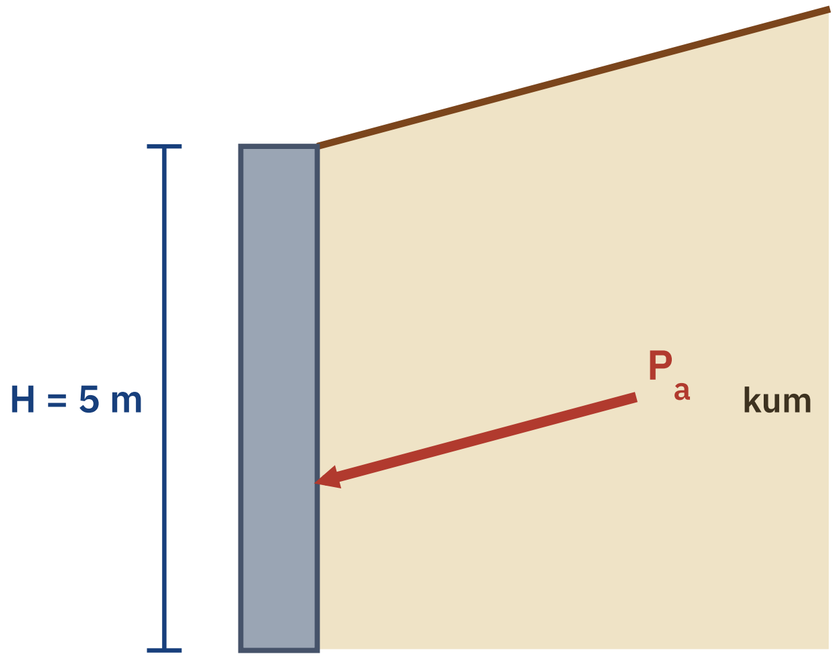
Geoteknik ders sunumu · Yanal toprak basıncı

Rankine: eğimli dolgu ve eğik duvar

Ders anlatımı: dolgu yüzeyi eğimli ya da duvar yüzü eğik olduğunda Rankine çözümü; basıncın yüzeye paralel olması, K katsayıları, kohezyonlu ve tabakalı dolgu; her konuda çözümlü örnek.

Eğimli dolgu
Aktif ve pasif
Eğik duvar · Chu (1991)
Kohezyonlu dolgu
Tabakalı dolgu



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Dolgu yüzeyi eğimli olduğunda basıncın **yüzeye paralel** olduğunu ve neden K_a, K_p'nin α ile değiştiğini
- $K_a K_p = \cos^2\alpha$ bağıntısını ve **$\alpha \le \varphi'$** sınırını
- Eğik duvar + eğimli dolgu için **Chu (1991)** çözümünü: ψ, $K_{(R)}$, β ve η
- Kuvvetin **büyüklüğünü, doğrultusunu (β) ve yerini** bulmayı; yatay ve düşey bileşenlerini ayırmayı
- Kohezyonlu dolguda eğri basınç diyagramını, çekme derinliğini ve **drenajsız kilde** eğimin dayanma koşulunu
- Yüzeye paralel tabakalarda her tabakanın kendi K'sını kullanmayı

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); α ve θ derece, basınçlar kPa. Duvar sürtünmesizdir.

Basınç yüzeye paraleldir

KURAM

Duvarın arkasındaki kohezyonsuz dolgunun yüzeyi yatayla α açısı yapıyorsa Rankine basınçları artık yatay değildir: **yüzeye paralel**, yani α eğimli etkir ve yine derinlikle doğrusal artar:

$$K_a = \cos\alpha \frac{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}} \qquad P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

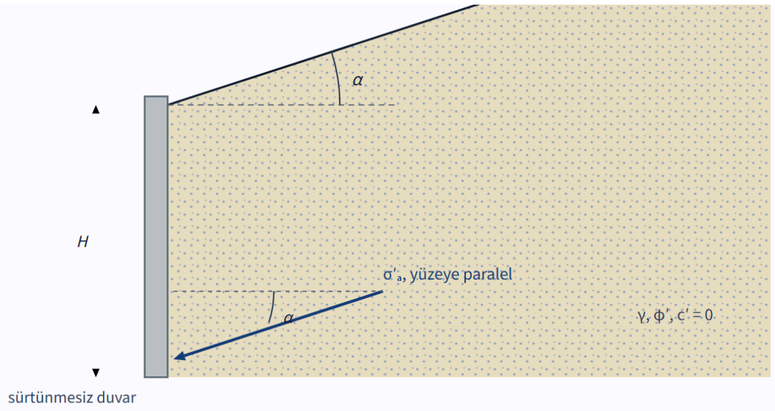
$$K_p = \cos\alpha \frac{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}} \qquad P_p = \tfrac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

Her iki kuvvet da tabandan **H/3** yukarıda etkir ve yatayla α açısı yapar: $P_h = P\cos\alpha$, $P_v = P\sin\alpha$.

α = 0 için denklemler $\tan^2(45° \mp \varphi'/2)$'ye döner.

Çarpım $\mathbf{K_a K_p = \cos^2\alpha}$'dır; α = 0'da 1.

EĞİMLİ DOLGU



K_a ve K_p – α ve φ′

KURAM

AKTİF K_a

α \ φ′	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
0°	0,3610	0,3333	0,3073	0,2827	0,2596	0,2379	0,2174
5°	0,3656	0,3372	0,3105	0,2855	0,2620	0,2399	0,2192
10°	0,3802	0,3495	0,3210	0,2944	0,2696	0,2464	0,2247
15°	0,4086	0,3729	0,3405	0,3108	0,2834	0,2581	0,2346
20°	0,4605	0,4142	0,3739	0,3381	0,3060	0,2769	0,2504
25°	0,5727	0,4936	0,4336	0,3847	0,3431	0,3070	0,2750

PASİF K_p

α \ φ′	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
0°	2,770	3,000	3,255	3,537	3,852	4,204	4,599
5°	2,715	2,943	3,196	3,476	3,788	4,136	4,527
10°	2,551	2,775	3,022	3,295	3,598	3,936	4,316
15°	2,284	2,502	2,740	3,002	3,293	3,615	3,977
20°	1,918	2,132	2,362	2,612	2,886	3,189	3,526
25°	1,434	1,664	1,894	2,135	2,394	2,676	2,987

Soru

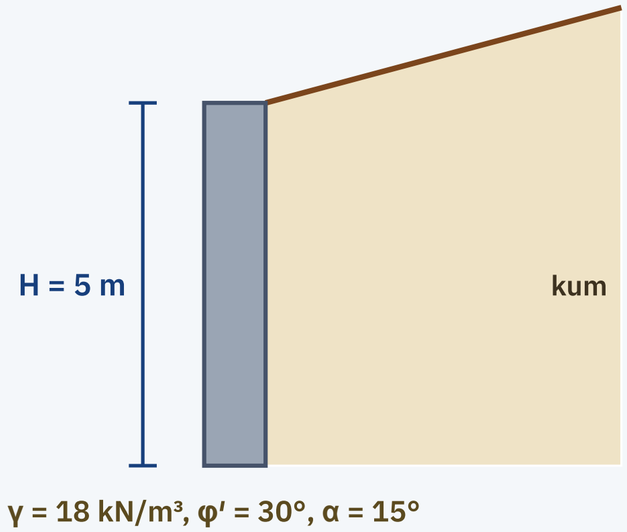
SORU

İSTENEN

K_a, **P_a**, etkime yüksekliği ve doğrultusu; yatay ve düşey bileşen; yatay dolguyla karşılaştırma.

