Geoteknik ders sunumu · Palplanş ve destekli kazılar

Ankrajlı palplanş duvar (tabakalı zemin)

Ders anlatımı: kum ve kil tabakalı zeminde konsol ve ankrajlı palplanş duvar; iki yüzdeki gerilmeler, kısa ve uzun dönem, gömme derinliği, ankraj kuvvetleri, moment, kesit, deprem; her konuda çözümlü örnek.

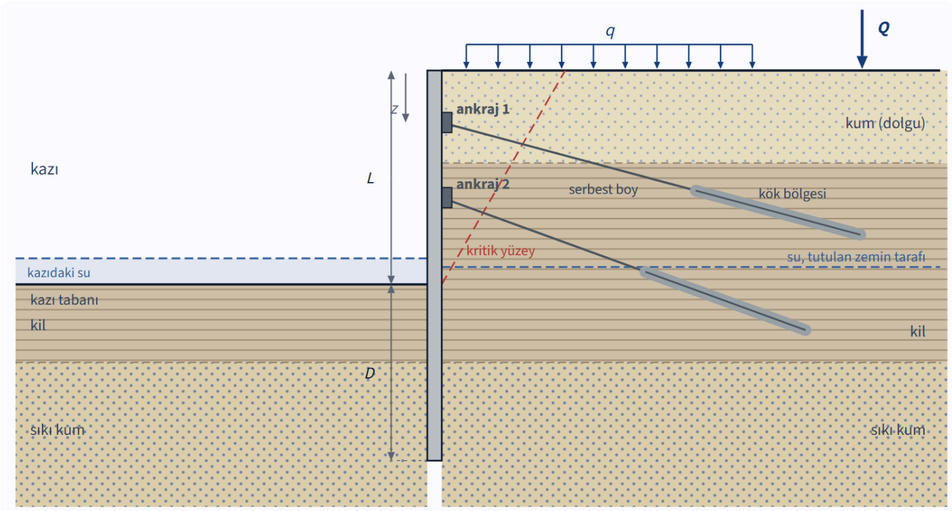
Tabakalı zemin

Kısa ve uzun dönem

Serbest zemin mesnedi · mafsal

Ankraj · EN 1993 · AISC 360

Deprem · taban kabarması



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Altı tabakaya kadar **kum (drenajlı: c′, φ′) ve kil (kısa dönem c_u, uzun dönem c′, φ′)** profilinde duvarın iki yüzünün gerilmelerini ve basınçlarını
- Drenajsız kilde **$\sigma_v \mp 2c_u$, çekme çatlağı** (su dolu) ve **kısa/uzun dönem** senaryolarında “her sonucun büyüğü” kuralını
- **Net basınç diyagramını** ve güvenlik payını (derinliğe f, pasife FS_p, verilen derinlik)
- **Konsol**, **tek sıra ankraj (serbest zemin mesnedi)** ve **çok sıra ankraj (mafsal yöntemi)** statiğini; moment, ankraj kuvveti ve enjeksiyon bağı
- Palplanşı **EN 1993-1-1 / AISC 360-22** ile doğrulamayı; **deprem**, **taban kabarması** ve **yerdeğiştirme** kontrollerini

DERS AKIŞI

Her konu **üç adımda** işlenir:

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

2 · **Soru**: verilenler ve istenen

3 · **Çözüm**: adım adım, sayılarla

Örnek duvar: 7,5 m kazı yüksekliği; üstte 3 m kum, 6 m kil, altında sıkı kum; su iki yüzde 8,5 m derinde; q = 10 kPa sürşarj; iki sıra ankraj (1,5 m ve 4,5 m, s = 2,5 m, 15° ve 20°). Kuvvetler duvarın metresi içindir.

Duvar nasıl tutulur?

KURAM

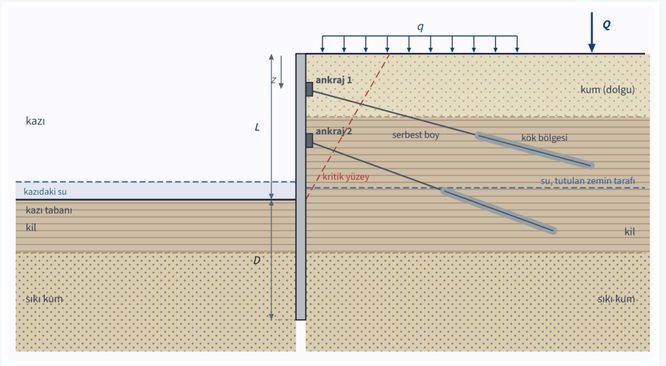
Palplanş, kazı tabanının altındaki gömmesiyle ve tutulan yükseklik buna yetmediğinde **zemin ankrajlarıyla** ayakta kalır. Gerçek zemin nadiren tek tabakadır: kum sürtünmesiyle, kil dayanımıyla iter ve direnir; kilin dayanımı kazıdan hemen sonra ile yıllar sonra aynı değildir. Modül profili olduğu gibi alır: **altı tabakaya kadar**, kazı tabanının altında iki yüzde de devam eden.

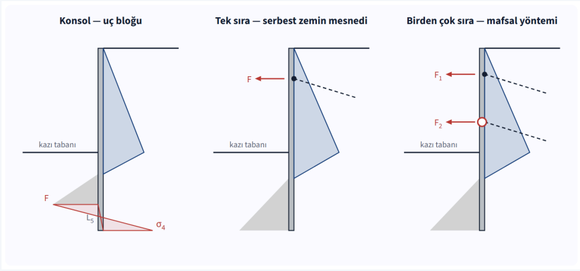
Konsol: yalnız zeminle tutulur; uca yakın bir noktadan döner (kazı tabanı üstü aktif, altı taraflar yer değiştirir). Tutulan yükseklik yaklaşık 5–6 m'ye kadar ekonomiktir.

Tek sıra ankraj: duvar iki mesnetli kiriştir (ankraj ve gömmenin pasifi); uç serbest sayılır: **serbest zemin mesnedi**, gömme ankraja göre tek moment denkleminden çıkar.

Çok sıra ankraj: duvar hiperstatiktir; **mafsal yöntemi** en üst hariç her ankrajda mafsal koyar, açıklıklar basit kiriş olur, en alt ankrajın altı serbest zemin mesnediyle tasarlanır.

z duvar tepesinden aşağı ölçülür; L kazı tabanının derinliği, D gömme. Net basınç kazıya doğru pozitif; ankraj duvarı F (metre başına) ile geri çeker. Yöntem **limit dengedir**: zemin sınır aktif ve pasif hâlinde alınır.





σ_v, u, σ'_v; Rankine c′–φ′

KURAM

Her yüzde üç gerilme alanı tutulur: toplam düşey gerilme σ_v, boşluk suyu basıncı u ve efektif gerilme $\sigma'_v = \sigma_v - u$. Drenajsız kil birinciyle, drenajlı tabaka ikinci ve üçüncüyle tanımlanır. Tutulan sütun tüm örtüsünü kazı tabanının altında da taşır; kazı sütunu kazı tabanında yeniden başlar: gömmenin dengelemesi gereken fark budur.

$$\sigma_{v,b}(z) = q + \sum \gamma_i \Delta z_i \quad u_b = \gamma_w \max(0, z - D_w) \quad \sigma'_{v,b} = \sigma_{v,b} - u_b$$

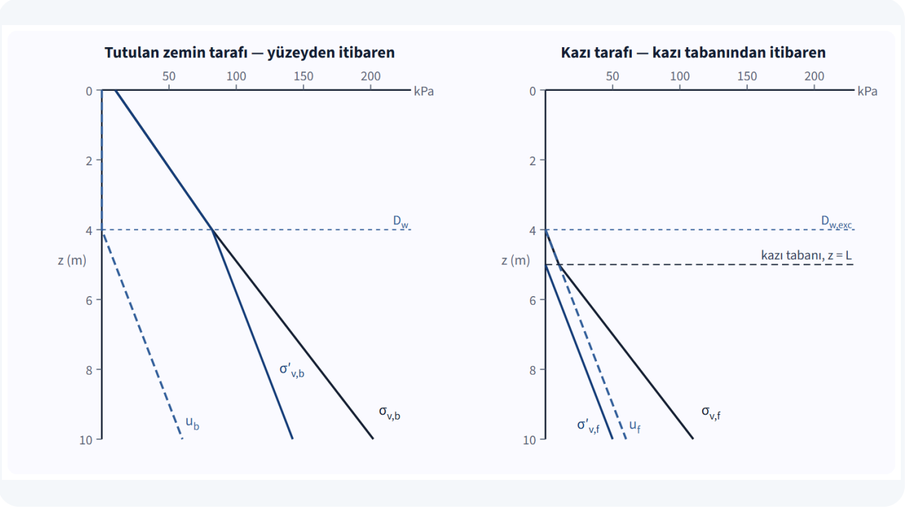
Drenajlı tabaka (kum ya da uzun dönemde kil): Rankine, düşey duvar, düz yüzey, duvar sürtünmesi yok:

