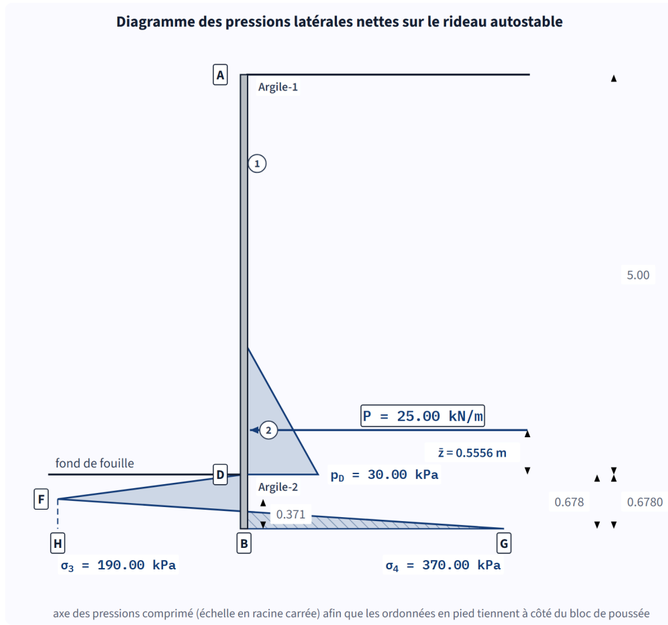
Présentation de cours de géotechnique · Rideaux de palplanches et fouilles étayées

Rideau de palplanches autostable dans l'argile

Cours : conception d'un rideau de palplanches autostable dans l'argile (pression nette non drainée, fiche, moment, section, séisme, soulèvement du fond de fouille) ; un exemple de calcul pour chaque thème.

- Rideau de palplanches autostable
- Argile non drainée (φ = 0)
- Fiche · moment maximal
- Soulèvement du fond de fouille
- Séisme · déplacement



Basé sur la page de théorie de GeoTerva · geoterva.com

Que verrons-nous dans ce cours ?

Pourquoi un rideau de palplanches autostable dans l'argile est calculé par une analyse **non drainée en contraintes totales ($\varphi = 0$)** ; $K_a = K_p = 1$

Poussée active de l'argile retenue **$\sigma_v - 2c_u$**, **fissure de traction z_c** et résultante P_1 au-dessus du fond de fouille

Dans l'argile, sous le fond de fouille, **pression nette constante $\sigma_6 = 4c_u - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)$** et σ_7 en pied

Équation du second degré en D à partir de l'équilibre horizontal et de l'équilibre des moments ; z' et M_{max}

Fiche de calcul (f, K_p/FS_p, fiche imposée) ; effet d'une **fissure remplie d'eau** et d'un niveau d'eau différent

Vérification des palplanches (EN 1993-1-1, AISC 360-22), **séisme**, déplacement et vérification du **soulèvement du fond de fouille**

DÉROULÉ DU COURS

Chaque thème est traité en **trois étapes** :

1 · **Théorie** : quelle est la règle, pourquoi en est-il ainsi ?

2 · **Énoncé** : données et à déterminer

3 · **Solution** : étape par étape, avec les valeurs numériques

Mur d'exemple : au-dessus du fond de fouille, L = 5 m d'argile (γ = 18 kN/m³, c_u = 30 kPa), en dessous une argile plus raide (c_u = 70 kPa) ; pas d'eau, pas de surcharge. Dans la solution manuelle, la fissure de traction est sèche ; dans la valeur par défaut du module, elle est remplie d'eau. Les efforts sont donnés par mètre de mur.

Comment ça fonctionne, comment ça tourne ?

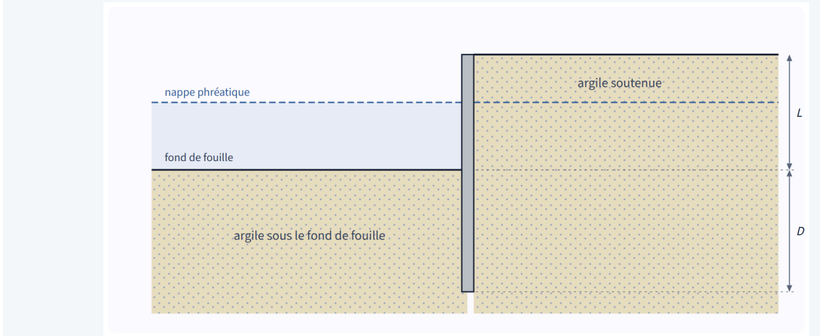
THÉORIE

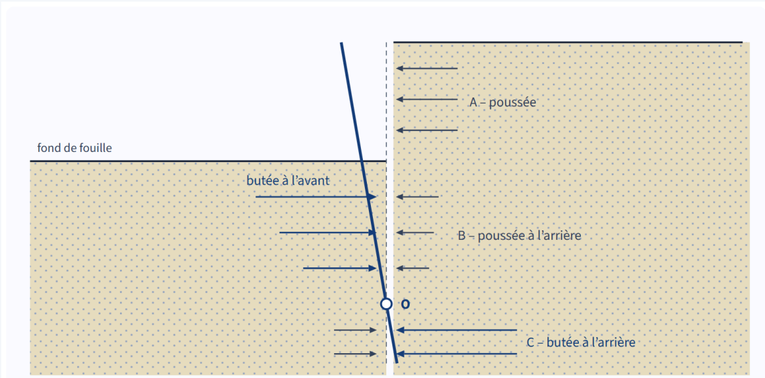
Le rideau de palplanches retient le sol au-dessus du fond de fouille (L) et tient grâce à la **fiche D**. Un rideau **autostable** n'a pas d'autre appui ; il n'est maintenu que par la butée du sol dans lequel il est fiché, c'est pourquoi il est économique jusqu'à environ 6 m au-dessus du fond de fouille.

Le rideau tourne comme un corps rigide autour du point O (près du pied) : **A** (au-dessus du fond de fouille) en poussée ; **B** (fond de fouille–O) en poussée à l'arrière, en butée à l'avant ; **C** (sous O) en butée à l'arrière, en poussée à l'avant.

La source remplace la répartition réelle (courbe) par **une idéalisation linéaire** : pression nette sous le fond de fouille et bloc de rotation à l'extrémité ; l'équilibre horizontal et l'équilibre des moments donnent la fiche.

Dans l'argile, un sol chargé rapidement ne peut pas drainer : le calcul est mené **en conditions non drainées, en contraintes totales** ($\varphi = 0$, c_u) ; les deux coefficients de Rankine valent 1. Le cas drainé à long terme (c', φ') n'est pas vérifié dans ce module.