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, düşey, sürtünmesiz**
Dolgu	**kuru kum:** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$**, yüzey eğimi** $\alpha = 15^\circ$



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Katsayı: cos 15° = 0,9659; √(cos²α − cos²φ′) = √(0,9330 − 0,75) = 0,4278

$$K_a = \cos\alpha\,\frac{\cos\alpha - r}{\cos\alpha + r} = 0{,}9659\,\frac{0{,}5381}{1{,}3937} = \mathbf{0{,}3729}$$

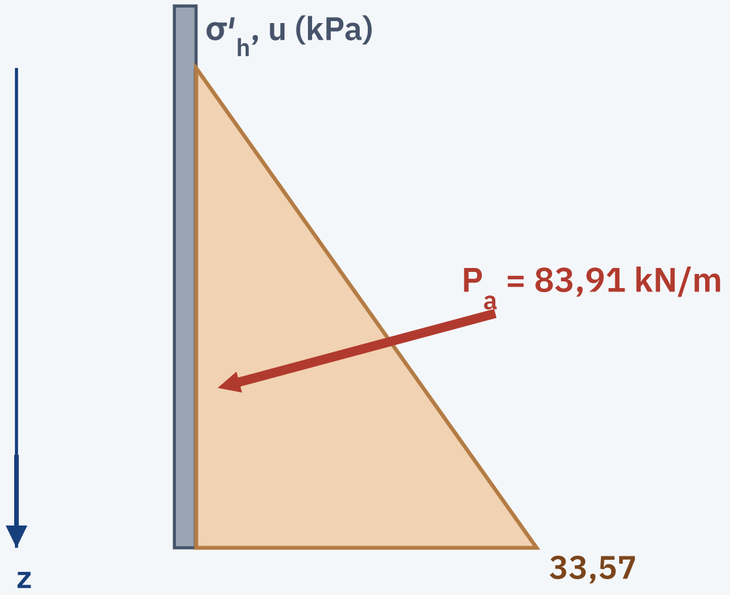
2 Basınç tabanda (yüzeye paralel)

$$\sigma'_a(5) = K_a\gamma H = 0{,}3729(18)(5) = \mathbf{33{,}57}\ \text{kPa}$$

3 Kuvvet, yer ve bileşenler

$$P_a = \tfrac{1}{2}(33{,}57)(5) = \mathbf{83{,}91}\ \text{kN/m} \qquad \bar{z} = \tfrac{5}{3} = 1{,}67\ \text{m}$$

$$P_h = P_a\cos 15^\circ = 81{,}05 \qquad P_v = P_a\sin 15^\circ = 21{,}72\ \text{kN/m}$$



P_a = **83,91 kN/m**, yatayla 15° açıyla, tabandan 1,67 m yukarıda. Yatay dolguda P_a = 75,00 kN/m idi: eğim kuvveti %12 artırır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

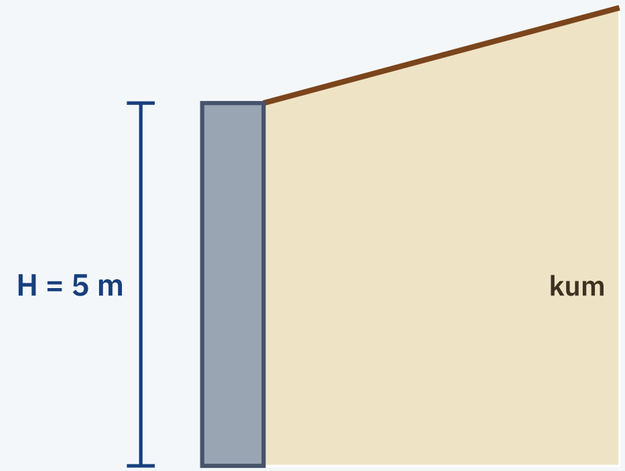
SORU

İSTENEN

K_p, P_p ve bileşenleri; yatay dolgudaki pasif kuvvetle karşılaştırma.

Verilenler

Duvar ve dolgu	**Örnek 1'deki duvar ve dolgu: $H = 5$ m, $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$, $\alpha = 15^\circ$**



γ = 18 kN/m³, φ′ = 30°, α = 15° (pasif)

Çözüm

ÇÖZÜM

1 Katsayı (r = 0,4278)

$$K_p = \cos\alpha\,\frac{\cos\alpha + r}{\cos\alpha - r} = 0{,}9659\,\frac{1{,}3937}{0{,}5381} = \mathbf{2{,}5017}$$

2 Basınç tabanda ve kuvvet

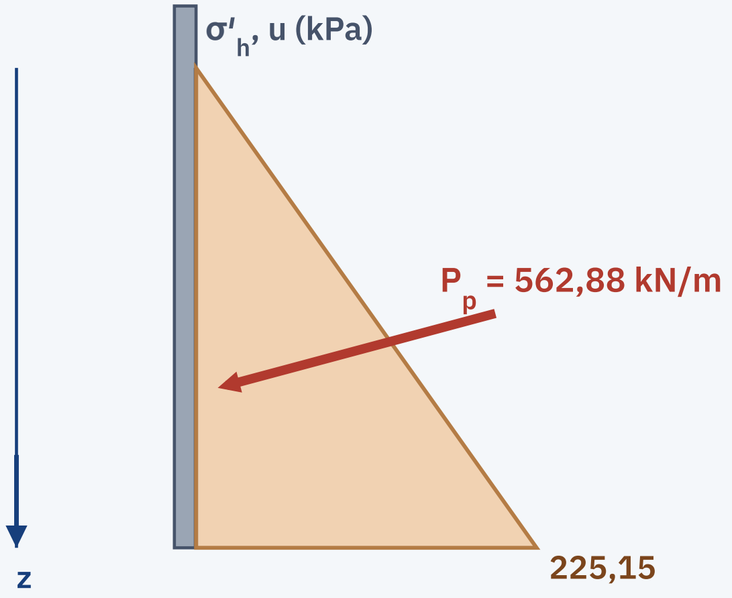
$$\sigma'_p(5) = K_p\gamma H = 2{,}5017(18)(5) = 225{,}15\ \text{kPa}$$

$$P_p = \tfrac{1}{2}(225{,}15)(5) = \mathbf{562{,}9}\ \text{kN/m} \qquad \bar{z} = 1{,}67\ \text{m}$$

