}00}\ \mathrm{m} \qquad P_h = P_{pe}\cos 15^\circ = 287{,}1 \qquad P_v = P_{pe}\sin 15^\circ = 76{,}9\ \mathrm{kN/m}$$

P_{pe} = **297,2 kN/m**; statik 342,3 kN/m idi: k_h = 0,2 direnci %13 **azalttı**.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

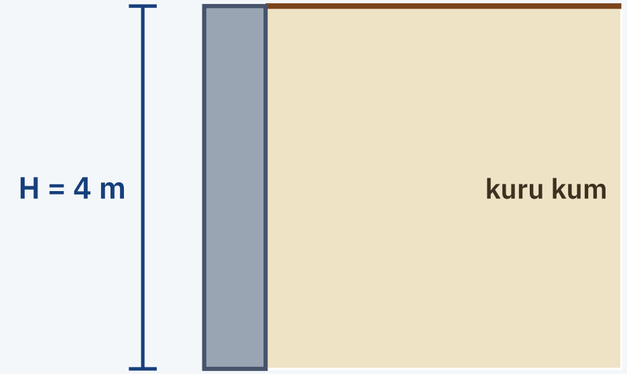
SORU

Verilenler

Duvar ve zemin	$H = 4$ **m; kuru kum:** $\gamma = 17{,}5\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = \delta' = 40^\circ$
Deprem	$k_h = 0{,}3$**;** $k_v = 0,\ 0{,}15\ (= 0{,}5k_h),\ 0{,}30\ (= k_h)$

İSTENEN

Her k_v için **$K_{p\gamma(e)}$** ve **P_{pe}**; ara değer nasıl bulunur?



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Ara değer: $K(k_v) = K(0) + [K(k_h) - K(0)]\cdot k_v/k_h$; $P_{pe} = ½(17{,}5)(16)K_{p\gamma(e)}/\cos 40° = 182{,}7\ K_{p\gamma(e)}$

k_v	k_v/k_h	$K_{p\gamma(e)}$	$K_{pq(e)}$	P_{pe} (kN/m)
0,00	0,0	13,20	11,00	2 412
0,15	0,5	10,44	9,29	1 909
0,30	1,0	7,69	7,58	1 405

$k_v = 0{,}5k_h$'de kuvvet 2 412 → 1 909 kN/m (%21), $k_v = k_h$'de 1 405 kN/m (%42). Yukarı yönlü düşey ivme ağırlığı azalttığından **pasif için olumsuzdur**; $k_v = 0{,}5k_h$ yaygın bir seçimdir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Modülün katman uzantısı

KURAM

Abaklar tek zemin, düşey duvar, yatay yüzey içindir; geometri böyle kalır. Modül zemini **yatay sınırlı tabakalara** ayırır; her tabaka kendi katsayısını alır, üstündeki tabakaların ağırlığı (ve q) sürşarj gibi $K_{pq(e)}$ ile, kendi ağırlığı $K_{p\gamma(e)}$ ile, kohezyonu $K_{pc'(e)}$ ile etkir:

$$\sigma_n = K_{pq(e)}\sigma'_{v,top} + K_{p\gamma(e)}\left(\sigma'_v - \sigma'_{v,top}\right) + 2c'K_{pc'(e)} \qquad \text{yüz boyunca: } \sigma_n \tan\delta'$$

Su seviyesi altında $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$, u duvara dik. Depremde boşluk suyu zeminle birlikte hareket eder (**kısıtlı**) ya da etmez (**serbest**); abaklar daha büyük bir k_h'de okunur:

$$k_{h,w} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}k_h \text{ (kısıtlı)} \qquad k_{h,w} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{sat} - \gamma_w}k_h \text{ (serbest)}$$

Serbest suda Westergaard hidrodinamik basıncı $(7/8)k_h\gamma_w\sqrt{(d_w z')}$ **dirençten çıkarılır** (pasif için olumsuz faz). k_v su altında $k_v/k_{h,w}$ oranıyla okunur.

Bu katmanlı biçim modülün mühendislik uzantısıdır; abak eğrisi bittiğinde modül durur.

YAPILANMA

Katman: K_{pq} (üstündeki yük) + $K_{p\gamma}$ (kendi ağırlığı) + $K_{pc'}$ (kohezyon); su: γ' ve u; deprem: $k_{h,w}$.