$\sigma_v - 2c_u$, fissure de traction z_c, P_1

THÉORIE

L'argile retenue au-dessus du fond de fouille pousse avec sa poussée active non drainée : contrainte verticale totale moins $2c_u$ ($K_a = 1$ pour $\varphi = 0$) :

$$\sigma_a(z) = q + \gamma z - 2c_u \qquad z_c = \frac{2c_u - q}{\gamma}$$

$$P_1 = \tfrac{1}{2}\,\sigma_a(L)\,(L - z_c) \qquad \bar{z}_1 = \frac{L - z_c}{3}$$

Près de la surface, σ_a est négatif : l'argile tirerait sur l'écran. Une telle **succion n'est pas prise en compte** ; la pression est nulle jusqu'à la profondeur z_c (fissure de traction) et croît linéairement en dessous. Dans une argile unique, le diagramme est un triangle allant de z_c au fond de fouille ; P_1 agit à $\bar{z}_1$ au-dessus du fond de fouille.

La fissure peut être remplie d'eau (valeur par défaut du module) : la pression hydrostatique de l'eau le long de la fissure, $\frac{1}{2}\gamma_w z_c^2$, s'ajoute à P_1 ; si la fissure est considérée **sèche** (équations de la source), cette pression n'est pas ajoutée. Sous la nappe, l'eau remplit la fissure à un niveau constant.

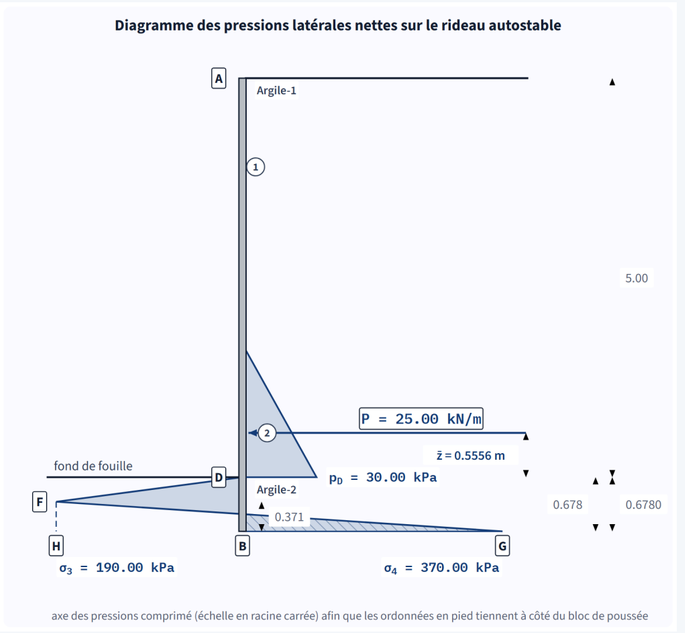


Diagramme des pressions nettes (mur de l'exemple initial avec fissure remplie d'eau).

Énoncé

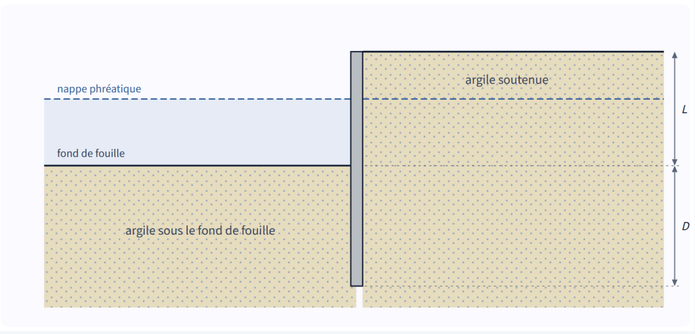
EXEMPLE

Données

Sol	**argile retenue : $\gamma = 18$ kN/m³, $c_u = 30$ kPa ; en dessous, argile raide $c_u = 70$ kPa**
Mur	**$L = 5$ m ; pas d'eau, pas de surcharge ; fissure de traction sèche (équations de la source)**

À DÉTERMINER

z_c, $\sigma_a(L)$, P_1 et son bras de levier $\bar{z}_1$ (à partir du fond de fouille).



Solution

SOLUTION

1 Profondeur de la fissure de traction et poussée active au fond de fouille

$$z_c = \frac{2c_u}{\gamma} = \frac{2(30)}{18} = \mathbf{3.333}\ \text{m}$$

$$\sigma_a(L) = \gamma L - 2c_u = 18(5) - 60 = \mathbf{30}\ \text{kPa}$$

2 Résultante du diagramme triangulaire et son bras de levier

$$P_1 = \tfrac{1}{2}\,\sigma_a(L)(L - z_c) = \tfrac{1}{2}(30)(1.667) = \mathbf{25.00}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z}_1 = \frac{L - z_c}{3} = \frac{1.667}{3} = \mathbf{0.5556}\ \text{m}\ \ (\text{au-dessus du fond de fouille})$$

Sur les premiers **3.33 m** de profondeur, l'argile n'exerce aucune poussée active (fissure) ; au fond de fouille, σ_a atteint 30 kPa. **P_1 = 25.0 kN/m**, à 0.556 m au-dessus du fond de fouille.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Pression nette constante σ_6 et σ_7 en pied

THÉORIE

Une argile chargée rapidement, comme par un mur, ne peut pas drainer : φ = 0, les coefficients valent 1 et les pressions latérales en surface sont égales à la contrainte totale verticale ∓ $2c_u$:

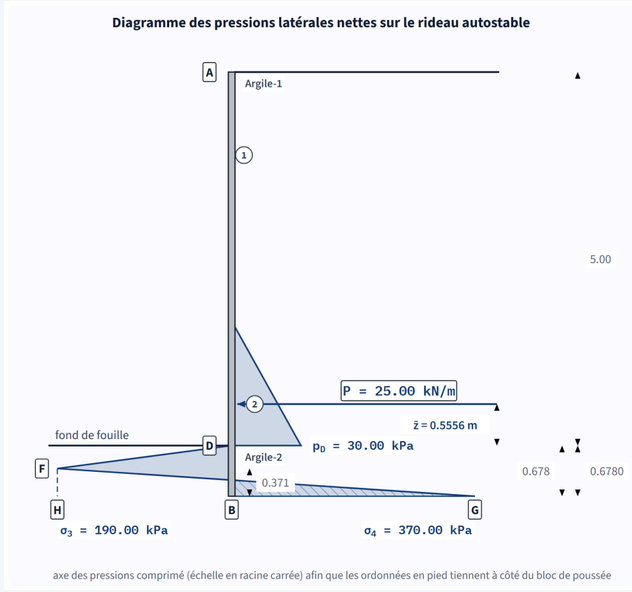
$$\sigma_a = \sigma_v - 2c_u \qquad \sigma_p = \sigma_v + 2c_u$$

Juste sous le fond de fouille, le côté retenu pousse avec la charge qu'il porte ($\gamma L_1 + \gamma' L_2$) − $2c_u$; la face côté fouille, qui ne porte encore aucune charge, résiste avec $2c_u$. Plus bas, les deux faces reçoivent la même charge et **la différence ne change pas** : la pression nette est constante et dirigée vers le terrain retenu. Dans la zone de rotation, les côtés s'échangent :

$$\sigma_6 = 4c_u - (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \qquad \sigma_7 = 4c_u + (\gamma L_1 + \gamma' L_2)$$

σ_6 doit être positif : une argile dont $4c_u$ ne dépasse pas la charge au niveau du fond de fouille ne peut pas retenir le mur, et le module arrête le calcul.