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \tfrac{\varphi'}{2}\right) \quad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi'}{2}\right) \quad p_a = \max\left(0,\ K_a\sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a}\right) + u \quad p_p = \eta_p\left(K_p\sigma'_v + 2c'\sqrt{K_p}\right) + u$$

Her tabakanın kendi K_a, K_p değeri vardır: σ'_v süreklidir ama **basınç tabaka sınırında sıçrar**; sıçramalar diyagramın gerçek özelliğidir, yumuşatılmaz.

c′ > 0 iken aktif ifade tabakanın üstünde negatif olur: zemin duvarı çekemez, zemin kısmı sıfırda **kesilir** (su kısmı kesilmez).

Üniform sürşarj q her derinlikte $\sigma_{v,b}$'ye eklenir; çekme kesmesi onu görür.



Soru

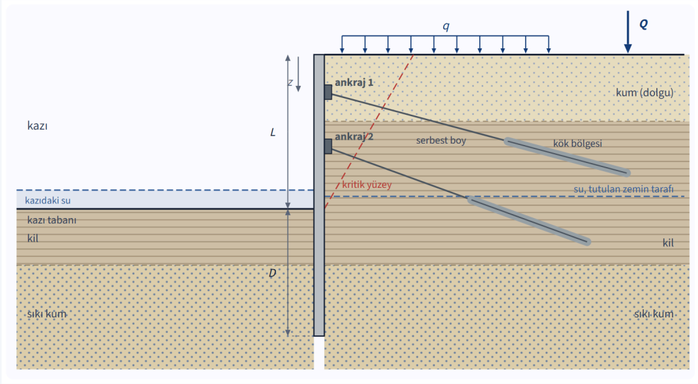
SORU

Verilenler

Profil	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa**
Soru	**tutulan yüzde $z = 3{,}0$ m (kum–kil sınırı) ve kazı tabanı $z = L = 7{,}5$ m**

İSTENEN

σ'_V; kum, kil (drenajlı, uzun dönem) için **p_a**; kum–kil sınırındaki sıçrama.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Kum–kil sınırında (z = 3,0 m; su 8,5 m'de, u = 0)

$$\sigma'_v(3{,}0) = q + \gamma z = 10 + 18(3{,}0) = 64{,}0\ \text{kPa}$$

$$\text{kum: } p_a = K_a \sigma'_v = 0{,}3333(64{,}0) = \mathbf{21{,}33}\ \text{kPa}$$

$$\text{kil } (\varphi' = 24^\circ)\text{: } p_a = K_a \sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a} = 0{,}4217(64{,}0) - 2(5)\sqrt{0{,}4217} = \mathbf{20{,}50}\ \text{kPa}$$

2 Kazı tabanında (z = L = 7,5 m): tutulan sütun kilde 4,5 m daha ilerledi

$$\sigma'_v(L) = 64{,}0 + 19(4{,}5) = 149{,}5\ \text{kPa}$$

$$p_a = 0{,}4217(149{,}5) - 2(5)\sqrt{0{,}4217} = \mathbf{56{,}55}\ \text{kPa}$$

σ′$_v$ süreklidir (64 kPa), ama basınç sınırda **21,33 → 20,50 kPa** sıçrar (kum K_a = 1/3, kil K_a = 0,4217 ve c′ katkısı −6,49 kPa). Kazı tabanında aktif basınç 56,55 kPa'dır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

$\sigma_v \mp 2c_u$; “her sonucun büyüğü”

KURAM

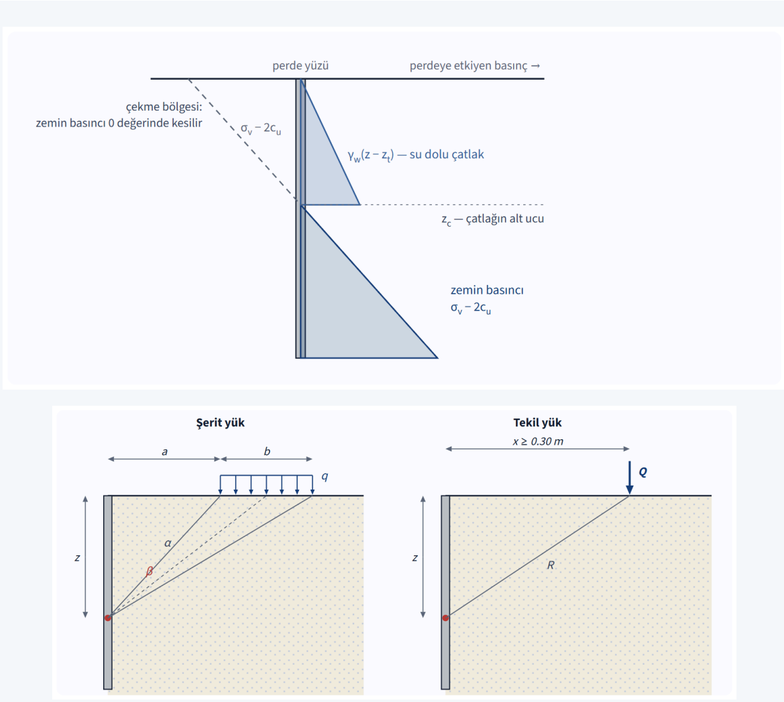
Hızlı yüklenen doygun kil (kazı onun önünde yapılır) drenaj olamaz: dayanım c_u, $\varphi = 0$, **toplam gerilmeyle** tanımlanır (su σ_v içindedir):

$$p_a = \max(\sigma_v - 2c_u,\ u) \qquad p_p = \eta_p(\sigma_v + 2c_u) \qquad p_{crack} = \gamma_w(z - z_t)\ \ (z_t \le z \le z_c)$$

Tutulan kilin üstünde $\sigma_v - 2c_u$ negatiftir: kil çatlar; z_t çekme bölgesinin üstü, $\mathbf{z_c}$ $\sigma_v = 2c_u$ olan alt ucudur. Yüzeye açık çatlak yağmur ya da yeraltı suyuyla dolar ve kendi hidrostatik basıncıyla iter: **varsayılan su dolu** (güvenli); kuru ilan edilebilir (uyarıyla), öteki durumun sonucu hep yazılır.

Kısa dönem kil drenajsız; **uzun dönem** her tabaka drenajlı. Hangisinin kötü olduğu önceden bilinmez; modül **ikisini de çalıştırır** ve gömmeyi, her ankraj kuvvetini ve momenti **iki senaryonun büyüğü** alır (aynı senaryodan gelmeleri gerekmez). Ankrajın çekme taşımadığı bir senaryo duvarı belirlemez; not edilir.

Sürşarj: üniform q $\sigma_{v,b}$'ye eklenir; şerit yük (a, b, q) ve tekil yük (Q, x) rijit duvar için elastik çözümdür, K_a ile **çarpılmaz**; depremde ψ_2 ile girer.