Soru

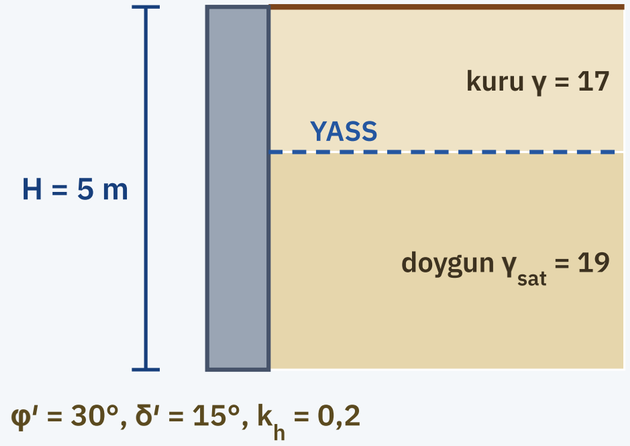
SORU

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, düşey; yatay yüzey; sürşarj yok**
Zemin	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(kuru),** $\gamma_{sat} = 19$**,** $\gamma_d = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**;** $\varphi' = 30^\circ,\ \delta' = 15^\circ$
Deprem ve su	$k_h = 0{,}2$**,** $k_v = 0$**; yeraltı su seviyesi 2 m (d_w = 3 m)**

İSTENEN

Suyun kısıtlı ve serbest olduğu iki durumda $\mathbf{P_{pe}}$ ve $\bar{\mathbf{z}}$; kuru ve statik değerlerle karşılaştırma.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Su altında okunan k_h

$$\text{kısıtlı: } k_{h,w} = \frac{19}{19 - 9{,}81}(0{,}2) = \mathbf{0{,}413} \qquad \text{serbest: } k_{h,w} = \frac{17}{19 - 9{,}81}(0{,}2) = \mathbf{0{,}370}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Katsayılar ve kuvvetler ($\sigma_n = K_{p\gamma(e)}\sigma'_v$, tabaka başında yük yok; su altında $u = 9{,}81(z - 2)$; $P_{wd} = (7/12)(0{,}2)(9{,}81)(3)^2 = 10{,}30$ kN/m dirençten çıkar)

	k_h okunan	$K_{p\gamma(e)}$	Zemin N_s	Su	Hidrodinamik	P (kN/m)	$\bar{z}$ (m)
Suyun üstü (0–2 m)	0,200	3,987					
Kısıtlı su altı	0,413	3,008	566,8	44,1	–	629,5	1,84
Serbest su altı	0,370	3,230	598,6	44,1	10,3	652,5	1,83

Kısıtlı suda P = **629,5 kN/m**, serbest suda **652,5 kN/m**; yeraltı suyu olmayan zeminde 877,1, statik ($k_h = 0$) ve su varken 885,9 kN/m. Su altında okunan $k_{h,w}$ büyük olduğundan $K_{p\gamma(e)}$ 3,99 → 3,01'e düşer ve direnç **azalır**.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

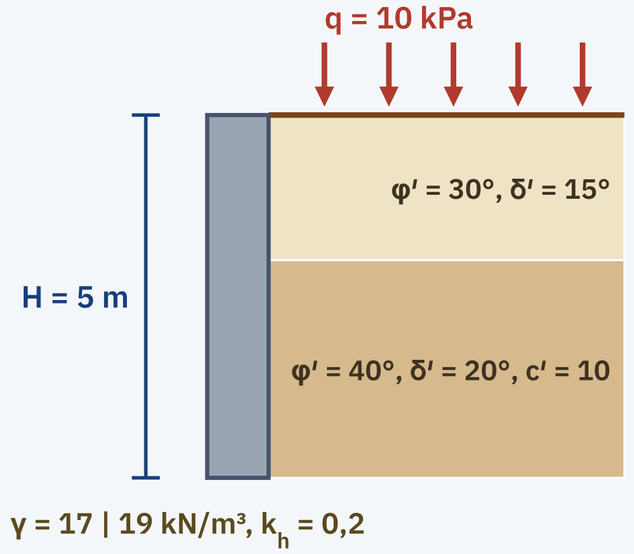
SORU

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, düşey; yatay yüzey;** $q = 10$ **kPa; su yok**
Tabaka 1 (0–2 m)	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ,\ \delta' = 15^\circ,\ c' = 0$
Tabaka 2 (2–5 m)	$\gamma = 19\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 40^\circ,\ \delta' = 20^\circ,\ c' = 10$ **kPa**
Deprem	$k_h = 0{,}2,\ k_v = 0$

İSTENEN

Sınırdaki basınç sıçraması, tabaka kuvvetleri, **P**, β ve **z̄**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Katsayılar (k_h = 0,2)

$$\text{tabaka 1: } K_{p\gamma} = 3{,}987,\ K_{pq} = 4{,}096$$

$$\text{tabaka 2: } K_{p\gamma} = 8{,}844,\ K_{pq} = 8{,}449,\ K_{pc'} = 4{,}33$$