Le point de pression nulle E est le fond de fouille lui-même ; sous le fond de fouille, la pression nette est constante, égale à σ_6, et revient à σ_7 en pied par un bloc de hauteur L_4.



Énoncé

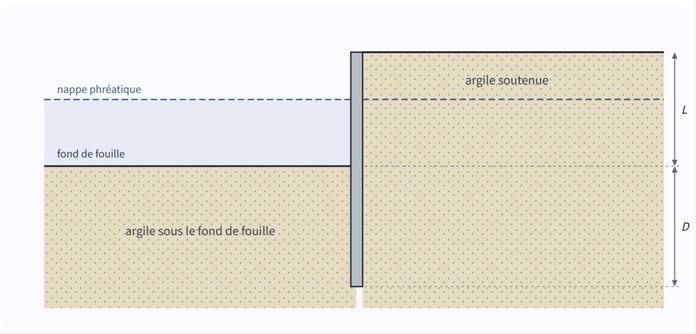
EXEMPLE

Données

Données	**Exemple 1 : $\gamma = 18$ kN/m³, $L = 5$ m (sans eau) : $\gamma L = 90$ kPa ; dans l'argile encastrée $c_u = 70$ kPa**

À DÉTERMINER

La pression nette constante **σ_6** sous le fond de fouille et **σ_7** en pied ; σ_6 est-elle positive ?



Solution

SOLUTION

1 Pression nette sous le fond de fouille (dirigée vers le côté retenu)

$$\sigma_6 = 4c_u - (\gamma L_1 + \gamma' L_2) = 4(70) - 90 = \mathbf{190}\ \mathrm{kPa}\ > 0\ \checkmark$$

2 Ordonnée de rotation à l'extrémité

$$\sigma_7 = 4c_u + (\gamma L_1 + \gamma' L_2) = 4(70) + 90 = \mathbf{370}\ \mathrm{kPa}$$

Pression nette σ_6 = **190 kPa**, positive : l'argile raide peut soutenir l'écran. À l'extrémité, la pression s'inverse en σ_7 = 370 kPa. Sous le fond de fouille, la même pression nette de **190 kPa** s'exerce à toute profondeur (diagramme constant).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

À partir de l'équilibre horizontal L_4, équation du second degré en D

THÉORIE

Au-dessus du fond de fouille, la résultante est P_1 (bras de levier $\bar{z}_1$) ; en dessous, σ_6 agit sur toute la fiche (D) et le bloc d'extrémité (hauteur L_4) ramène la pression à σ_7. L'équilibre horizontal donne L_4 :

$$P_1 - \sigma_6 D + \tfrac{1}{2} L_4(\sigma_6 + \sigma_7) = 0 \;\Rightarrow\; L_4 = \frac{\sigma_6 D - P_1}{4c_u}$$

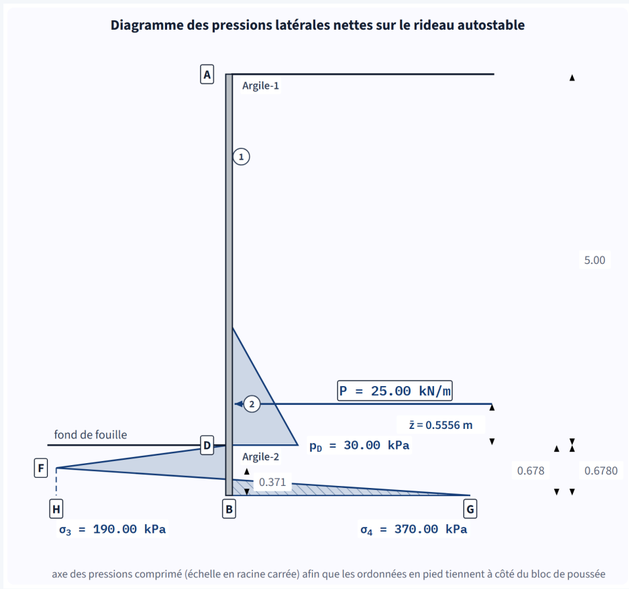
En introduisant L_4 dans l'équilibre des moments par rapport au pied, il reste pour D une équation du **second degré** :

$$P_1(D + \bar{z}_1) - \frac{\sigma_6 D^2}{2} + \frac{4c_u}{3} L_4^2 = 0$$

$$\sigma_6(\sigma_6 - 6c_u)D^2 + P_1(12c_u - 2\sigma_6)D + P_1(P_1 + 12c_u\bar{z}_1) = 0$$

$$z' = \frac{P_1}{\sigma_6} \qquad M_{max} = P_1(z' + \bar{z}_1) - \frac{\sigma_6 z'^2}{2}$$

L'effort tranchant est nul à la profondeur z′ (sous le fond de fouille) où la pression nette constante équilibre P_1 ; le moment y est maximal. $D_{théor}$ est la racine positive de cette équation ; la butée est entièrement mobilisée, sans réserve.



Énoncé

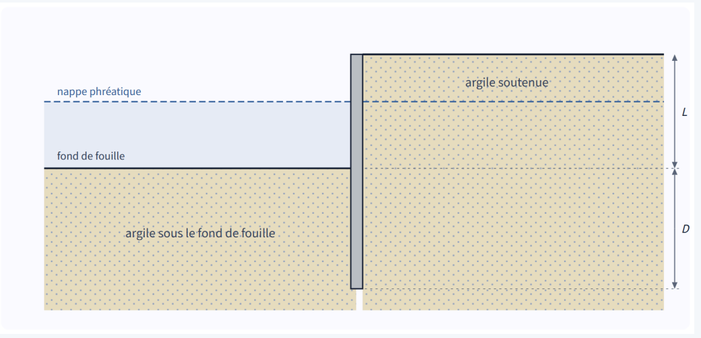
EXEMPLE

Données

Données	**Exemple 1–2 :** $P_1 = 25.00$ **kN/m,** $\bar{z}_1 = 0.5556$ **m ;** $\sigma_6 = 190$ **kPa,** $\sigma_7 = 370$ **kPa ;** $c_u = 70$ **kPa**

À DÉTERMINER

Coefficients de l'équation ; $\mathbf{D_{th}}$; hauteur du bloc de pied $\mathbf{L_4}$.