Soru

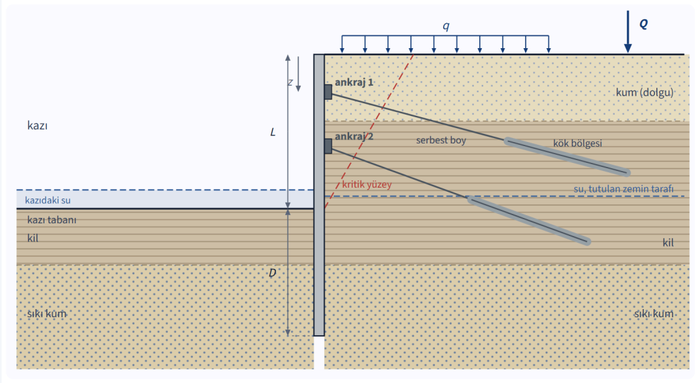
SORU

Verilenler

Profil	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa**
Soru	**kısa dönemde kilin üstünde $\sigma_v - 2c_u$ ve çatlağın alt ucu z_c; iki senaryonun sonuçları**

İSTENEN

$\sigma_v - 2c_u$ (kil üstü), **z_c** ve çatlaktaki su basıncı; kısa ve uzun dönemin D, F, M değerleri ve belirleyici olan.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Kısa dönem: kilin üstünde (z = 3,0 m, σ_v = 64,0 kPa, c_u = 45 kPa)

$$\sigma_v - 2c_u = 64{,}0 - 2(45) = -\mathbf{26{,}0}\ \text{kPa} \ < 0 \ \Rightarrow\ \text{kesilir; çatlak açılır}$$

$$\sigma_v(z_c) = 2c_u: \quad 64{,}0 + 19(z_c - 3) = 90 \ \Rightarrow\ z_c = \mathbf{4{,}37}\ \text{m}$$

$$p_{crack}(z_c) = \gamma_w(z_c - z_t) = 9{,}81(1{,}37) = 13{,}4\ \text{kPa}$$

2 Her iki senaryo çalıştırılır (modülün motoru); duvar ikisinin büyüğüne göre tasarlanır

Senaryo	D_{teorik} (m)	$D_{gerekli}$ (f = 1,3)	F_1, F_2 (kN/m)	M_{max} (kN·m/m)	z_M (m)
Kısa dönem (kil drenajsız)	1,549	2,014	34,30 ; 56,94	59,49	6,55
Uzun dönem (hepsi drenajlı)	2,403	3,124	41,69 ; 132,32	121,43	6,82

Su dolu çatlak kilin üstünde **1,37 m** boyunca (3,0 → 4,37 m) hidrostatik basınç verir. Uzun dönem **her sonuçta belirleyici**dir (D, F_1, F_2, M): duvar uzun dönem senaryosuyla tasarlanır; kısa dönem momenti yarıdan azdır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Fark diyagramı; derinliğe f ya da pasife FS_p

KURAM

Duvar iki yüzün **farkını** hisseder: $p_{net} = p_b - p_f$ (tutulan – kazı). Denge bu diyagrama yazılır: kazı tabanı üstünde tutulan zeminin aktif basıncı ve suyu; altında gömmenin pasifi aktiften hızlı büyür ve net basınç E noktasında sıfırlanıp tutulan tarafa döner. Üst, ankrajlar, kazı tabanı, her tabaka sınırı, su seviyeleri, çatlak uçları, yük kenarları ve kesilmiş basınçların sıfırları duvarı **parçalara** böler; her parçada bileşen doğrusaldır, kuvvet ve moment tam integrallenir:

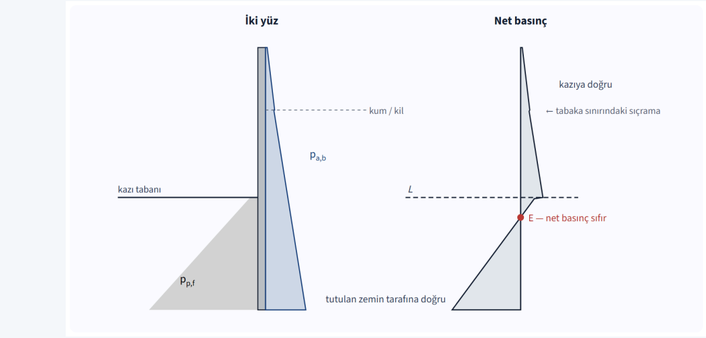
$$F_{seg} = \tfrac{1}{2}(p_0 + p_1)h \qquad M_{seg}(z_r) = \frac{h\,[p_0(2z_0 + z_1) + p_1(z_0 + 2z_1)]}{6} - z_r F_{seg}$$

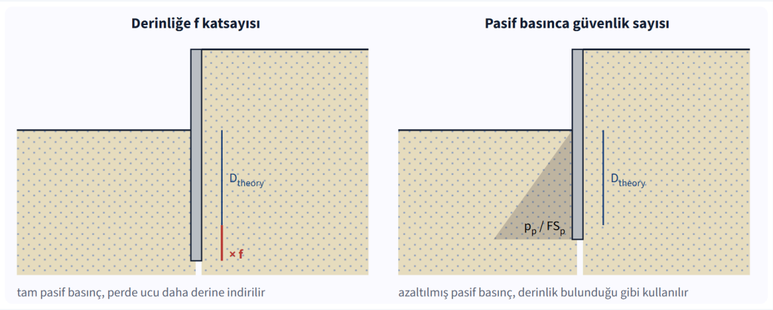
Teorik derinlik D_{teorik}'te pay yoktur; iki yol (şekil):

Derinliğe f: $D_{gerekli} = f \cdot D_{teorik}$ (f = 1,2–1,3 kum, 1,4–1,6 kil); basınçlar ve moment teorik duvarınkidir.

Pasife FS_p: $\eta_p = 1/FS_p$ pasif **zemin** basıncını çarpar (su basıncını asla); azaltılmış diyagramın derinliği $D_{gerekli}$ olur. Öteki yolun $D_{gerekli}$ değeri hep yanına yazılır.

Verilen derinlik: $UR_D = D_{gerekli}/D_{verilen} \le 1$ ile doğrulanır; pasifin bölünebileceği $FS_{p,mob}$ bulunur. Moment ve ankraj kuvvetleri tasarım ve verilen derinlik durumlarının **büyüğüne** göre alınır.





Soru

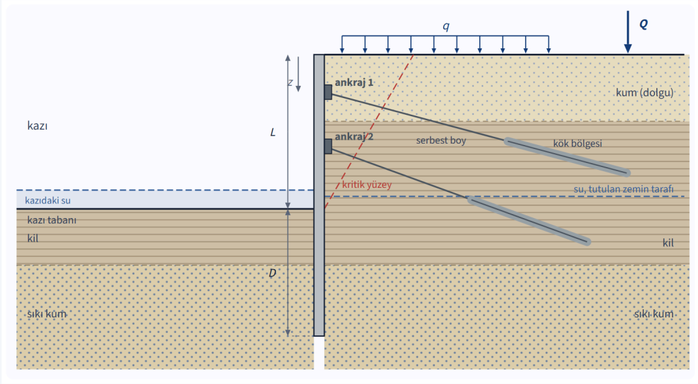
SORU

Verilenler

Duvar	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa; iki sıra ankraj: $z = 1{,}5$ m ($15°$) ve $4{,}5$ m ($20°$), $s = 2{,}5$ m; $f = 1{,}3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Yollar	**$f = 1{,}3$; $FS_p = 1{,}5$; verilen $D = 3{,}5$ m ve $6{,}0$ m**

İSTENEN

Her yolun **$D_{gerekli}$**, **M_{max}**, **T_2** ve $FS_{bond,2}$; verilen derinlikte UR_D, $FS_{p,mob}$.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Derinliğe f: $D_{gerekli} = 1{,}3 \times D_{teorik} = 1{,}3 \times 2{,}403 = 3{,}124$ m (moment ve kuvvetler teorik duvarınki)

Yol	$D_{gerekli}$ / verilen (m)	UR_D	$FS_{p,mob}$	M_{max} (kN·m/m)	T_2 (kN)	$FS_{bond,2}$
f = 1,3 (açılış)	3,124	—	—	121,4	352,0	2,14
FS_p = 1,5 (pasif / 1,5)	3,273	—	—	153,3	386,6	**1,95**
Verilen D = 3,5 m	3,500	0,893	1,63	161,6	395,1	**1,91**
Verilen D = 6,0 m	6,000	0,521	2,94	255,5	480,4	**1,57**