3 Bileşenler (yatayla 15°)

$$P_h = P_p\cos 15^\circ = 543{,}7 \qquad P_v = P_p\sin 15^\circ = 145{,}7\ \text{kN/m}$$

P_p = **562,9 kN/m**. Yatay dolguda 675,0 kN/m idi: eğim pasif direnci %17 **azaltır** (aktif kuvvet artarken). K_aK_p = 0,9330 = cos²15° kontrolü sağlanır.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

α ≤ φ′ koşulu

KURAM

Köklü ifade yalnızca **cos²α ≥ cos²φ′**, yani α ≤ φ′ olduğunda gerçektir: φ′′den dik bir şev kohezyonsuz zeminde kendi kendini tutamaz. Sınırda kök sıfır olur ve her iki katsayı da aynı değere yaklaşır:

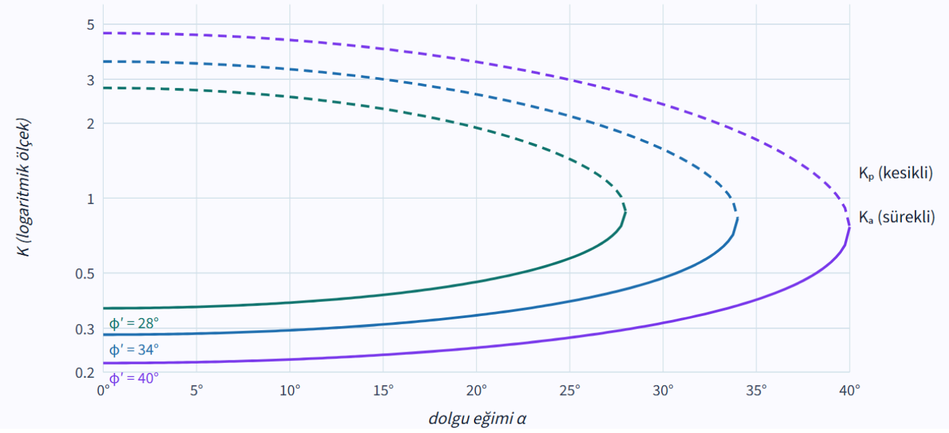
$$\alpha = \varphi' : \qquad K_a = K_p = \cos\varphi'$$

α arttıkça K_a yükselir, K_p düşer; ikisi α = φ′′de birleşir (aktif ile pasif durum birbirinden ayırt edilemez).

Bu, zeminin doğal şev (yığılma) açısındaki durumudur: dolgu zaten göçme eşiğindedir ve duvarın yaptığı hareketle basınç değişmez.

α > φ′ için çözüm yoktur; modül uyarı verir.

K – α (log. ölçek; φ′ = 28°, 34°, 40°)



Soru

SORU

Verilenler

Zemin	**kohezyonsuz kum,** $\varphi' = 32^\circ$
Eğimler	$\alpha = 0^\circ,\ 10^\circ,\ 20^\circ,\ 30^\circ,\ 32^\circ$ **(ve** 33°**)**

İSTENEN

Her eğim için K_a, K_p ve çarpımları; sınırdaki değer; α = 33° için sonuç.

Çözüm

ÇÖZÜM

1 Her eğim için denklemler (φ′ = 32°; cos 32° = 0,8480)

α	K_a	K_p	K_aK_p	cos²α
0°	0,3073	3,255	1,0000	1,0000
10°	0,3210	3,022	0,9698	0,9698
20°	0,3739	2,362	0,8830	0,8830
30°	0,5741	1,306	0,7500	0,7500
32°	0,8480	0,848	0,7192	0,7192

2 Sınır: α = φ′ = 32° ve α = 33°

$$\alpha = 32^\circ : \ \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'} = 0 \ \Rightarrow \ K_a = K_p = \cos 32^\circ = \mathbf{0{,}8480}$$

$$\alpha = 33^\circ : \ \cos^2 33^\circ - \cos^2 32^\circ < 0 \ \Rightarrow \ \text{gerçel kök yok}$$

α büyüdükçe K_a 0,307 → 0,574, K_p 3,25 → 1,306; her α'da K_aK_p = cos²α. α = φ′ = 32°'de ikisi cos φ′ = 0,848'e eşit olur; α = 33° için **çözüm yoktur** (şev dik).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Eğik duvar yüzü ve eğimli dolgu: aktif

KURAM

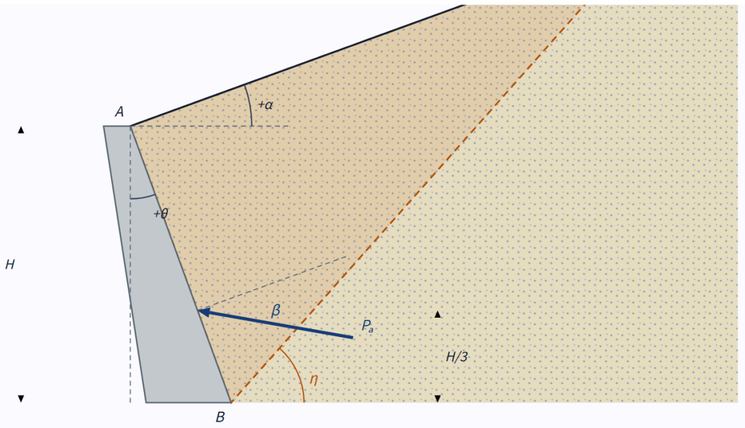
Duvarın yüzü düşeyden θ, dolgu yüzeyi yataydan α eğimliyse (ikisi şekildeki gibi pozitif; duvar sürtünmesiz), Chu (1991) çözümüyle kuvvetin **şiddeti ve doğrultusu** bulunur:

$$\psi_a = \sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'} - \alpha + 2\theta$$

$$K_{a(R)} = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' - 2\sin\varphi'\cos\psi_a}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha + \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

$$P_a = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{a(R)} \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{\sin\varphi'\sin\psi_a}{1-\sin\varphi'\cos\psi_a}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'}$$



β: kuvvetin duvar yüzünün normaline göre açısı; kuvvet tabandan **H/3** yukarıda etkir. **η**: kayma kamasının tabandaki BC yüzünün yatayla açısı.