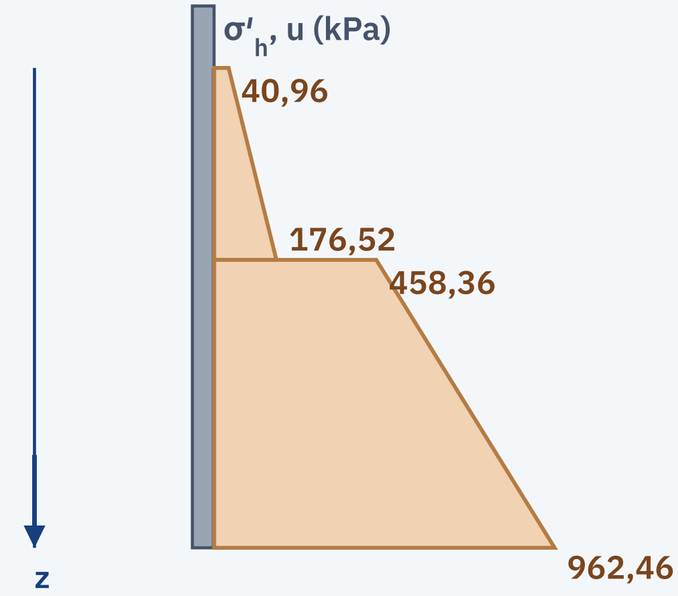
2 Normal basınç σ_n (σ'_v = 10; 44; 101 kPa: üst, sınır, taban)

$$\sigma_n(0) = K_{pq} q = 4{,}096(10) = 40{,}96$$

$$\sigma_n(2^-) = 40{,}96 + 3{,}987(34) = 176{,}52$$

$$\sigma_n(2^+) = 8{,}449(44) + 2(10)(4{,}33) = \mathbf{458{,}36}$$

$$\sigma_n(5) = 458{,}36 + 8{,}844(57) = \mathbf{962{,}46}\ \text{kPa}$$



Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Normal ve yüz boyunca bileşenler (tabakanın δ′′si ile; kollar tabandan)

$$N_1 = 217{,}5\ (\text{kol } 3{,}79\ \text{m})$$

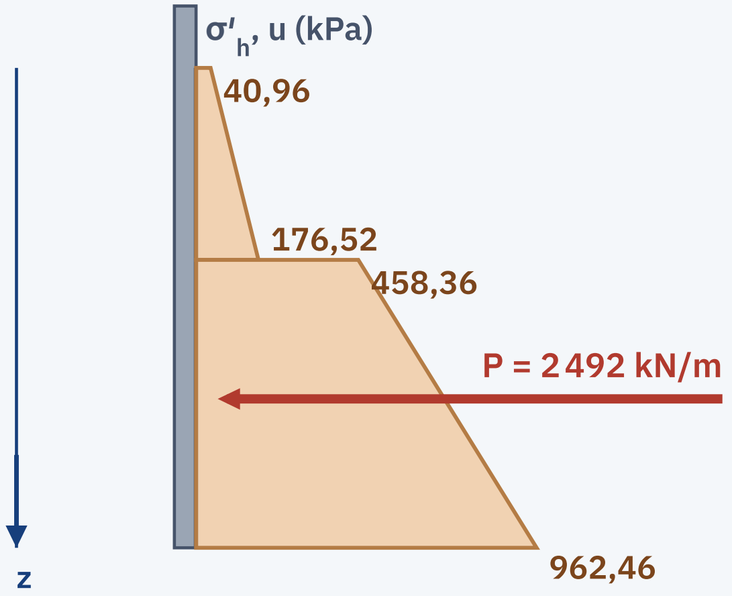
$$N_2 = 2\,131{,}2\ (\text{kol } 1{,}32\ \text{m})$$

$$N = 2\,348{,}7 \qquad T = 834{,}0\ \text{kN/m}$$

4 Bileşke ve yer

$$P = \sqrt{N^2 + T^2} = \mathbf{2\,492{,}4}\ \text{kN/m} \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{T}{N} = 19{,}55^\circ$$

$$\bar{z} = \frac{217{,}5(3{,}79) + 2\,131{,}2(1{,}32)}{2\,348{,}7} = \mathbf{1{,}55}\ \text{m}$$



P = **2 492 kN/m**, β = 19,5° (δ′ = 15° ile 20° arasında), tabandan 1,55 m yukarıda. Sınırda σ_n 176,5 → 458,4 kPa **sıçrar** (φ′, δ′ ve c′ değişir).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Modül nerede durur?