Pasife FS_p = 1,5 yolu daha derin duvar (3,27 m) ve **daha büyük moment** (153,3) verir. **Verilen derinlik gerekliden uzunsa moment ve ankraj kuvveti büyür**: D = 6,0 m için M = 255,5 kN·m/m (açılışın 2,1 katı) ve T_2 = 480 kN, $FS_{bond,2}$ = 1,57 < 2: bağ yetmez. Duvarı gerekenden uzun yapmak güvenlik getirmez.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Uç bloğu; serbest zemin mesnedi

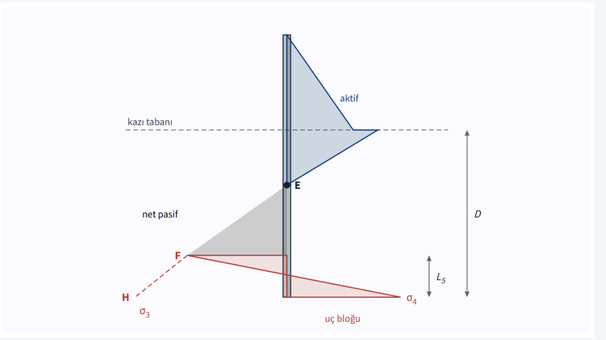
KURAM

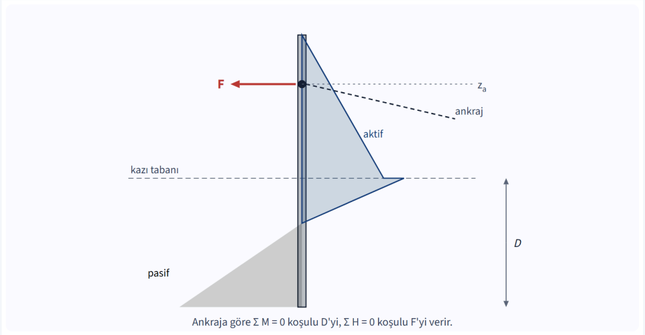
Konsol: kazı tabanı altında net doğru E'den F'ye, F'den uç bloğu (L_5) tersine dönen ordinat σ_4'e: $\Sigma H = 0$ ve uca göre $\Sigma M = 0$. Tek kumda L_4 için dördüncü derece denkleme iner; tabakalı profilde aynı diyagramda sayısal çözülür. Blok E'nin altında olmalıdır ($0 < L_5 < L_4$).

Tek sıra ankraj: uç serbest öteleniyor sayılır; derinlik **ankraja göre momentten**, ankraj kuvveti yatay dengeden bulunur:

$$\int_0^{L+D} p_{net}(z)(z - z_a)\,dz = 0 \qquad F = \int_0^{L+D} p_{net}(z)\,dz$$

Serbest zemin mesnedi **en kısa duvarı ve klasik yöntemlerin en büyük momentini** verir; Rowe'nin esnek duvar için moment azaltması uygulanmaz.





Ankraja göre Σ M = 0 koşulu D'yi, Σ H = 0 koşulu F'yi verir.

Mafsal yöntemi; kesme ve moment

KURAM

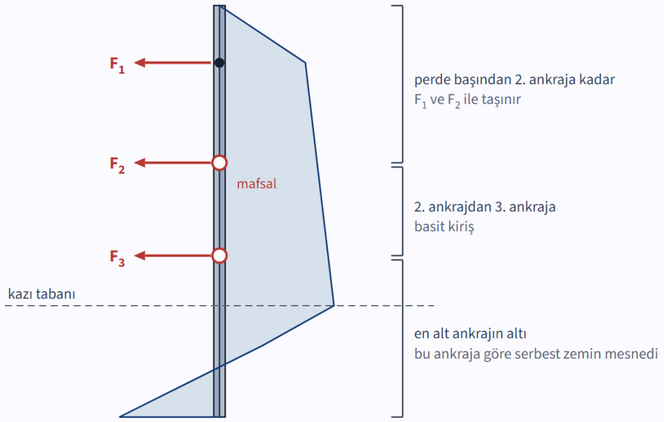
Duvar üç ya da daha fazla mesnette sürekli kiriştir, hiperstatiktir. **Mafsal yöntemi** en üst hariç her ankrajda mafsal (sıfır moment) koyarak belirli yapar: üst açıklık ilk iki ankraj üzerinde kiriştir, aradakiler basit kiriştir, en alt ankrajın altı o ankraja göre serbest zemin mesnedidir.

$$\int_{z_n}^{L+D} p_{net}(z)(z - z_n)\, dz = 0$$

Bir sıranın kuvveti iki yanındaki açıklıkların reaksiyonları toplamıdır; en alt sıra altındaki parçanın yatay kuvvetini de alır. Her mafsalda moment sıfırdır (modül kapanış olarak kontrol eder); basınçta kalan sıra uyarıyla anılır.

$$V(z) = \int_0^z p_{net} dz - \sum_{z_a < z} F_i \qquad M(z) = \int_0^z V\, dz$$

V ve M parçalar üzerinde integrallenir; **en büyük moment V = 0 olan yerde** (parça içinde) bulunur, düğümlerden seçilmez.



Soru

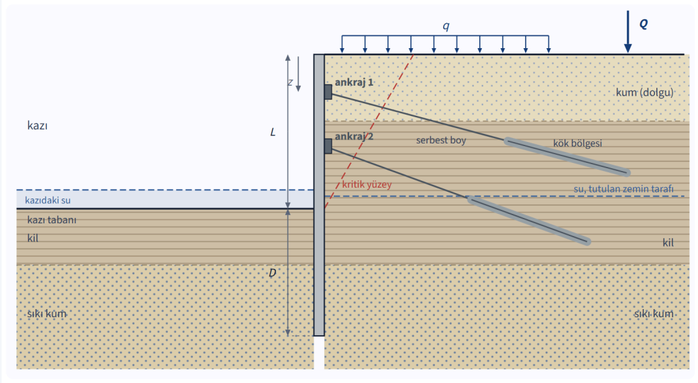
SORU

Verilenler

Profil ve yükler	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30^\circ$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24^\circ$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36^\circ$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa**
Sistemler	**(a) ankrajsız konsol; (b) tek sıra ($z = 1{,}5$ m, 15°); (c) iki sıra (açılış); hepsinde $f = 1{,}3$, S275 $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**

İSTENEN

Her sistemin **D_{teorik}**, **$D_{gerekli}$**, **M_{max}**, ankraj kuvveti ve palplanş **η**; hangisi uygun?



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Aynı profil, üç sistem (modülün motoru; hepsinde iki senaryodan büyüğü)

Sistem	Yöntem	D_{teorik} (m)	$D_{gerekli}$ (m)	M_{max} (kN·m/m)	Ankraj (kN/m)	η (EN 1993)
(a) Konsol	uç bloğu	8,033	10,443	1 210,1	—	**4,243**
(b) Tek sıra	serbest zemin mesnedi	2,896	3,765	295,9	128,2	**1,037**
(c) İki sıra	mafsal	2,403	3,124	121,4	41,7 ; 132,3	0,426

7,5 m'lik tutulan yükseklik için **konsol** 10,4 m gömme ve 1 210 kN·m/m ister: palplanş yetmez (η = 4,24). **Tek sıra** gömmeyi 3,76 m'ye indirir ama M = 296 kN·m/m ile η = 1,037 > 1 kalır. **İki sıra** momenti 121,4 kN·m/m'ye düşürür ve palplanş yeterlidir (η = 0,426): sıra sayısı moment ve gömmeyi belirler.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

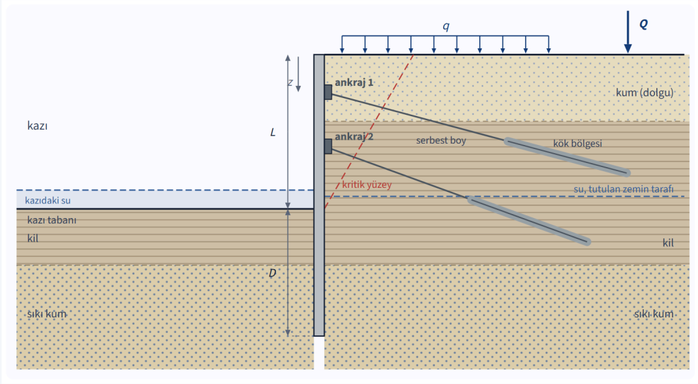
SORU

Verilenler

Duvar	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa; iki sıra ankraj: $z = 1{,}5$ m ($15°$) ve $4{,}5$ m ($20°$), $s = 2{,}5$ m; $f = 1{,}3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Sonuç türü	**uzun dönem senaryosu (belirleyici); mafsal $z = 4{,}5$ m'de**