Solution

SOLUTION

1 Coefficients

$$a = \sigma_6(\sigma_6 - 6c_u) = 190(190 - 420) = -43{,}700$$
$$b = P_1(12c_u - 2\sigma_6) = 25(840 - 380) = 11{,}500$$
$$c = P_1(P_1 + 12c_u\bar{z}_1) = 25(25 + 840(0.5556)) = 12{,}291.7$$

2 Racine positive et bloc d'extrémité

$$-43{,}700D^2 + 11{,}500D + 12{,}291.7 = 0 \;\Rightarrow\; D_{theoretical} = \mathbf{0.678}\ \mathrm{m}$$
$$L_4 = \frac{\sigma_6 D - P_1}{4c_u} = \frac{190(0.678) - 25}{280} = \mathbf{0.3708}\ \mathrm{m}$$

La fiche théorique n'est que de **D = 0.678 m** : l'argile en fiche étant raide (c_u = 70 kPa) et la fissure sèche, très peu d'encastrement sous le fond de fouille suffit. Le bloc d'extrémité mesure 0.371 m.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

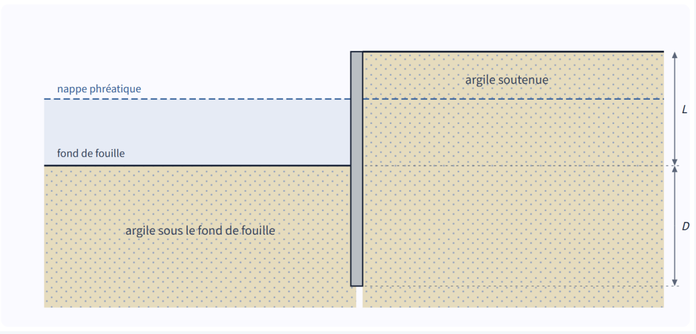
EXEMPLE

Données

Données	**Exemple 1–3 :** $P_1 = 25.00$ **kN/m,** $\bar{z}_1 = 0.5556$ **m,** $\sigma_6 = 190$ **kPa**

À DÉTERMINER

Le **z′** et le $\mathbf{M_{max}}$ pour lesquels l'effort tranchant est nul.



Solution

SOLUTION

1 Profondeur où le cisaillement est nul (depuis le fond de fouille)

$$z' = \frac{P_1}{\sigma_6} = \frac{25}{190} = \mathbf{0.1316}\ \mathrm{m}$$

2 Moment maximal

$$M_{max} = P_1(z' + \bar{z}_1) - \frac{\sigma_6 z'^2}{2} = 25(0.1316 + 0.5556) - 95(0.1316)^2 = \mathbf{15.53}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

M_{max} = 15.53 kN·m/m, à seulement 0.13 m sous le fond de fouille. La pression nette étant constante, l'effort tranchant décroît linéairement le long de z′ et le moment atteint son maximum très près du fond de fouille.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Moyens d'ajouter une marge de sécurité

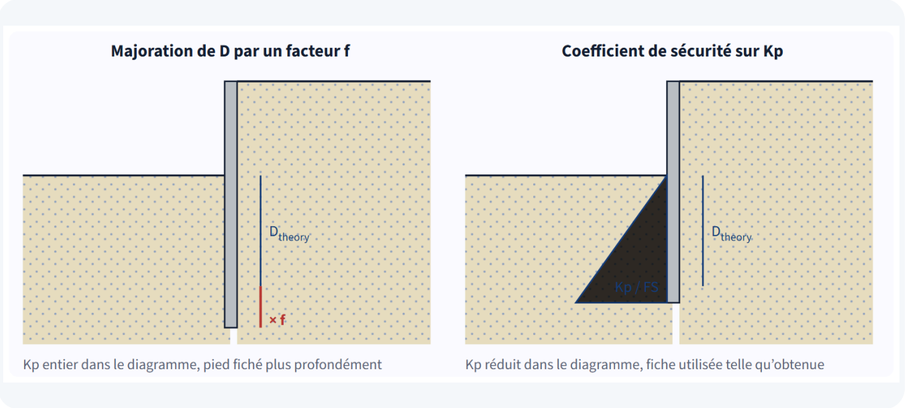
THÉORIE

Il n'y a pas de marge à la profondeur théorique. Deux approches (figure) :

Majoration de la fiche : $D_d = f \cdot D_{th}$; dans l'argile, on prend f = 1.4–1.6 (valeur par défaut du module : 1.5). Les pressions et le moment sont ceux du mur théorique.

Coefficient de sécurité sur la butée : le diagramme est construit dès le départ avec σ_p/FS_p ($\sigma_p = \sigma_v + 2c_u$) ; la profondeur obtenue est utilisée telle quelle et **le moment augmente**.

Fiche donnée : vérifiée par rapport à la fiche requise ($D_{don} \geq D_{d,req}$) ; avec $\sigma_p/FS_{p,mob}$, le diagramme est exactement équilibré à la fiche donnée. Les efforts internes sont étudiés pour les deux cas, le rideau de palplanches est choisi d'après **le plus grand moment** ; le moment à la fiche donnée peut être supérieur à celui de la fiche requise.



Énoncé

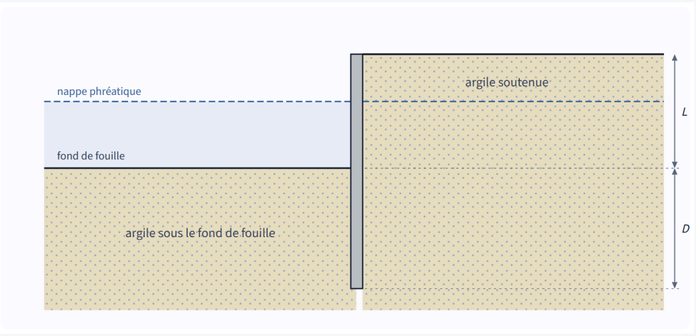
EXEMPLE

Données

Mur	**mur initial du module avec fissure de traction remplie d'eau (valeur par défaut) : $L = 5$ m, $c_u = 30/70$ kPa ; si la fissure est sèche, D = 0.678 m (Exemple 3)**
Routes	**$f = 1.5$; $FS_p = 1.5$; données $D = 5.0$ m ; palplanche S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m ($\gamma_F = 1.35$)**

À DÉTERMINER

D_d de chaque approche, longueur totale, **M_{max}** et taux d'utilisation **η** des palplanches.



Solution

SOLUTION

1 $D_d = f \cdot D_{th}$ (moment inchangé) ; dans la démarche K_p, le diagramme est reconstruit

Route	D_d (m)	L + D (m)	M_{max} (kN·m/m)	η (EN 1993)	Remarque
Fissure sèche, f = 1.5 (Exemple 3)	1.017	6.02	15.53	0.054	$D_{théorique}$ = 0.678 m
Fissure remplie d'eau, f = 1.5	3.433	8.43	181.91	0.638	$D_{théorique}$ = 2.288 m
Rempli d'eau, FS_p = 1.5	2.775	7.77	187.51	0.657	la profondeur et le moment augmentent
Rempli d'eau, avec D = 5.0 m	5.000	10.00	209.71	0.735	$FS_{p,mob}$ = 5.19

Une fissure remplie d'eau apporte une charge bien plus grande : P_1 25.0 → 79.5 kN/m, D_{th} 0.68 → 2.29 m, M_{max} 15.5 → 181.9 kN·m/m (Exemple 6). La fiche donnée D = 5.0 m est supérieure à la profondeur de calcul (3.43 m) et ne mobilise que 1/5.2 de la butée ; mais elle donne un **moment plus grand** (209.7 kN·m/m) que celui du cas de la fiche requise (181.9) : le rideau est choisi d'après le plus grand.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Eau dans la fissure de traction et niveaux d'eau différents

THÉORIE

Fissure remplie d'eau (valeur par défaut du module) : la pression hydrostatique le long de la fissure $P_w = ½\gamma_w z_c^2$ s'ajoute à la poussée active (son bras de levier se situe au tiers inférieur de la fissure) ; au total, $P_1 = P_w + ½\sigma_a(L)(L - z_c)$. Si la fissure est choisie **sèche**, on applique les équations de la source.