KURAM

Her abak eğrisi, pasif direncin tükendiği k_h değerinde biter; modül bunun ötesinde durur (ekstrapolasyon yapmaz). Sınır φ′, δ′/φ′ ve k_v'ye bağlıdır:

φ′	$k_v = 0$, δ′/φ′ = 0,5	$k_v = 0$, δ′/φ′ = 1	$k_v = k_h$, δ′/φ′ = 0,5	$k_v = k_h$, δ′/φ′ = 1
10°	0,108	0,098	0,085	0,079
20°	0,292	0,279	0,185	0,198
30°	0,494	0,463	0,288	0,282
40°	0,500	0,463	0,393	0,397

$k_v = k_h$ eğrileri çok daha erken biter (φ′ = 30°, δ′ = φ′/2: 0,29).

Su altında okunan $k_{h,w} = k_h \gamma_{sat}/\gamma' \approx 2k_h$ bu sınırı kolayca aşar.

Soru

SORU

Verilenler

Zemin	$\varphi' = 30^\circ$, $\delta' = 15^\circ$; $\gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$; **yeraltı suyu duvarın tepesinde (z_w = 0)**
Deprem	$k_h = 0{,}3$, $k_v = 0$; **boşluk suyu kısıtlı**

İSTENEN

Su altında okunacak $k_{h,w}$; abak sınırı; modül ne yapar?

Çözüm

ÇÖZÜM

1 Okunan k_h ve abak sınırı

$$k_{h,w} = \frac{19}{19 - 9{,}81}(0{,}3) = \mathbf{0{,}620}$$

$$k_{h,lim}(30^\circ,\ \delta'/\varphi' = 0{,}5,\ k_v = 0) = 0{,}494$$

$k_{h,w}$ = 0,620 > 0,494: abak bu değerde yoktur (pasif direncin tükendiği bölge), **modül hesabı durdurur**. Çözüm: yeraltı suyu seviyesini düşürmek ya da k_h'yi azaltmak; k_h = 0,2 için $k_{h,w}$ = 0,41 sınırın içindedir (Örnek 5).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Çözümün kapsamı

KURAM

Pseudo-statik: sabit k_h, k_v; zamana bağlılık ve kalıcı yerdeğiştirme yok.

Geometri: düşey duvar, yatay yüzey; abaklar $\varphi' = 10–40°$, $\delta'/\varphi' = 0{,}5–1$ için; k_v yalnız yukarı yönlü (pasif için olumsuz), $0 \le k_v \le k_h$.

Kohezyon: $K_{pc'(e)}$ tablosu; yapışma ya sıfır ya da $c'_a/c' = \tan\delta'/\tan\varphi'$.

Katman, su ve sürşarj modülün mühendislik uzantısıdır (literatürde kapalı bir çözüm yok); su kısıtlı ya da serbest, serbestte Westergaard dirençten çıkarılır.

Statik pasif için logaritmik spiral ve Coulomb; **aktif deprem** için Mononobe–Okabe modülleri.

Özet

Akılda kalacak noktalar

$P_{pe} = [½\gamma H^2 K_{p\gamma(e)} + qHK_{pq(e)} + 2c'HK_{pc'(e)}] / \cos \delta'$; γ kısmı H/3'te, q ve c′ kısmı H/2'de; yüz normalinden δ′ aşağı

Katsayılar abaklardan (φ′ 10–40°, δ′/φ′ 0,5–1, $k_v = 0$ ve k_h) okunur: k_h, δ′/φ′'de doğrusal, φ′'de log-doğrusal; k_h arttıkça katsayılar düşer

k_v (yukarı) pasif için olumsuz: $k_v = k_h$'de φ′ = δ′ = 40°, $k_h = 0{,}3$ için $K_{p\gamma(e)}$ 13,2 → 7,7

Tabakalarda $\sigma_n = K_{pq}\sigma'_{v,üst} + K_{p\gamma}(\sigma'_v - \sigma'_{v,üst}) + 2c'K_{pc'}$; sınırda sıçrama; yüz boyunca $\sigma_n \tan \delta'$

Su: γ′ ve u; abak $k_{h,w} = k_h\gamma_{sat}/\gamma'$ (kısıtlı) ya da γ_d/γ' (serbest) ile okunur; serbestte hidrodinamik basınç dirençten çıkar

Sınır: abak eğrisi biterse ($k_{h,w}$ büyük, $k_v = k_h$) modül durur

Kaynaklar

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

Subba Rao, K.S. and Choudhury, D. (2005). Seismic passive earth pressures in soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 131(1), 131–135.

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. Transactions ASCE, 98, 418–433.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap kodundan alınmıştır; modül aynı değerleri verir. Modül Örnek 1'deki duvarla (H = 4 m, $\varphi' = \delta' = 40°$, $k_h = 0{,}3$) açılır.

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın tabakalarını, kohezyonunu, sürşarjını, yeraltı suyunu ve deprem katsayılarını GeoTerva'da girin; modül P_{pe}'yi, doğrultusunu ve etkime yüksekliğini birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.