İSTENEN

Ankraj kuvvetleri **F_1**, **F_2** ve toplamları; kapanış; **M_{max}** ve yeri; V = 0 noktaları.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Ankraj sıraları (metre başına) ve yatay denge

$$F_1 = 41{,}69\ \text{kN/m}\ \ (z = 1{,}5\ \text{m}) \qquad F_2 = 132{,}32\ \text{kN/m}\ \ (z = 4{,}5\ \text{m})$$

$$F_1 + F_2 = 41{,}69 + 132{,}32 = 174{,}00\ \text{kN/m} = \Sigma H_{net}\ \ (\text{toplam yatay kuvvet})$$

2 Mafsalda moment sıfır; en büyük moment V = 0 olan yerde

$$M(z = 4{,}5) = 0 \approx 0\ \checkmark\ \ (\text{kapanış})$$

$$V = 0:\ \ z = 3{,}22\ \text{m}\ \ \text{ve}\ \ z_M = 6{,}82\ \text{m} \qquad M_{max} = \mathbf{121{,}43}\ \text{kN·m/m}$$

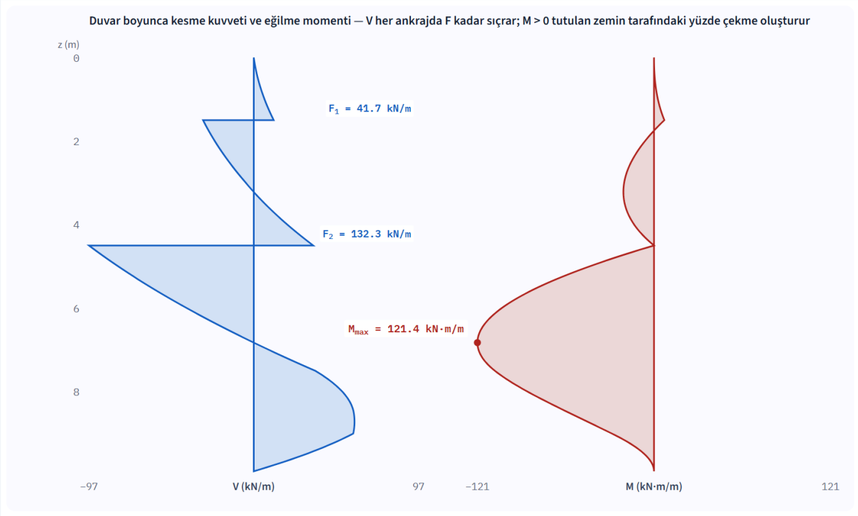
Ankraj kuvvetleri **F_1 = 41,69** ve **F_2 = 132,32 kN/m**; ikisinin toplamı net diyagramın yatay bileşkesidir (uç serbest). **M_{max} = 121,43 kN·m/m**, kazı tabanının altında z = 6,82 m'de (V = 0).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Kesme kuvveti ve moment diyagramı (V her ankrajda F kadar sıçrar)
$V(z) = \int p_{net} dz - \Sigma F_i$; $M(z) = \int V\, dz$. En büyük moment 121,4 kN·m/m ve 6,82 m derinlikte; iki V = 0 noktası (3,22 m ve 6,82 m) yerel moment tepeleridir.

Kapanış kontrolleri sağlanır: mafsal momenti ≈ 0, uç kesme ve momenti sıfır, parça bileşkesi ince integralle aynı (174,0 kN/m). Moment diyagramı üst konsol kısmında yerel, kazı tabanı altında en büyük tepeyi verir.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Kuvvet, serbest boy, bağ ve kilitleme yükü

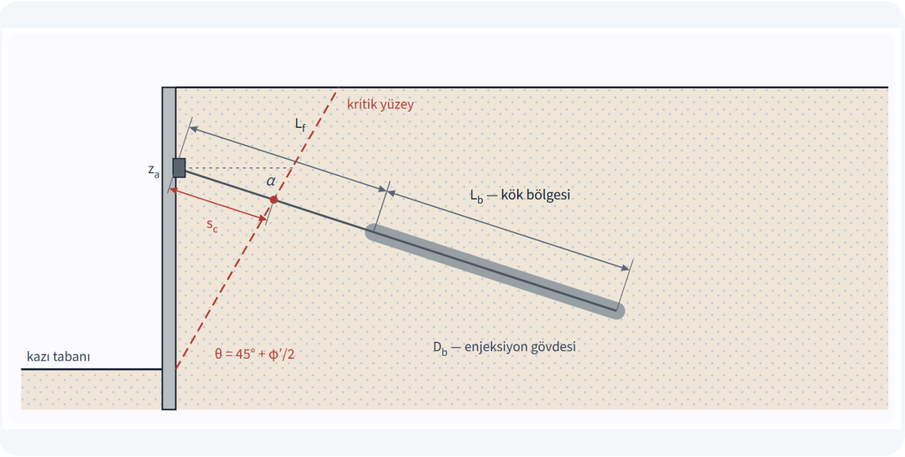
KURAM

Bir sıranın reaksiyonu F metre başınadır. Ankrajlar s aralıklı ve yataydan α eğimlidir:

$$T = \frac{F\,s}{\cos\alpha} \qquad T_v = T\sin\alpha$$

Enjeksiyon (bağ) bölgesi, duvarla birlikte hareket eden kamanın **arkasında** kalmalıdır. Kritik yüzey kazı köşesinden başlar ve θ = 45° + φ′/2 ile yükselir; tendon boyunca şurada kesilir:

$$s_c = \frac{L - z_a}{\cos\alpha\tan\theta + \sin\alpha} \qquad L_f \geq s_c + \max(1{,}5\ \text{m},\ L/5)$$



Yüzey, tek kum tüm tutulan yüksekliği oluşturuyorsa otomatik; tabakalı ya da killi profilde tek düzlem sağlam bir kurgu değildir: yüzey ayrı bir analizden girilir, yoksa kontrol “yapılmadı” bildirilir.

Bağ: $T_{ult} = \pi D_b L_b \tau_{ult}$; $FS_{bond} = T_{ult}/\max(T, P_0) \geq FS_{gerekli}$. Ankraj P_0 ile kilitlenir ve bağ başından beri o yükü taşır: talep T ile P_0'ın büyüğüdür. $P_0/T_{ult} \leq 1$ girdi sağlaması olarak ayrıca bakılır.

Soru

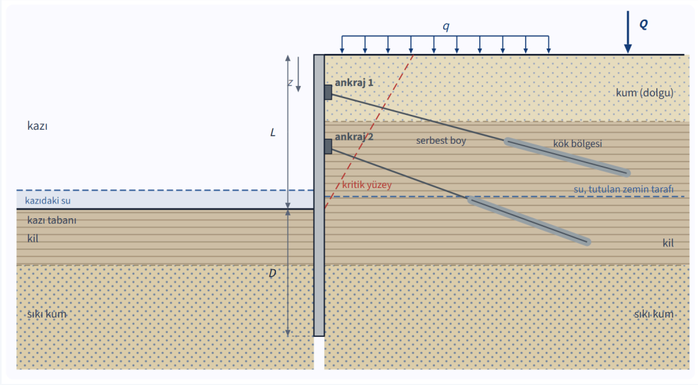
SORU

Verilenler

Ankrajlar	**sıra 1:** $z = 1{,}5$ **m,** $s = 2{,}5$ **m,** $\alpha = 15^\circ$**,** $F_1 = 41{,}69$ **kN/m; sıra 2:** $z = 4{,}5$ **m,** $\alpha = 20^\circ$**,** $F_2 = 132{,}32$ **kN/m**
Bağ	$D_b = 0{,}20$ **m,** $L_b = 8$ **m,** $\tau_{ult} = 150$ **kPa; kilitleme** $P_0 = 250$ **kN;** $FS_{bond,gerekli} = 2{,}0$