Même niveau d'eau des deux côtés : au-dessus du fond de fouille, les pressions hydrostatiques s'annulent ; sous la nappe, on utilise le poids volumique déjaugé γ′ de l'argile, et sans nappe le poids volumique naturel γ s'applique partout.

Niveaux différents (au-delà de la source) : la pression d'eau nette au-dessus du fond de fouille s'ajoute à la poussée active (sans écoulement). L'argile étant traitée en contraintes totales, la différence $\Delta q = q_r - q_e$ des contraintes verticales totales des deux faces remplace $(\gamma L_1 + \gamma' L_2)$; les niveaux d'eau à l'intérieur de l'argile n'interviennent pas dans le calcul non drainé.

$$u_{net}(z) = \gamma_w(z - D_w) - \gamma_w(z - D_{w,exc}) \quad (\text{chaque terme} \geq 0)$$

$$\sigma_6 = 4c_u - \Delta q \qquad \Delta q = q_r - q_e$$

$$P_1 = \tfrac{1}{2}\gamma_w z_c^2 + \tfrac{1}{2}\sigma_a(L)(L - z_c)$$

Énoncé

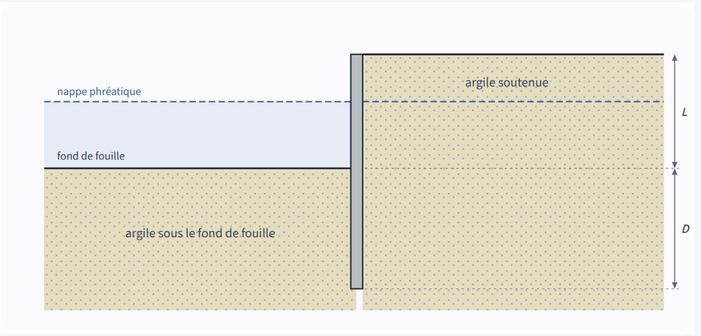
EXEMPLE

Données

Mur	**Mur des exemples 1–5 ($L = 5$ m, $\gamma = 18$, $c_u = 30/70$ kPa)**
Cas	**(a) fissure sèche ; (b) fissure remplie d'eau (par défaut) ; (c) eau à 2 m à l'arrière, à 6 m côté fouille (pression d'eau nette)**

À DÉTERMINER

Pour (b), $\mathbf{P_1}$ et $\bar{\mathbf{z}}_\mathbf{1}$ (à la main) ; valeurs de $\mathbf{D_{th}}$ et de $\mathbf{M_{max}}$ pour les trois cas.



Solution

SOLUTION

1 (b) La pression de l'eau dans la fissure est ajoutée (profondeur de la fissure z_c = 3.333 m)

$$P_w = \tfrac{1}{2}\gamma_w z_c^2 = \tfrac{1}{2}(9.81)(3.333)^2 = 54.50\ \text{kN/m} \quad (\text{bras } 5 - \tfrac{2}{3}z_c = 2.778\ \text{m})$$

$$P_1 = 54.50 + 25.00 = \mathbf{79.50}\ \text{kN/m} \qquad \bar{z}_1 = \frac{54.50(2.778) + 25.00(0.5556)}{79.50} = \mathbf{2.0790}\ \text{m}$$

2 Synthèse des trois cas (mêmes équations ; pour D et M, on résout l'équation du second degré)

État	P_1 (kN/m)	$\bar{z}_1$ (m)	σ_6 (kPa)	$D_{théorique}$ (m)	M_{max} (kN·m/m)
(a) Fissure sèche	25.00	0.556	190	0.678	15.53
(b) Fissure remplie d'eau	79.50	2.079	190	2.288	181.91
(c) Niveau d'eau différent	115.70	1.754	187	2.765	238.79

Une fissure remplie d'eau fait passer P_1 de 25.0 à **79.5 kN/m** : la fiche passe de 0.68 à **2.29 m**, le moment de 15.5 à **181.9 kN·m/m**. Un niveau d'eau différent (pression d'eau nette) donne P_1 = 115.7 kN/m, D = 2.77 m, M = 238.8 kN·m/m. Négliger l'eau dans la fissure de traction conduit à un résultat du côté défavorable à la sécurité.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

EN 1993-1-1 et AISC 360-22

THÉORIE

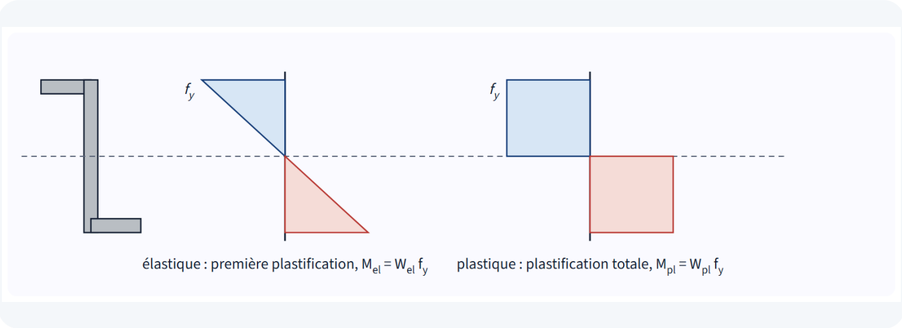
Voie classique : S = M_{max}/σ_{adm}. Le module effectue une vérification à l'état limite : le moment du diagramme de pression nette est une action caractéristique ; le coefficient partiel la porte à la valeur de calcul :

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \quad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} \quad M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \quad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Le tableau donne **W_{el}** (première plastification, jusqu'à la classe 3) et **W_{pl}** (plastification complète, classes 1–2). La part de la fiche n'est pas multipliée séparément par le code de l'acier.

$$\text{LRFD: } M_u = \gamma_H M_{max} \leq \phi_b M_n,\ \phi_b = 0.90 \qquad \text{ASD: } M_a = M_{max} \leq \frac{M_n}{\Omega_b},\ \Omega_b = 1.67$$

$M_n = F_y Z$ (section compacte) ou $F_y S$ à la première plastification ; la pression du sol est assimilée à la poussée latérale des terres H : γ_H = 1.6 en LRFD, 1.0 en ASD.