θ = 0 için $K_{a(R)}$ eğimli dolgu formülüne (Eş. 1), β ise α'ya iner.

Pasif durumda işaretler değişir

KURAM

Pasif durumda aynı geometri için işaretler değişir:

$$\psi_p = \sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'} + \alpha - 2\theta \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{\sin\varphi'\sin\psi_p}{1+\sin\varphi'\cos\psi_p}$$

$$K_{p(R)} = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' + 2\sin\varphi'\cos\psi_p}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha - \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2}\sin^{-1}\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'} \qquad P_p = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{p(R)}$$

Kuvvet tabandan H/3 yukarıda etkir. Duvar yüzü ile yüzey 90° − |α − θ| açıyla kesişir; bu açı kapanırsa duvar şev boyunca uzanır ve yüze etkiyen, üstteki zeminin ağırlığıdır; modül |α − θ| ≤ 75° olanı alır.

Soru

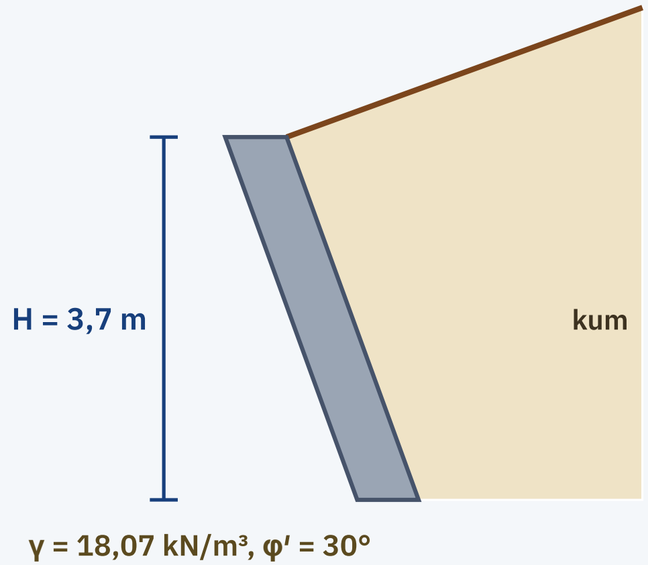
SORU

Verilenler

Duvar	**sürtünmesiz; yüzü düşeyden $\theta = +20^\circ$ eğik; $H = 3{,}658$ m (12 ft)**
Dolgu	**kuru kum: $\gamma = 18{,}07\ \mathrm{kN/m^3}$ (115 pcf), $\varphi' = 30^\circ$; yüzey eğimi $\alpha = +20^\circ$**

İSTENEN

ψ_a, $K_{a(R)}$, P_a, β, η ve etkime yüksekliği. Modül bu duvarla açılır.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Yardımcı açı ve ψ_a

$$\sin^{-1}\frac{\sin 20^\circ}{\sin 30^\circ} = 43{,}16^\circ$$

$$\psi_a = 43{,}16^\circ - 20^\circ + 2(20^\circ) = \mathbf{63{,}16^\circ}$$

2 Katsayı $K_{a(R)}$

$$\sqrt{1 + \sin^2 30^\circ - 2\sin 30^\circ \cos 63{,}16^\circ} = 0{,}8936 \qquad \cos^2 20^\circ = 0{,}8830$$

$$\sqrt{\sin^2 30^\circ - \sin^2 20^\circ} = 0{,}3647$$

$$K_{a(R)} = \frac{\cos 0^\circ\,(0{,}8936)}{0{,}8830\,(0{,}9397 + 0{,}3647)} = \mathbf{0{,}776}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Kuvvet ve yer

$$P_a = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_{a(R)} = \tfrac{1}{2}(18{,}07)(3{,}658)^2(0{,}7758) = \mathbf{93{,}79}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{H}{3} = \mathbf{1{,}219}\ \text{m}$$

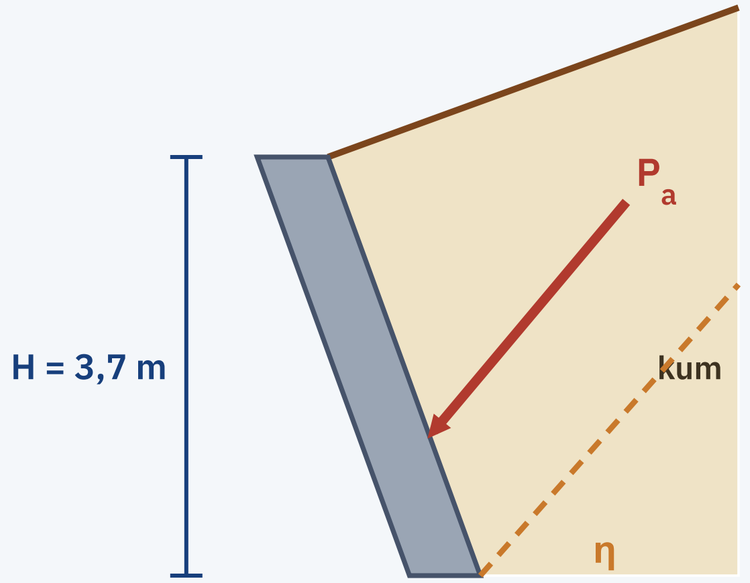
4 Doğrultu β ve kama açısı η

$$\beta = \tan^{-1}\frac{\sin 30^\circ \sin 63{,}16^\circ}{1 - \sin 30^\circ \cos 63{,}16^\circ} = \mathbf{29{,}95^\circ}\ (\approx 30^\circ)$$

$$\eta = 45^\circ + 15^\circ + 10^\circ - \tfrac{1}{2}(43{,}16^\circ) = \mathbf{48{,}42^\circ}$$

5 Bileşenler (yüze dik ve yüze paralel)

$$N = P_a \cos\beta = 81{,}27 \qquad T = P_a \sin\beta = 46{,}83\ \text{kN/m}$$



P_a = **93,79 kN/m** (US birimlerinde 6 424 lb/ft), duvar yüzünün normalinden **30,0°**, tabandan H/3 = 1,22 m yukarıda.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

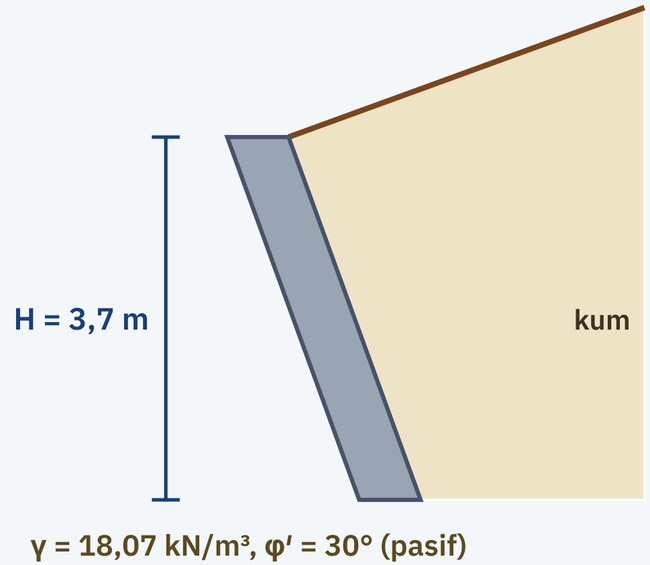
SORU

İSTENEN

ψ_p, $K_{p(R)}$, P_p, β ve **η**; aktif durumla karşılaştırma.