İSTENEN

Her ankrajın **T**, T_V; **T_{ult}**, **FS_{bond}** ve P_0/T_{ult}.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Ankraj kuvvetleri (her biri tendon ekseni boyunca)

$$T_1 = \frac{F_1 s}{\cos 15^\circ} = \frac{41{,}69(2{,}5)}{0{,}9659} = \mathbf{107{,}9}\ \text{kN}$$

$$T_2 = \frac{F_2 s}{\cos 20^\circ} = \frac{132{,}32(2{,}5)}{0{,}9397} = \mathbf{352{,}0}\ \text{kN}$$

Ankraj kuvvetleri tendon ekseni boyuncadır; düşey bileşenler $T_{v,1}$ = 27,9 ve $T_{v,2}$ = 120,4 kN rapor edilir (palplanş doğrulamasına taşınmaz).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Bağ: $T_{ult} = \pi D_b L_b \tau_{ult} = \pi(0{,}20)(8)(150) = 754{,}0$ kN

$$FS_{bond,1} = \frac{T_{ult}}{\max(T_1, P_0)} = \frac{754{,}0}{\max(107{,}9, 250)} = \mathbf{3{,}016} \geq 2 \checkmark$$

$$FS_{bond,2} = \frac{754{,}0}{\max(352{,}0, 250)} = \mathbf{2{,}142} \geq 2 \checkmark$$

Birinci ankrajda bağ **kilitleme yüküyle** ($P_0 > T_1$), ikincide **servis kuvvetiyle** belirlenir (FS 3,02 ve 2,14); $P_0/T_{ult} = 0{,}332 \leq 1$.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

EN 1993-1-1 ya da AISC 360-22

KURAM

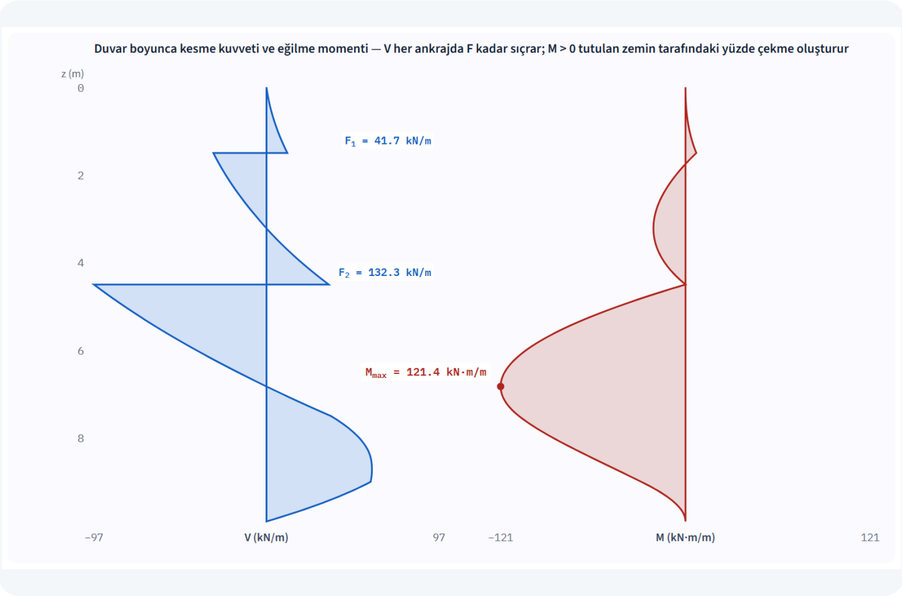
Çelik kesit, tasarımın en büyük momentiyle eğilmede doğrulanır. Duvarın metre başına mukavemet momenti W (palplanş tablosundan; elastik ya da plastik, sınıfa göre) kullanılır; gereken W_{req} hep yazılır ki kesit katalogdan seçilebilsin:

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \le M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y}$$

$$\text{LRFD: } \gamma_H M_{max} \le \phi_b M_n \ (\phi_b = 0{,}90) \qquad \text{ASD: } M_{max} \le \frac{M_n}{\Omega_b} \ (\Omega_b = 1{,}67)$$

EN 1993-1-1: γ_F = 1,35, γ_{M0} = 1,00. AISC: γ_H = 1,6 (yanal toprak basıncı H), M_n = $F_y Z$ (kompakt) ya da $F_y S$ (ilk akma).

Duvarın kesmesi, elemanlarının yerel burkulması ve korozyon kaybı doğrulamanın dışındadır ve raporda belirtilir. Ankraj kuvvetleri ve moment, tasarım ve verilen derinlik durumlarının büyüğüne göre alınır.



Soru

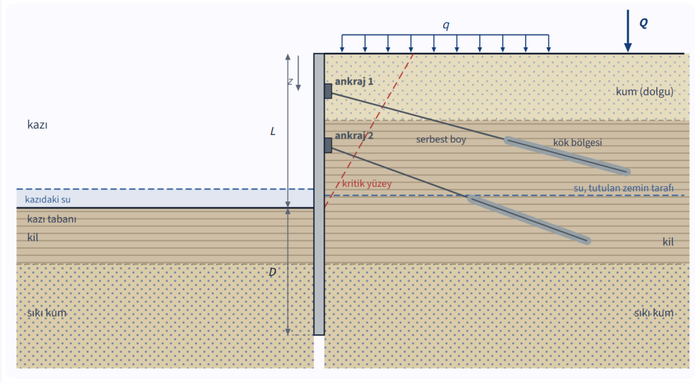
SORU

Verilenler

Moment	**Örnek 5:** $M_{max} = 121{,}43$ **kN·m/m**
Kesit	**S275 (**$f_y = 275$ **MPa),** $W_{el} = 1\,400$ **cm³/m; EN:** $\gamma_F = 1{,}35$, $\gamma_{M0} = 1{,}0$; **AISC:** $\gamma_H = 1{,}6$, $\Omega_b = 1{,}67$ $(M_n = F_y S)$

İSTENEN

M_{Ed}, **W_{req}**, $M_{c,Rd}$, **η** (EN); LRFD ve ASD için η.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 EN 1993-1-1

$$M_{Ed} = 1{,}35(121{,}43) = \mathbf{163{,}92}\ \mathrm{kN\cdot m/m} \qquad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} = \frac{163{,}92}{275\,000} = \mathbf{596}\ \mathrm{cm^3/m}$$

$$M_{c,Rd} = 1\,400 \cdot 10^{-6}(275\,000) = 385{,}0\ \mathrm{kN\cdot m/m} \qquad \eta = \frac{163{,}92}{385{,}0} = \mathbf{0{,}426} \le 1\ \checkmark$$

2 AISC 360-22 ($M_n = F_yS$ = 385,0 kN·m/m)

$$\text{LRFD: } 1{,}6(121{,}43) = 194{,}28 \le 0{,}90(385{,}0) = 346{,}5 \quad \eta = \mathbf{0{,}561}$$

$$\text{ASD: } 121{,}43 \le \frac{385{,}0}{1{,}67} = 230{,}5 \quad \eta = \mathbf{0{,}527}$$

Palplanş yeterlidir: EN 1993-1-1 η = **0,426** (gereken W = 596 cm³/m < 1 400), AISC LRFD **0,561**, ASD **0,527**.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Katmanlı yarı-statik: kumda Mononobe–Okabe, kilde drenajsız kama

KURAM

Her statik katsayı, kendi tabakasının yarı-statik karşılığıyla değişir. Sismik açı yatay ve düşey katsayılardan gelir:

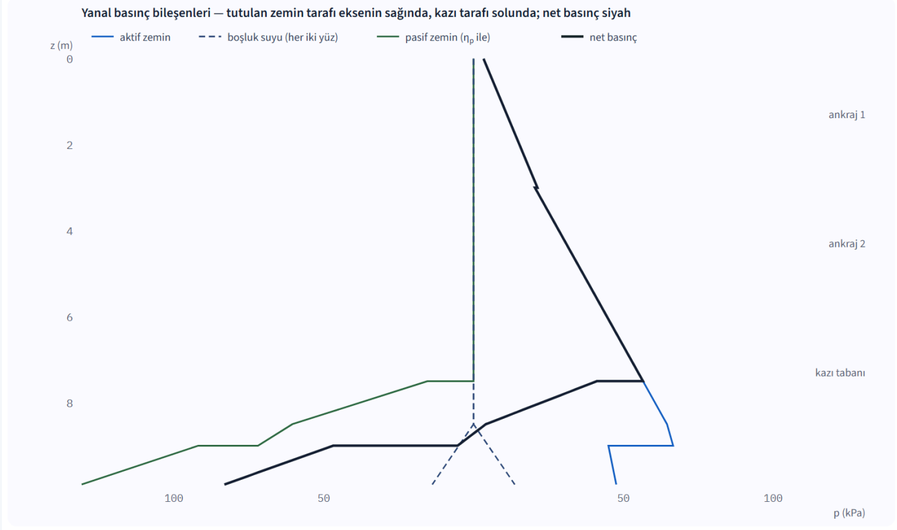
$$\tan\theta = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \qquad \sigma_{AE} = (1 \mp k_v) K_{AE} \sigma'_v \qquad \sigma_{PE} = (1 \mp k_v) K_{PE} \sigma'_v$$

kil: $\sigma_{AE} = (1 \mp k_v)(1 + \tan\theta)\sigma_v - 2c_u \qquad \sigma_{PE} = (1 \mp k_v)(1 - \tan\theta)\sigma_v + 2c_u$

Statik tasarımın **iki senaryosu** da, her biri k_v'nin iki yönüyle çalıştırılır; en büyük gömme, moment ve ankraj kuvvetleri belirler.

Ankrajlı duvar uçtan dönemez: aktif itkinin dinamik artışı **tutulan yükseklik boyunca üniform** yayılır: $\Delta P_{AE} = \int (p_{AE} - p_A) dz$. Kazıda serbest su Westergaard basıncı ($7/8\ k_h \gamma_w \sqrt{(hz')}$) ekler.

Deprem kazaya bağlıdır: pasif zemine **katsayı konmaz**; sismik diyagramı dengeleyen D_E, duvarınkini ($D_{tasarım}$) aşmamalıdır. Duvar D_E'den uzunsa her durum verilen derinlikte de dengelenir, büyük moment ve kuvvet alınır. Ankraj ve bağ T_E için de kontrol edilir ($FS_{gerekli,E} \approx 1{,}5$).



Soru

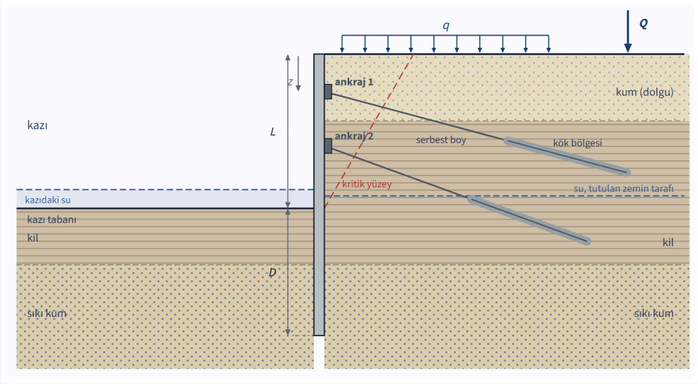
SORU

Verilenler

Duvar	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa; iki sıra ankraj: $z = 1{,}5$ m ($15°$) ve $4{,}5$ m ($20°$), $s = 2{,}5$ m; $f = 1{,}3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Deprem	**$k_h = 0{,}15$, $k_v = \pm 0{,}075$; boşluk suyu kısıtlı; bağ: $T_{ult} = 754$ kN, gerekli $FS_{bond,E} \approx 1{,}5$**

İSTENEN

Dört durumun (iki senaryo × iki k_V) D, M, F değerleri; **D_E**, **$M_{max,E}$**, ankraj kuvvetleri ve bağ; duvar bu depreme dayanır mı?



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Dört durum (statik tasarımın iki senaryosu, k_V iki yön)

Senaryo	k_V	D (m)	M (kN·m/m)	F (kN/m)	F_1 ; F_2
Kısa	+0,075	2,900	87,4	132,3	51,2 ; 81,0
Kısa	−0,075	3,110	134,9	205,0	82,4 ; 122,6
Uzun	+0,075	4,348	277,0	288,5	66,1 ; 222,4
Uzun	−0,075	3,958	277,2	315,8	81,5 ; 234,3

Belirleyici gömme **D_E = 4,35 m** (uzun dönem, k_V = +0,075); en büyük moment **277,2 kN·m/m** (uzun dönem, k_V = −0,075). ΔP_{AE} = 48,9 kN/m.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Kontroller

$$D_E = 4{,}35\ \text{m} \;>\; D_{tasarım} = 3{,}12\ \text{m} \quad \text{✗} \qquad \eta_E = \frac{M_{Ed,E}}{M_{c,Rd}} = \frac{277{,}2}{385{,}0} = 0{,}720 \;\leq 1 \;\checkmark$$

$$T_{E,1} = 213{,}3\ \text{kN}: \quad FS_{bond,E} = \frac{753{,}98}{\max(213{,}3,\ 250)} = 3{,}02 \;\geq 1{,}50 \;\checkmark$$

$$T_{E,2} = 623{,}3\ \text{kN}: \quad FS_{bond,E} = \frac{753{,}98}{623{,}3} = \mathbf{1{,}21} \;< 1{,}50 \quad \text{✗}$$

Açılış duvarı bu depreme **dayanmaz**: sismik denge 4,35 m gömme ister (tasarım 3,12 m) ve ikinci ankrajın bağı yetmez ($FS_{bond,E}$ = 1,21 < 1,50, $T_{E,2}$ = 623 kN). Palplanş kesiti yeterlidir (η_E = 0,72): gömme boyu ve enjeksiyon bağı (boy ya da çap) büyütülmelidir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Kil tabanda kabarma bloğu; yaylı zeminde kiriş

KURAM

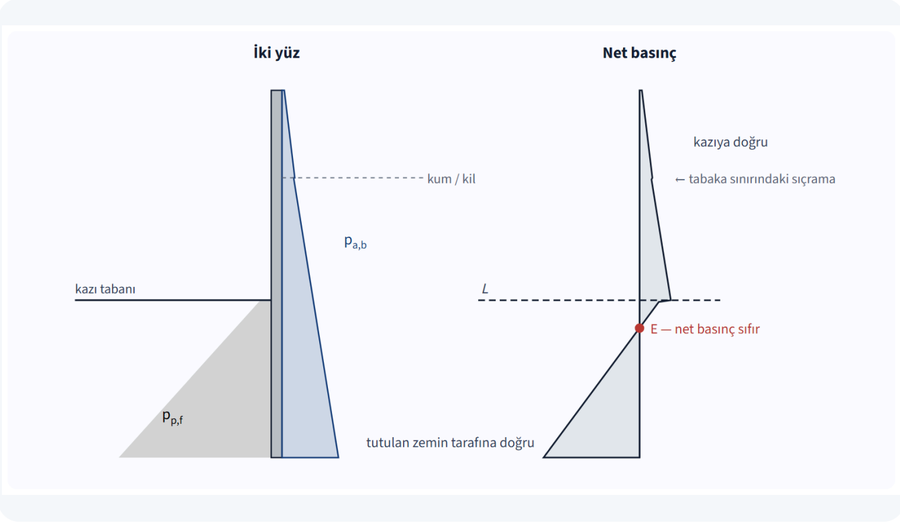
Taban kabarması: kazı tabanı yumuşak kilse, tutulan zeminin ağırlığı kili kazıya doğru sıkıştırabilir. Kil modülündeki gibi, duvar ayağında bir taşıma gücü bloğuyla kontrol edilir (B′ = B/√2 ya da sert tabakaya T, küçük olan; B″ = √2 B′):

$$FS = \frac{5{,}14\, c_u \left(1 + 0{,}2\frac{B''}{L_{exc}}\right) + \frac{c_{side} H}{B'}}{\sigma_v(H) + q}$$

Şerit ve tekil yükler B′ içinde eşdeğer sürşarja çevrilir; tabandaki zemin kil değilse kontrol uygulanmaz. **Yerdeğiştirme**: duvar elastik kiriş (EI), her yüzde elasto-plastik yaylar (yatak katsayısı k_h); her ankraj ön gerilmeli bir yay ($k = E\,A_t\cos^2\alpha/(L_f s)$, $P_0\cos\alpha/s$ ile başlar), yalnız çekme taşır:

Yaylar sükunet basıncından başlar (drenajlı tabakada $K_0\sigma'_v$, drenajsız kilde σ'_v) ve sınırı geçmez. k_h bir model parametresidir; sonuç **karakteristik ve gösterge niteliğindedir**, sınırsız verilir; yaylar yumuşakken k_h'ye güçlü, sınırlara ulaşınca çok az bağlıdır.