Énoncé

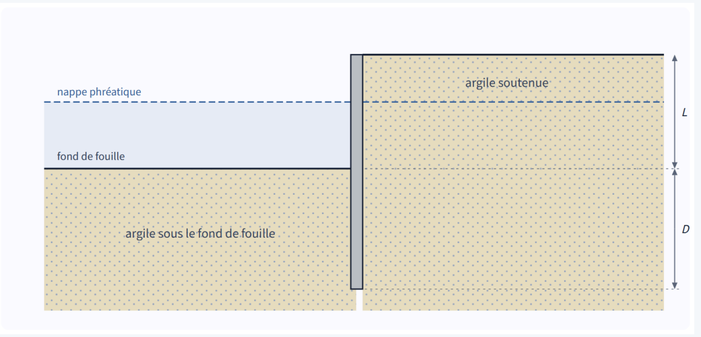
EXEMPLE

Données

Coupe	**S275 ($f_y = 275$ MPa) ; $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Moment	**Mur avec fissure remplie d'eau : $M_{max} = 181.91$ kN·m/m ; EN : $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = 1.00$; AISC : $\gamma_H = 1.6$, $\Omega_b = 1.67$ ($M_n = F_y S$)**

À DÉTERMINER

Pour EN 1993-1-1 : **M_{Ed}**, **W_{req}**, $M_{c,Rd}$, **η** ;
pour AISC LRFD et ASD : η.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 EN 1993-1-1

$$M_{Ed} = 1.35(181.91) = \mathbf{245.58}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

$$W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} = \frac{245.58(1.00)}{275\,000} = \mathbf{893.0}\ \mathrm{cm^3/m}$$

$$M_{c,Rd} = 1\,400 \cdot 10^{-6}(275\,000) = 385.00\ \mathrm{kN{\cdot}m/m} \qquad \eta = \frac{245.58}{385.00} = \mathbf{0.638}\ \leq 1\ \checkmark$$

Le profil de palplanches retenu est suffisant : η = **0.638** ; W requis = 893 cm³/m < 1 400 cm³/m.

Solution (2/2)

SOLUTION

1 AISC 360-22: $M_n = F_y S = 275\,000\,(1\,400 \cdot 10^{-6}) = 385.0$ kN·m/m

$$\text{LRFD: } M_u = 1.6(181.91) = 291.06\ \text{kN·m/m} \leq \phi_b M_n = 0.90(385.0) = 346.5 \quad \eta = \mathbf{0.840}$$

$$\text{ASD: } M_a = 181.91\ \text{kN·m/m} \leq \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{385.0}{1.67} = 230.5 \quad \eta = \mathbf{0.789}$$

Également satisfaisant selon l'AISC : LRFD η = **0.840**, ASD η = **0.789** ; selon l'EN 1993-1-1, 0.638. Les rapports diffèrent parce que les philosophies de sécurité des codes sont différentes.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Coin non drainé pseudo-statique

THÉORIE

Le séisme conserve le cadre statique de l'équilibre limite en ajoutant aux coins de sol des forces d'inertie constantes ($k_h W$ horizontale, $k_V W$ verticale). Mononobe–Okabe n'est pas applicable dans l'argile ($\varphi = 0$) ; le module retient un **coin non drainé à plan critique de 45°** (hypothèse GeoTerva) :

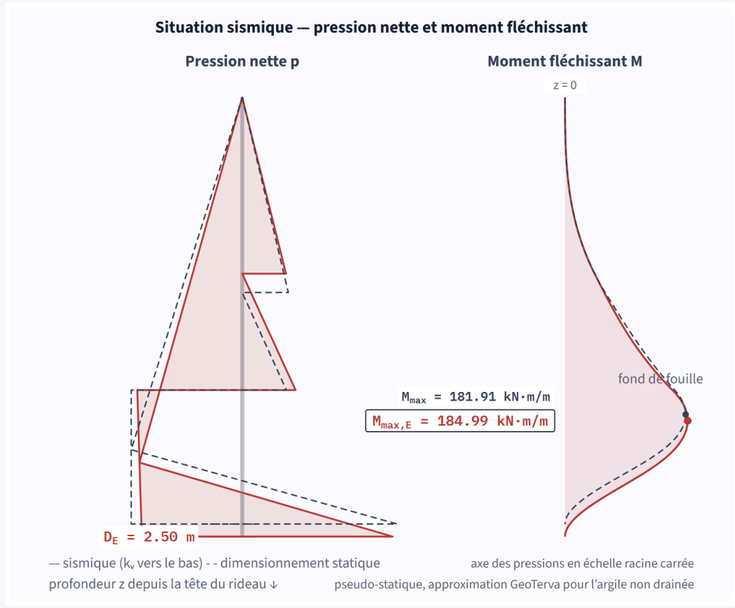
$$\tan\theta = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \qquad K^c_{AE} = 1 + \tan\theta \qquad K^c_{PE} = 1 - \tan\theta$$

$$\text{pression :}\ \ (1 \mp k_v)\,(1 \pm \tan\theta)\,\sigma_v \ \mp\ 2c_u = \left[(1 \mp k_v) \pm k_h\right]\sigma_v \ \mp\ 2c_u$$

L'eau interstitielle de l'argile se déplace toujours avec le sol (entraînée) ; l'eau libre n'existe que dans un sol très perméable. **Les deux sens de k_V** sont vérifiés.

Vérification : le diagramme des pressions nettes est établi comme en statique ; les deux équations d'équilibre donnent **D_E**. Le séisme est une situation accidentelle, aucun coefficient n'est appliqué à la butée : le mur résiste si **$D_E \le D_d$**. Pour le rideau de palplanches autostable, les pressions sismiques sont réparties proportionnellement à la contrainte effective, comme les pressions statiques.

Dans la combinaison sismique, les effets sont pris avec le coefficient 1.0 : $M_{Ed,E} = M_{max,E}$.



Énoncé

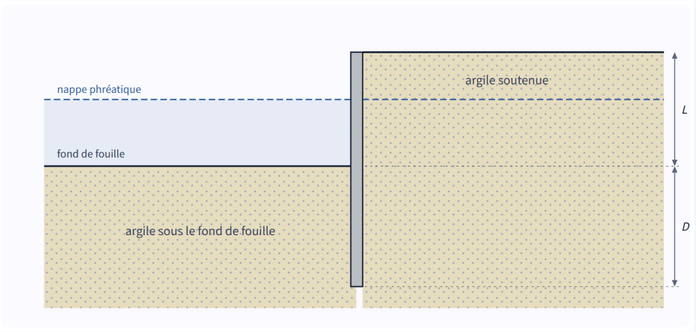
EXEMPLE

Données

Mur	**Exemple 6(b) : mur avec fissure remplie d'eau, $D_{design} = 3.43$ m, $M_{max} = 181.91$ kN·m/m ; $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Séisme	$k_h = 0.15$, $k_v = \pm 0.075$ **(deux directions)**

À DÉTERMINER

Coefficients sismiques ; $\mathbf{D_E}$ (deux sens de k_V), $\mathbf{M_{max,E}}$; le rideau dimensionné en statique résiste-t-il à ce séisme ?