Verilenler

Duvar ve dolgu	**Örnek 4'teki duvar ve dolgu:** $\theta = +20^\circ,\ \alpha = +20^\circ,\ \varphi' = 30^\circ,\ \gamma = 18{,}07\ \mathrm{kN/m^3},\ H = 3{,}658$ **m**



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Ψ_p ve $K_{p(R)}$

$$\psi_p = 43{,}16^\circ + 20^\circ - 2(20^\circ) = \mathbf{23{,}16^\circ}$$

$$K_{p(R)} = \frac{\cos 0^\circ \sqrt{1 + \sin^2 30^\circ + 2 \sin 30^\circ \cos 23{,}16^\circ}}{\cos^2 20^\circ \left(\cos 20^\circ - \sqrt{\sin^2 30^\circ - \sin^2 20^\circ}\right)} = \mathbf{2{,}901}$$

2 Kuvvet, doğrultu ve kama açısı

$$P_p = \tfrac{1}{2}(18{,}07)(3{,}658)^2(2{,}9010) = \mathbf{350{,}7}\ \mathrm{kN/m}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sin 30^\circ \sin 23{,}16^\circ}{1 + \sin 30^\circ \cos 23{,}16^\circ} = \mathbf{7{,}67^\circ} \qquad \eta = \mathbf{61{,}58^\circ}$$

P_p = **350,7 kN/m**, β = 7,7°; aynı duvarın aktif kuvveti 93,79 kN/m idi (oran 3,7). Pasifte kuvvet yüze neredeyse diktir (β küçük), aktifte ise ~30° eğimlidir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Duvar yüzünün eğimi θ kuvveti nasıl değiştirir?

KURAM

Dolgu eğimi sabit tutulup (α = 20°, φ′ = 30°) yalnızca duvar yüzü döndürülürse $K_{a(R)}$ ve β değişir:

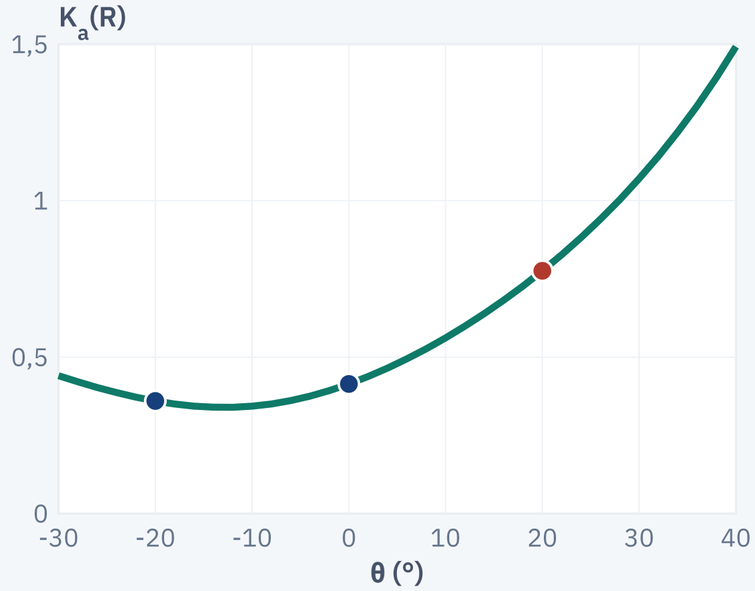
θ	$K_{a(R)}$	β
−20°	0,360	-15,5°
0°	0,414	20,0°
+20°	0,776	30,0°

θ pozitifse (yüz dolgunun üstüne yaslanır) dolgu duvar yüzünün üstünde durur ve kuvvet büyür; negatifse küçülür.

θ = 0 ve α = 20° için β = α = 20°: kuvvet yüzeye paraleldir.

$K_{(R)}$ kuvvetin **yüze paralel ve dik** iki bileşenini birlikte içerir; yalnız yatay bileşen için P cos(β + θ) alınır.

$K_{a(R)}$ – θ (α = 20°, φ′ = 30°)



Mazindrani ve Ganjali (1997)

KURAM

Düşey, sürtünmesiz duvarın arkasında yüzeyi α eğimli c′–φ′ zemini için derinlikteki aktif basınç:

$$\sigma'_a = \gamma z\, K'_a \cos\alpha \qquad r = \frac{c'}{\gamma z}$$

$$K'_a = \frac{2\cos^2\alpha + 2r\cos\varphi'\sin\varphi' - \sqrt{D}}{\cos^2\varphi'} - 1$$

$$D = 4\cos^2\alpha\left(\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'\right) + 4r^2\cos^2\varphi' + 8r\cos^2\alpha\sin\varphi'\cos\varphi'$$

$$z_c = \frac{2c'}{\gamma}\sqrt{\frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'}}$$

YÜZEYE PARALEL BASINÇ

Kohezyonsuzda olduğu gibi basınç yüzeye **paralel**, yani yatayla α açılı etkir; kuvvetin duvar yüzüne dik bileşeni P cos α'dır.

K'_a derinliğe $c'/\gamma z$ ile bağlıdır: basınç **doğrusal değildir**; zeminin üstünde negatiftir, çekme çatlağı derinliği z_c eğimden bağımsızdır.

Pasif durumda kökün önündeki işaret + olur. α = 0 → Rankine ($\sigma'_a = K_a\gamma z - 2c'\sqrt{K_a}$); c′ = 0 → Eş. 1.

Çatlaklı hesapta z_c'nin altı, çatlaksızda tüm yükseklik integre edilir; yalnız θ = 0 için geçerlidir.

Soru

SORU

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, düşey, sürtünmesiz**
Dolgu	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 25^\circ,\ c' = 10$ **kPa; yüzey eğimi** $\alpha = 10^\circ$

İSTENEN

z_c, tabandaki basınç, çatlaklı ve çatlaksız P_a ve etkime yüksekliği; yatay dolguyla karşılaştırma.

Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

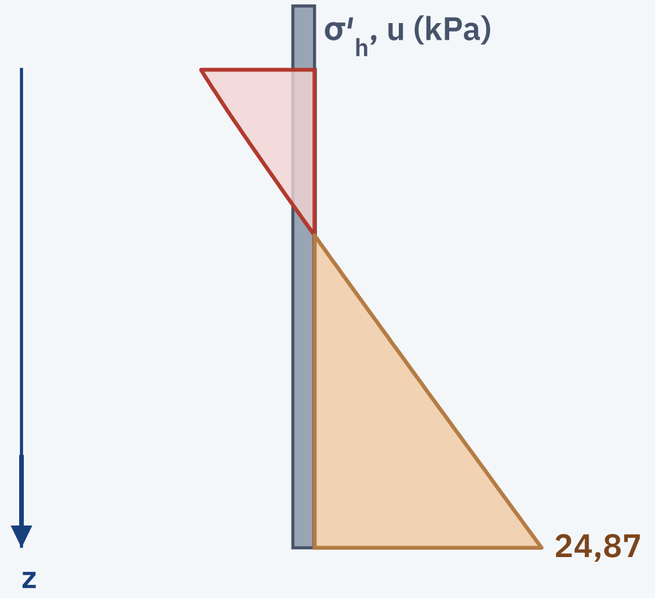
1 Çekme derinliği (eğimden bağımsız)

$$z_c = \frac{2(10)}{18}\sqrt{\frac{1+\sin 25^\circ}{1-\sin 25^\circ}} = 1{,}111(1{,}5697) = \mathbf{1{,}744}\ \text{m}$$

2 Tabanda (z = 5 m): r = c′/γz = 10/(18·5) = 0,1111

$$D = 0{,}9467 \qquad K_a' = 0{,}2806$$

$$\sigma_a'(5) = \gamma z K_a' \cos\alpha = 18(5)(0{,}2806)\cos 10^\circ = \mathbf{24{,}87}\ \text{kPa}$$



Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Çatlaklı kuvvet (z_c'den H'ye eğri diyagramın alanı, sayısal integral)

$$P_a = \int_{z_c}^{H} \sigma'_a \, dz = \mathbf{40{,}33}\ \text{kN/m}\ (\text{yüzeye paralel},\ 10^\circ)$$

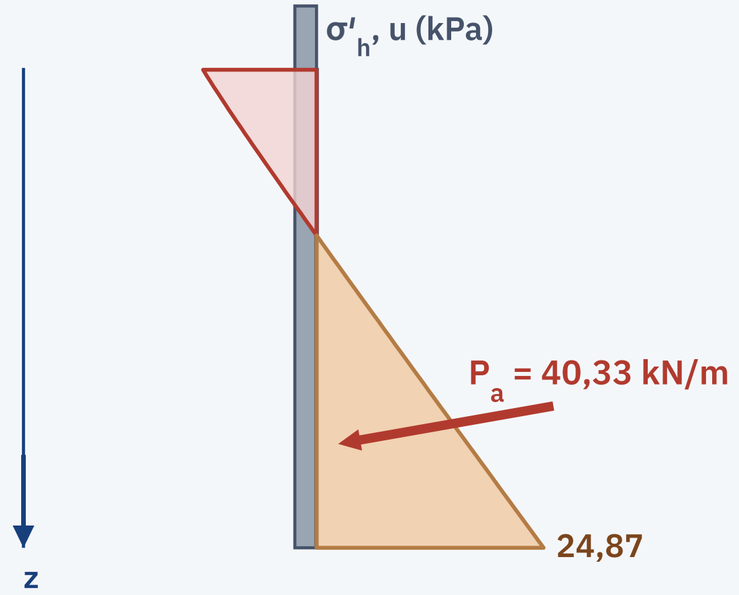
$$\bar{z} = 1{,}08\ \text{m}\ (\text{tabandan})$$

4 Karşılaştırma

$$\text{çatlaksız: } P_a = 29{,}16\ \text{kN/m}$$

$$\text{yatay dolgu: } P_a = \tfrac{1}{2}(23{,}79)(3{,}256) = 38{,}72\ \text{kN/m}$$

Çatlaklı kuvvet **40,33 kN/m**, çatlaksızdan %38 büyük; yatay dolguya göre (38,72 kN/m) eğim kuvveti %4 artırdı. Çatlaklı değer tasarım değeridir.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Yüzeye paralel tabakalar

KURAM

Dolgu **yüzeye paralel** tabakalardan oluşuyorsa (duvarın arkasındaki düşey bir sondaj her yerde aynı kalınlıkları keser) her tabaka, üstündeki zeminin ağırlığı $\sigma'_v = \Sigma \gamma_i h_i$ altında kendi γ, φ′ ve c′ değerleriyle değerlendirilir:

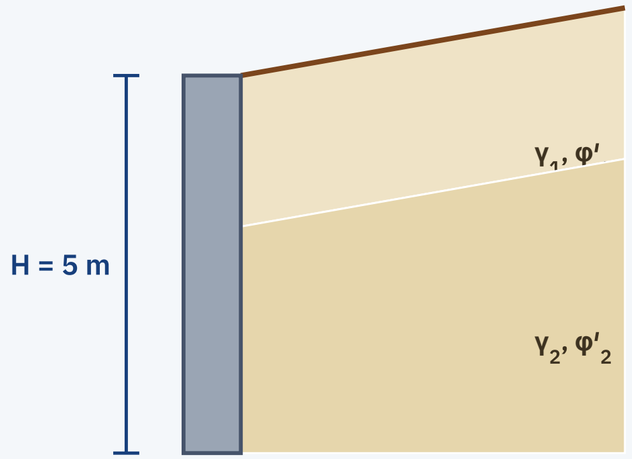
$$\sigma' = \sigma'_v \frac{K_{(R)} \cos\theta}{1 + \tan\theta \tan\alpha} \qquad \theta = 0 : \ \sigma' = \sigma'_v K_{(R)}$$

Tabaka sınırında K değiştiği için basınç **sıçrar**; her tabakanın kuvveti duvar yüzüne dik N_i ve paralel T_i bileşenlerine ayrılır; $P = \sqrt{(N^2 + T^2)}$, $\beta = \tan^{-1}(T/N)$.

Sürşarj q yüzeyde q/cos α ağırlığında bir tabaka gibi σ'_v'ye eklenir; **su** seviyesi altında γ′ kullanılır, u duvara dik etkir.

Bu, modülün Chu ve Mazindrani–Ganjali çözümlerini tabakalara genişletmesidir (literatürde kapalı bir tabakalı çözüm yoktur); tek tabakada kapalı çözümü 10^{-8} içinde verir.