Yerdeğiştirme modelinin momenti, limit denge momentine yakın çıkabilir ama tasarım momenti hep limit dengedir.



Soru

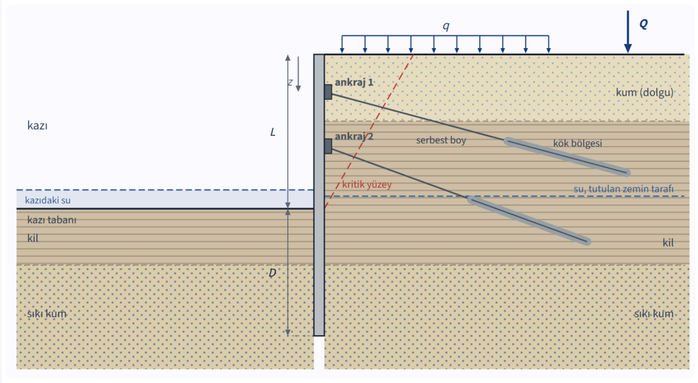
SORU

Verilenler

Duvar	**üstte 3,0 m kum ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30^\circ$), 6,0 m kil ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24^\circ$, $c_u = 45$ kPa), altında sıkı kum ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36^\circ$); $L = 7{,}5$ m; su iki yüzde 8,5 m'de; $q = 10$ kPa; iki sıra ankraj: $z = 1{,}5$ m (15°) ve $4{,}5$ m (20°), $s = 2{,}5$ m; $f = 1{,}3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Kazı ve duvar	**kazı genişliği $B = 10$ m (uzun, sert tabaka yok); tabanın altı kil ($c_u = 45$ kPa); $EI = 44\,100$ kN·m²/m; $k_h = 20/15/40$ MN/m³ (kum/kil/kum); $P_0 = 250$ kN**

İSTENEN

FS_{heave} (≥ 1,5?); duvar tepesi, kazı tabanı ve ucun **yerdeğiştirmesi**; yerdeğiştirme modelinin en büyük momenti.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Taban kabarması (B′ = B/√2 = 7,07 m; L_{exc} girilmedi: şekil terimi yok)

$$c_{side} = \frac{45(4{,}5)}{7{,}5} = 27{,}0\ \text{kPa}\ \ (\text{kum sıfır}) \qquad \sigma_v(H) = 18(3) + 19(4{,}5) = 139{,}5\ \text{kPa}$$

$$FS = \frac{5{,}14(45) + 27{,}0(7{,}5)/7{,}07}{139{,}5 + 10} = \frac{231{,}3 + 28{,}6}{149{,}5} = \mathbf{1{,}739}\ \geq 1{,}5\ \checkmark$$

2 Yerdeğiştirme (yatak katsayısı yöntemi; ön gerilmeli ankrajlar)

$$y_{tepe} = -2{,}6\ \text{mm}\ \ (\text{geri, tutulan tarafa}) \qquad y_{kazı\ tabanı} = 11{,}2\ \text{mm} \qquad y_{üç} = -0{,}5\ \text{mm}$$

$$M_{max}^{model} = 108{,}6\ \text{kN·m/m}\ \ (z = 6{,}86\ \text{m}) \qquad M_{max}^{limit\ denge} = 121{,}4$$

Taban kabarması güvenliği **1,74** (≥ 1,5). Duvar tepesi, ön gerilmeli ankrajlar tarafından **2,6 mm geriye** çekilir; kazı tabanında **11,2 mm** kazıya doğru yer değiştirir (gösterge niteliğinde, sınırla kıyaslanmaz). Modelin momenti (108,6) limit denge momentine (121,4) yakındır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Modülün kabulleri ve yapmadıkları

KURAM

Beyan edilen kabuller: duvar sürtünmesi yok (δ = 0); serbest boyun payı tendon boyunca ölçülür; tekil yük en yüklü kesitte alınır; sismik katsayılar tabaka tabaka. **İki şekilde gösterilenler**: kısa ve uzun dönem (ikisi de çalışır), çatlak su dolu ya da kuru (öteki yazılır), pay derinlikte ya da pasifte (öteki yazılır).

Durduranlar: duvarın dışında bir ankraj; senaryosunun gerektirdiği dayanımdan yoksun tabaka; kabul edilebilir gömme bulunamaması; her senaryoda ankrajların basınçta kalması; kapanışın bozulması; bağ bölgesinin kritik kama içinde olması.

Kapsam dışı: Rowe moment azaltması (esnek duvar), derin stabilite ve genel stabilite (her ankrajlı çalıştırmada “kontrol edilmedi” denir), sızıntı (farklı su seviyeleri hidrostatiktir), eğimli tutulan yüzey, çizgisel yük ve yapım aşamaları.

Hesap **limit denge, ön tasarımdır**; ekran ne yapılacağını önerebilir, rapor yalnız neyin varsayıldığını ve bulunduğunu söyler.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Gerilme: iki yüzde σ_v, u, σ'_v; drenajlı tabaka Rankine $c'–\varphi'$ (tabaka sınırında **basınç sıçrar**), drenajsız kil $\sigma_v \mp 2c_u$; yüzeyde **su dolu çekme çatlağı** (örnekte z_c = 4,37 m)

Kısa ve uzun dönem ikisi de çalışır; gömme, ankraj kuvvetleri ve moment **iki senaryonun büyüğü** (örnekte hepsinde uzun dönem)

Net basınç = tutulan – kazı yüzü; E noktası; pay: $D = f \cdot D_{teorik}$ (2,403 → 3,124 m) ya da pasife FS_p; verilen derinlikte **moment ve ankraj kuvveti büyür** (D = 6 m: M = 255 kN·m/m)

Sistem: konsol (D = 10,4 m, η = 4,2), tek sıra serbest zemin mesnedi (M = 296, η = 1,04), iki sıra mafsal yöntemi (F_1 = 41,7, F_2 = 132,3 kN/m; M = 121,4; η = 0,43)

Ankraj: T = Fs/cos α (107,9 ve 352,0 kN); bağ $FS = T_{ult}/\max(T, P_0)$ = 3,02 ve 2,14; **sismik**: D_E = 4,35 > 3,12 m ve $FS_{bond,E}$ = 1,21 < 1,5: açılış duvarı depreme dayanmaz

Kesit: EN 1993-1-1 η = 0,426; AISC LRFD 0,561, ASD 0,527. **Taban kabarması** FS = 1,74; **yerdeğiştirme** tepe –2,6 mm, kazı tabanı 11,2 mm (gösterge)

Kaynaklar

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

Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressure during earthquakes. World Engineering Congress, Tokyo. Okabe, S. (1926). General theory of earth pressure. Journal of the Japan Society of Civil Engineering, 12(1).

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98, 418–433.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Brent, R.P. (1973). Algorithms for Minimization without Derivatives. Prentice-Hall.

EN 1993-1-1:2005 — Çelik yapıların tasarımı, genel kurallar.

ANSI/AISC 360-22 — Specification for Structural Steel Buildings.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül sayfasındaki açılış modeli de bu duvardır (7,5 m kum–kil–kum, su 8,5 m, q = 10 kPa, iki sıra ankraj).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın tabakalı profilini (kum ve kil), suyunu, sürşarjını, ankraj sıralarını ve elemanlarını GeoTerva'da girin; modül iki yüzün basınçlarını, kısa ve uzun dönemi, gömmeyi, ankraj kuvvetlerini, momenti, kesit, bağ, deprem, taban kabarması ve yerdeğiştirme kontrollerini birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com