Solution

SOLUTION

1 Coefficients sismiques (statique : actif = passif = 1) et résultats pour les deux directions

k_v	f_v	tan θ	actif : $f_v + k_h$	butée : $f_v - k_h$	D_E (m)	$M_{max,E}$ (kN·m/m)
+0.075	0.925	0.1622	1.075	0.775	2.391	181.39
−0.075	1.075	0.1395	1.225	0.925	**2.503**	184.99

2 Vérification et section

$$D_E = 2.50\ \text{m} \ \leq\ D_{design} = 3.43\ \text{m}\ \checkmark$$

$$M_{Ed,E} = M_{max,E} = 184.99\ \text{kN·m/m} \qquad \eta_E = \frac{184.99}{385.00} = \mathbf{0.481}\ \leq 1\ \checkmark$$

Le dimensionnement statique **résiste** à ce séisme : le diagramme sismique n'exige qu'une fiche de **2.50 m** (dimensionnement 3.43 m) ; le moment de 185.0 kN·m/m (statique 181.9) est quasiment identique et la palplanche est suffisante. La pression nette dans l'argile étant constante, le séisme modifie très peu le diagramme.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Méthode du module de réaction du sol

THÉORIE

L'équilibre limite donne la fiche et le moment, mais il ne donne pas **le déplacement du rideau**. Pour le déplacement en service, le rideau est une poutre élastique (EI) et le sol de chaque côté est constitué de ressorts indépendants (Winkler) :

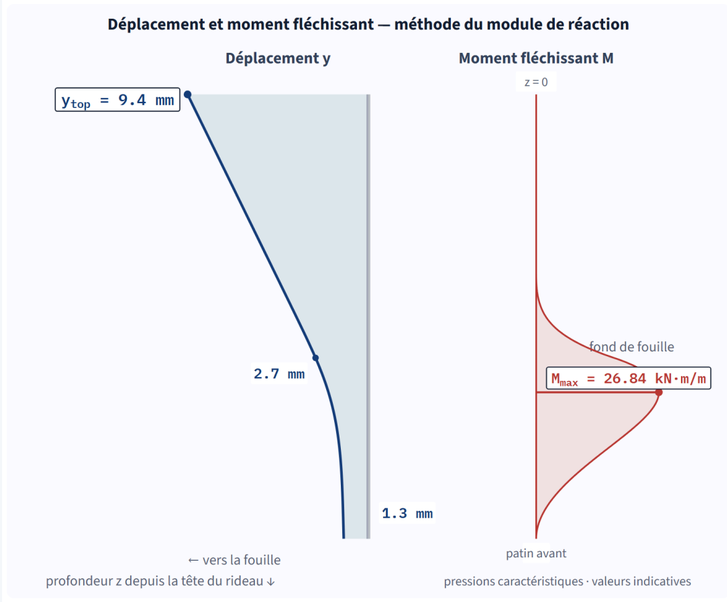
$$EI\frac{d^4y}{dz^4} = p_R(z) - p_E(z) + u_{net}(z)$$

$$p_R = K_0\sigma_{v,r} - k_h y \;\; (\sigma_a \le p_R \le \sigma_p) \qquad p_E = K_0\sigma_{v,e} + k_h y \;\; (\ldots) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

Les ressorts partent de la pression au repos, varient proportionnellement au déplacement et ne dépassent pas les limites de poussée et de butée. k_h est un **paramètre du modèle** plutôt qu'une propriété du sol. Comme φ = 0 dans l'argile, K_0 = 1.

Le mur est à sa longueur de calcul (L + D_d), libre à ses deux extrémités ; les pressions sont caractéristiques, sans coefficient de sécurité. La fouille est réalisée en une seule phase, le mur étant déjà en place.

La résolution est effectuée par éléments finis, par itérations jusqu'à ce que les ressorts atteignent l'état élastique, actif ou passif ; le résultat est donné comme une **estimation non bornée**.



Énoncé

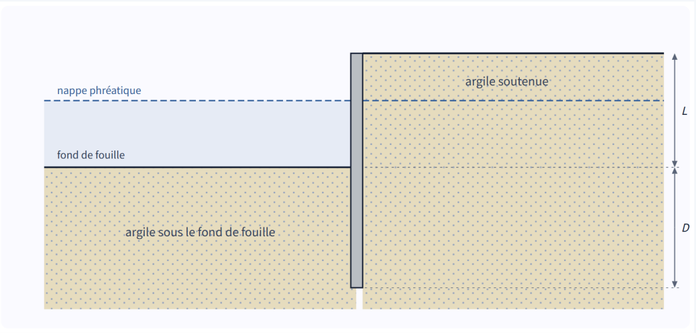
EXEMPLE

Données

Mur	**Exemple 6(b) : longueur de calcul $L + D = 8.43$ m**
Palplanche	$I = 21\,000$ **cm⁴/m,** $E = 210\,000$ **MPa (**$EI = 44\,100$ **kN·m²/m)**
Sol	$k_h = 15$ **MN/m³ (argile supérieure),** 30 **MN/m³ (argile inférieure)**

À DÉTERMINER

Déplacement en tête du mur, au fond de fouille et en pied ; le moment maximal du modèle est-il égal au moment d'équilibre limite ?



Solution

SOLUTION

1 Modèle

$$EI = 210\,000\,000(21\,000 \cdot 10^{-8}) = 44{,}100\ \mathrm{kN{\cdot}m^2/m} \qquad K_0 = 1 - \sin 0^\circ = 1$$

$$EI\, y^{IV} = p_R - p_E \ \ (\text{éléments finis, ressorts élastiques/actifs/passifs})$$

2 Résultat (vers la fouille)

$$y_{üst} = \mathbf{9.4}\ \mathrm{mm} \qquad y_{excavation\ base} = \mathbf{2.7}\ \mathrm{mm} \qquad y_{tip} = 1.3\ \mathrm{mm}$$

$$M_{max}^{model} = 26.84\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}\ \ (z = 5.65\ \mathrm{m}) \qquad M_{max}^{limit\ equilibrium} = 181.91$$

La tête du mur se déplace vers la fouille de **9.4 mm**, le fond de fouille de 2.7 mm et le pied de 1.3 mm. Le moment du modèle en service (26.8 kN·m/m) est **très inférieur** au moment d'équilibre limite (181.9) : les ressorts ne mobilisent que 48 % de la limite passive ; l'équilibre limite décrit l'instant de la rupture du mur, et c'est lui qui donne le **moment de dimensionnement**.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Soulèvement du fond de fouille

THÉORIE

Quelle que soit la faible fiche que donne l'équilibre latéral, il ne dit rien du fond de fouille. Dans l'argile, le fond **peut se soulever** : l'argile située sous la fouille est refoulée vers l'intérieur par le poids du terrain voisin (rupture par portance inversée). La vérification usuelle des fouilles compare la résistance au cisaillement sur la surface de rupture à ce poids :

$$FS = \frac{5.14\, c_u \left(1 + 0.2 \dfrac{B''}{L_{exc}}\right) + \dfrac{c_{side} H}{B'}}{\sigma_v(H) + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\, B'$$

B est la largeur de la fouille, L_{exc} la longueur en plan (le terme de forme disparaît pour une fouille longue), T la profondeur de la couche raide située sous le fond (si elle n'est pas saisie, la surface n'est limitée que par la largeur) ; c_u se rapporte à l'argile sous le fond, c_{side} est la cohésion moyenne sur la hauteur retenue, $\sigma_v(H)$ la contrainte verticale totale du terrain voisin au niveau du fond.