YÜZEYE PARALEL TABAKALAR



Soru

SORU

Verilenler

Duvar	$H = 5$ **m, düşey, sürtünmesiz**
Dolgu	**yüzey eğimi** $\alpha = 10^\circ$**; yüzeye paralel iki tabaka (düşey kalınlık)**
Tabaka 1 (2 m)	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ$
Tabaka 2 (3 m)	$\gamma = 19\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 35^\circ$

İSTENEN

Her tabakada basınçlar, **P**, **N**, **T** ve etkime yüksekliği.

Çözüm (1/2)

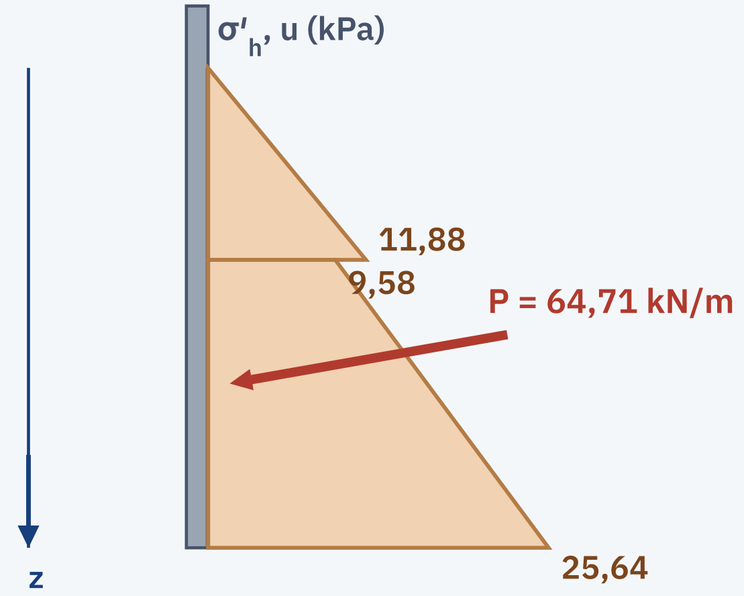
ÇÖZÜM

1 Katsayılar (α = 10°)

$$K_1(30^\circ) = \mathbf{0{,}3495}$$
$$K_2(35^\circ) = \mathbf{0{,}2818}$$

2 Düşey gerilmeler: sınırda 17(2) = 34; tabanda 34 + 19(3) = 91 kPa

$$\sigma_1' = 0{,}3495(34) = \mathbf{11{,}88}\ \text{kPa (üstte)}$$
$$\sigma_2' = 0{,}2818(34) = \mathbf{9{,}58}\ \text{kPa (altta)}$$
$$\sigma'(5) = 0{,}2818(91) = \mathbf{25{,}64}\ \text{kPa}$$



Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Kuvvetler (yüzeye paralel): üst üçgen · alt dikdörtgen · alt üçgen

$$P = \tfrac{1}{2}(2)(11{,}88) + 3(9{,}58) + \tfrac{1}{2}(3)(16{,}06) = 11{,}88 + 28{,}74 + 24{,}09 = \mathbf{64{,}71}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Bileşenler ve etkime yüksekliği

$$N = P\cos 10^\circ = 63{,}73 \qquad T = P\sin 10^\circ = 11{,}24\ \mathrm{kN/m}$$

$$\beta = \tan^{-1}(T/N) = 10^\circ \qquad \bar{z} = \mathbf{1{,}71}\ \mathrm{m}$$

P = **64,71 kN/m**, duvar yüzüne dik N = 63,73 kN/m; tabandan 1,71 m yukarıda. Sınırda basınç 11,88 → 9,58 kPa **düşer**, çünkü alttaki tabakanın φ′ değeri daha büyüktür; σ'_v ise süreklidir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Eğimin dayanma koşulu

KURAM

Drenajsız kil ($\varphi_u = 0$, c_u, toplam gerilme) aynı bağıntıdır; $\varphi' = 0$ ve $c' = c_u$ alınır:

$$K'_a = 2\cos^2\alpha - 2\sqrt{r^2 - \sin^2\alpha\cos^2\alpha} - 1 \qquad r = \frac{c_u}{\gamma z}$$

Çözüm yalnızca **şev ayakta durduğu sürece** vardır: yüzeye paralel düzlemlerdeki kayma gerilmesi kohezyonu aşamaz:

$$\tau = \gamma z \sin\alpha\cos\alpha \le c_u \;\Rightarrow\; z_{max} = \frac{c_u}{\gamma \sin\alpha\cos\alpha} \qquad z_c = \frac{2c_u}{\gamma}$$

Modül bu koşulu duvarın tabanına kadar denetler; duvar z_{max}'tan yüksekse hesap durur.

$\alpha = 0$ için $\sigma_a = \gamma z - 2c_u$, çekme çatlağı $2c_u/\gamma$.

NEDEN SINIR VAR?

Eğimli yüzeyin altında, yüzeye paralel her düzlemde kayma gerilmesi derinlikle artar; kil bu gerilmeyi yalnızca c_u kadar taşır. Daha derinde şev kendi ağırlığıyla kayar.

Soru

SORU

Verilenler

Dolgu	**doygun kil, drenajsız: $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $c_u = 20$ kPa; yüzey eğimi $\alpha = 15^\circ$**
Duvar	**$H = 4$ m (ve 5 m), düşey, sürtünmesiz**

İSTENEN

z_{max}, **z_c**, tabandaki basınç ve çatlaklı **P_a**; H = 5 m'de ne olur?

Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Dayanma sınırı ve çekme derinliği

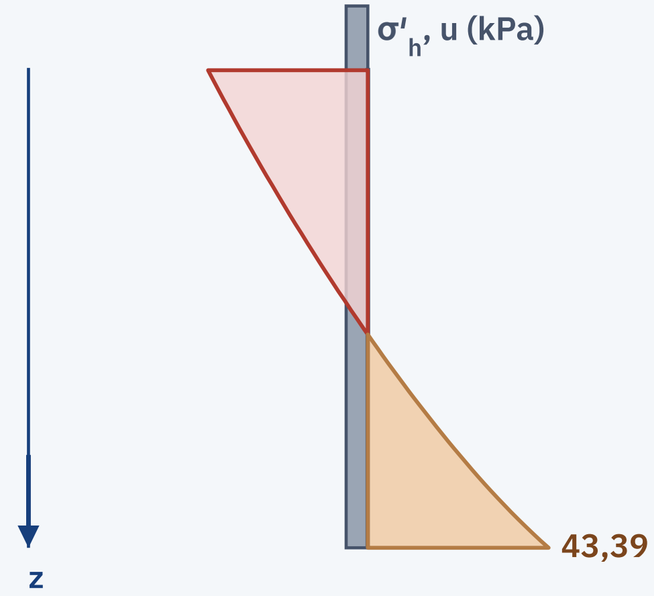
$$z_{max} = \frac{20}{18 \sin 15^\circ \cos 15^\circ} = \mathbf{4{,}44}\ \text{m}$$

$$z_c = \frac{2c_u}{\gamma} = \frac{40}{18} = \mathbf{2{,}22}\ \text{m}$$

2 H = 4 m: τ(4) = 18(4) sin15° cos15° = 18,0 ≤ 20 kPa: şev ayakta; tabanda r = 20/(18·4) = 0,2778

$$K'_a = 2\cos^2 15^\circ - 2\sqrt{r^2 - \sin^2 15^\circ \cos^2 15^\circ} - 1 = 0{,}6239$$

$$\sigma_a(4) = \gamma z K'_a \cos\alpha = 18(4)(0{,}6239)\cos 15^\circ = \mathbf{43{,}39}\ \text{kPa}$$



Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Çatlaklı kuvvet (z_c'den 4 m'ye)

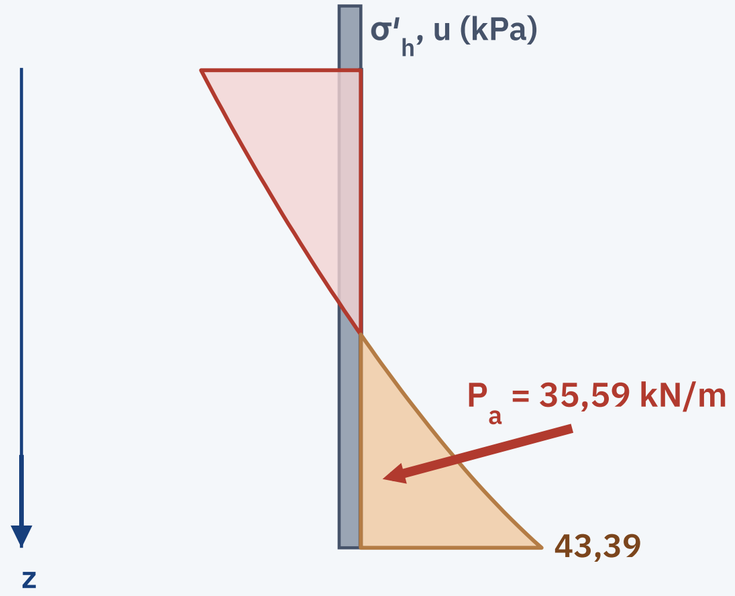
$$P_a = \int_{z_c}^{H} \sigma_a \, dz = \mathbf{35{,}59}\ \mathrm{kN/m}\ (\text{yatayla } 15^\circ)$$

$$\bar{z} = 0{,}57\ \mathrm{m} \qquad \text{çatlaksız: } P_a = -9{,}37\ \mathrm{kN/m}$$

4 H = 5 m: τ(5) = 22,5 kPa > c_u = 20 kPa

$$\tau(5) = 18(5)\sin 15^\circ \cos 15^\circ = 22{,}5 > c_u \ \Rightarrow\ \text{şev kayar}$$

H = 4 m için çatlaklı P_a = **35,59 kN/m**; çatlaksız kuvvet negatiftir (–9,37 kN/m), yani çatlak varsayımı belirleyicidir. z_{max} = 4,44 m olduğundan 5 m'lik duvarda çözüm yoktur.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Çözümün kapsamı

KURAM

Duvar sürtünmesizdir; basınç, Chu çözümünde duvar normaline göre β açılı verilir (β yalnızca zeminin kendi gerilme durumundan gelir, duvar–zemin sürtünmesi değildir). Sürtünmeli duvar için Coulomb modülüne bakın.

Dolgu tek yönlü eğimli düzlem yüzeydir; tabakalar yüzeye paraleldir. Yüzey eğiminin değişmesi, kademe ya da kırık yüzey bu çözümde yoktur.

Kohezyonlu dolgu yalnızca düşey duvar (θ = 0) için Mazindrani–Ganjali ile verilir; çekme çatlağı z_c'ye kadar kabul edilir, su dolu çatlak ayrıca düşünülmelidir.

Geometri: duvar yüzü ile yüzey en az 15° ile kesişmelidir ($|\alpha - \theta| \leq 75°$); aksi hâlde yüze etkiyen basınç yanal toprak basıncı değil, üstteki zeminin ağırlığıdır.

Deprem ve **sürtünmeli duvar** bu modülün kapsamı dışındadır (Mononobe–Okabe, Coulomb).

Özet

Akılda kalacak noktalar

Eğimli dolgu ($\alpha \le \varphi'$): basınç yüzeye **paralel**, $K_a = \cos\alpha\,(\cos\alpha - r)/(\cos\alpha + r)$, K_p ters işaretli; $P = \tfrac{1}{2}K\gamma H^2$ tabandan $H/3$, yatayla α

$K_aK_p = \cos^2\alpha$; α arttıkça K_a artar, K_p azalır; $\alpha = \varphi'$'de ikisi $\cos\varphi'$ olur, $\alpha > \varphi'$ için çözüm yoktur

Chu (1991): $\psi_a = \sin^{-1}(\sin\alpha/\sin\varphi') - \alpha + 2\theta$; $K_{a(R)}$, β ve η kapalı; kuvvet yüzün normalinden β eğimlidir

Duvar eğimi θ pozitifse kuvvet büyür, negatifse küçülür; pasifte $\psi_p = \sin^{-1}(\ldots) + \alpha - 2\theta$

Kohezyonlu dolguda K'_a derinliğe bağlıdır, diyagram eğridir; $z_c = (2c'/\gamma)\sqrt{((1+\sin\varphi')/(1-\sin\varphi'))}$ eğimden bağımsızdır; çatlaklı kuvvet esastır

Tabakalı dolgu: $\sigma' = \sigma'_v K_{(R)}$; sınırda sıçrama, $P = \sqrt{(N^2 + T^2)}$

Drenajsız kil: $z_{max} = c_u/(\gamma \sin\alpha \cos\alpha)$ aşılırsa şev kendi ağırlığıyla kayar, çözüm yoktur

Kaynaklar

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

Chu, S.C. (1991). Rankine analysis of active and passive pressures on dry sands. Soils and Foundations, 31(4), 115–120.

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

Mazindrani, Z.H. and Ganjali, M.H. (1997). Lateral earth pressure problem of cohesive backfill with inclined surface. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(2), 110–112.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül Örnek 4'teki duvarla (H = 3,658 m, γ = 18,07 kN/m³) açılır.

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın eğimini, dolgu eğimini, tabakalarını ve yeraltı suyunu GeoTerva'da girin; modül kuvveti, doğrultusunu ve etkime yüksekliğini birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com