L'encastrement de l'écran sous la base n'est pas pris en compte (côté sécurité). La surcharge et les charges en bande ou ponctuelles sont ajoutées à q sous forme de charge uniforme équivalente dans B′. En présence de plusieurs couches, la formule est utilisée avec l'extension multicouche de GeoTerva.

$$FS_{req} = 1.5$$

Le coefficient de sécurité requis est une donnée d'entrée ; la vérification ne concerne que les fouilles dans des sols cohérents.

Énoncé

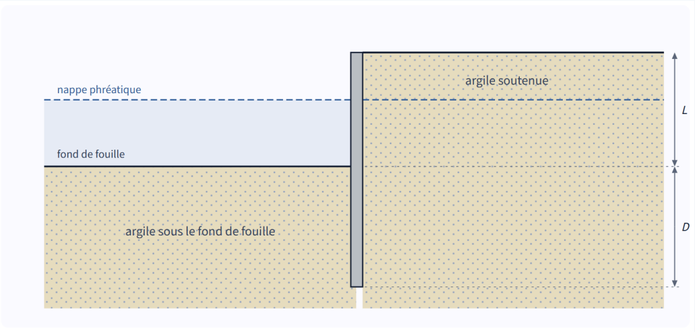
EXEMPLE

Données

Fouille	**largeur $B = 10$ m (fouille longue, couche raide non introduite) ; mur de l'Exemple 6 ($H = 5$ m)**
Sol	**argile sous la base $c_u = 70$ kPa ; moyenne sur la hauteur soutenue $c_{side} = 30$ kPa ; $\sigma_v(H) = 90$ kPa ; pas de surcharge**

À DÉTERMINER

B′, **FS** (≥ 1.5 ?) ; que se passerait-il si la largeur de la fouille était B = 5 m et 20 m ?



Solution

SOLUTION

1 Largeur effective (L_{exc} non saisie : pas de terme de forme)

$$B' = \frac{B}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = \mathbf{7.071}\ \text{m}$$

2 Coefficient de sécurité

$$FS = \frac{5.14(70) + 30(5)/7.071}{90} = \frac{359.8 + 21.2}{90} = \mathbf{4.23}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

$$B = 5\ \text{m}:\ FS = 4.47 \qquad B = 20\ \text{m}:\ FS = 4.12$$

Le coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille est de **4.23** (requis : 1.5) : le fond est sûr. Lorsque la largeur augmente, la contribution du cisaillement latéral diminue (4.12 pour B = 20 m) ; la valeur de c_u de l'argile sous-jacente est déterminante.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Étendue de la solution

THÉORIE

Toute couche argileuse est traitée **en contraintes totales non drainées** ($\varphi = 0$) : **situation à court terme**. Le cas drainé à long terme (c', φ') n'est pas vérifié ; il peut être déterminant pour les murs permanents. Un mur à remblai sableux se dimensionne avec le module du sable.

Pressions de Rankine sans adhérence du mur : $K_a = K_p = 1$; poussée $\sigma_v - 2c_u$, butée $\sigma_v + 2c_u$; pas de succion au-dessus du fond de fouille (fissure de traction, par défaut remplie d'eau, ou sèche ; sous la nappe, la fissure retient l'eau de la nappe).

Diagramme de pression nette simplifié de la source : à chaque profondeur, les pressions des deux faces ; le bloc de pied à partir de l'équilibre horizontal ; la profondeur à partir des moments. Eau identique ou différente sur les deux faces (sans infiltration) ; l'infiltration n'est pas modélisée.

Sous séisme, l'argile est traitée comme un coin pseudo-statique non drainé à plan critique à 45° (hypothèse de GeoTerva). Le rideau de palplanches est vérifié en flexion ; l'effort tranchant, le voilement local et la corrosion ne sont pas vérifiés. Le déplacement est donné par la méthode du module de réaction du sol, sans limite.

Synthèse

Points à retenir

Argile non drainée ($\varphi = 0$, c_u) : poussée $\sigma_v - 2c_u$, butée $\sigma_v + 2c_u$; la succion près de la surface n'est pas prise en compte : **fissure de traction $z_c = (2c_u - q)/\gamma$** ; $P_1 = \tfrac{1}{2}\sigma_a(L)(L - z_c)$, $\bar{z}_1 = (L - z_c)/3$

Sous le fond de fouille, la pression nette est constante : $\sigma_6 = 4c_u - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)$, en pied $\sigma_7 = 4c_u + (\ldots)$; si $\sigma_6 > 0$ n'est pas satisfait, l'argile ne peut pas retenir le mur

Équilibre : $L_4 = (\sigma_6 D - P_1)/(4c_u)$; équation du second degré en D (exemple : 0.678 m ; 2.288 m avec fissure remplie d'eau) ; $z' = P_1/\sigma_6$, $M_{max} = P_1(z' + \bar{z}_1) - \sigma_6 z'^2/2$

Une **fissure remplie d'eau** augmente fortement P_1, D et M (25 → 79.5 kN/m ; 15.5 → 181.9 kN·m/m) ; la supposer sèche va à l'encontre de la sécurité

Fiche de calcul : f = 1.4–1.6 (moment inchangé) ou σ_p/FS_p ; à la fiche donnée, le plus grand moment des deux cas

Section : EN 1993-1-1 η = 0.638 ; AISC LRFD/ASD 0.840 / 0.789. **Séisme** : D_E = 2.50 m ≤ 3.43 m ; par la méthode du module de réaction du sol, déplacement en tête ≈ 9 mm

Soulèvement du fond de fouille : $FS = (5.14c_u(1 + 0.2B''/L_{exc}) + c_{side}H/B')/(\sigma_v(H) + q)$; dans l'exemple, 4.23 ≥ 1.5

Références bibliographiques

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

EN 1993-1-1:2005 – Calcul des structures en acier, règles générales.

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

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

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

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.

REMARQUE

Tous les exemples numériques ont été produits avec le moteur de calcul propre au module ; le module donne les mêmes valeurs. L'exemple de calcul de la page du module porte aussi sur ce mur (L = 5 m, γ = 18 kN/m³, c_u = 30 / 70 kPa).

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Saisir dans GeoTerva la hauteur de son propre mur, le profil d'argile stratifié, l'eau, la fissure de traction, la section du rideau de palplanches et les coefficients sismiques ; le module fournit conjointement le diagramme des pressions, la fiche, le moment, la vérification de la section, le déplacement et le soulèvement du fond de fouille.

Ouvrir sur smartphone
Les modules d'essai ne nécessitent pas d'inscription.

Ouvrir le module →

Page de théorie →

Si vous souhaitez les utiliser dans vos cours : info@geoterva.com