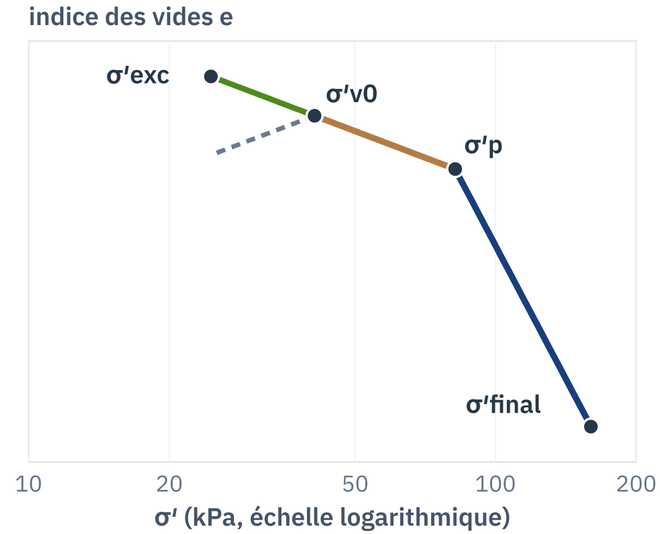
Présentation de cours de géotechnique · Tassement

Tassement de consolidation

Cours : tassement de consolidation unidimensionnelle d'une couche d'argile ; chemin de contraintes, préconsolidation, fouille et soulèvement, contraintes de Boussinesq, méthode mv et temps ; un exemple de calcul pour chaque sujet.

- Chemin de contraintes
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- Fouille et soulèvement
- Boussinesq
- Méthode m_v
- Tassement en fonction du temps



Que verrons-nous dans ce cours ?

Suivre le **chemin de contraintes** de l'argile : $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c)

La détermination des contraintes initiales (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) et de la **contrainte de préconsolidation** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$)

Distinguer l'effet de déchargement et de gonflement de **l'excavation** et la **référence à partir de laquelle** le tassement est mesuré

Comment calculer l'accroissement de contrainte de **Boussinesq** et la **profondeur d'influence**

Appliquer les **quatre régimes** de compression des tranches (recompression, compression vierge) ; comparer avec la méthode de $\mathbf{m_v}$

La consolidation **en fonction du temps** (T_v, U, t_{50}, t_{90}) et le tracé de la courbe tassement–temps du profil stratifié

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

Sol de l'exemple : argile de 6 m d'épaisseur, nappe à la surface du terrain ($\sigma'_{v0} = 8.19\ z$), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; semelle de 4 × 6 m, q = 150 kPa. Les tassements sont en mm.

Que calcule ce module ?

THÉORIE

Toutes les couches du profil sont des argiles ; aucun autre sol ne peut être saisi. Le module calcule la **consolidation primaire** de l'argile : lorsque la charge est appliquée, l'eau est expulsée lentement et l'argile se comprime le long du chemin de contraintes.

Le tassement immédiat (élastique) relève des modules Tassement élastique ; la somme des deux se trouve dans le module Tassement total (2D).

La résolution est **analytique** : accroissement de contrainte de Boussinesq, chemin de contraintes tranche par tranche et théorie de Terzaghi ; pression interstitielle hydrostatique ; il n'y a pas d'éléments finis.

Hors du domaine d'application : couches granulaires, compression secondaire (C_α), tassement des sables par SPT/CPT, tassement du rocher, consolidation 2D/3D, capacité portante, liquéfaction.

CONVENTION DE SIGNES

Le tassement est **positif**, le soulèvement **négatif**. Déformation nette $S_{net} = S_c + S_{soul}$.

Non en une seule étape de l'état initial à l'état final

THÉORIE

Le calcul ne passe jamais de la contrainte initiale à la contrainte finale **en une seule étape**. L'excavation réduit la contrainte effective et l'argile **gonfle** le long de la droite de déchargement (C_s). Lorsque l'ouvrage la recharge, l'argile suit d'abord la même droite pour revenir à σ'_{v0} (le soulèvement est annulé) ; elle se recomprime ensuite selon C_r jusqu'à σ'_p et, si la contrainte finale dépasse σ'_p, elle se comprime le long de la droite vierge (C_c) :

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_p est la contrainte maximale subie dans le passé ; **elle n'est pas réduite par l'excavation**.

Le cycle de chargement–déchargement se **referme** en σ'_{v0} : une charge qui ne fait que restituer les terres enlevées ne produit aucun tassement par rapport à l'état initial, quels que soient C_s et C_r.

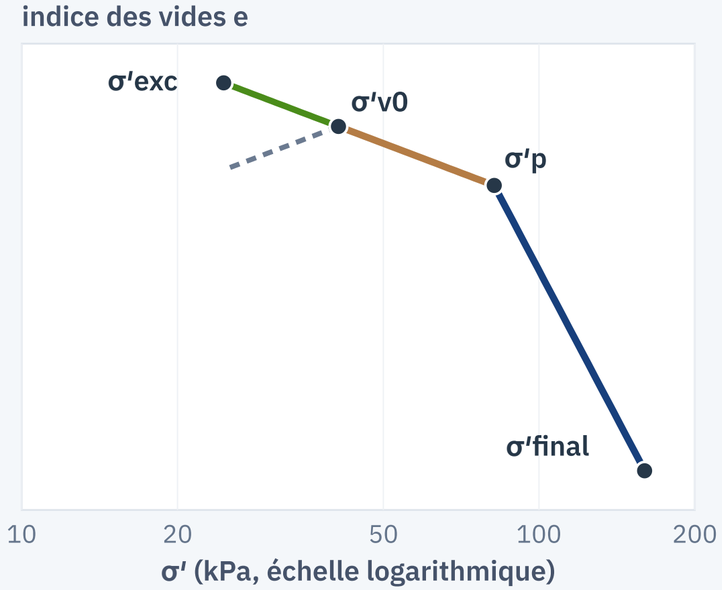


Schéma : la ligne en tirets représente le déchargement, la ligne verte le rechargement (C_s), l'orange la recompression (C_r), la bleue la compression vierge (C_c).

Au point milieu de chaque tranche

THÉORIE

Chaque couche comprise entre le niveau de la fondation et la profondeur de calcul z_{lim} est divisée en **tranches** d'épaisseur au plus égale à Δz (coupées au niveau de la nappe) ; chaque contrainte est calculée au milieu de la tranche :

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γ est utilisé au-dessus de la nappe, γ_{sat} en dessous ; γ_w = 9.81 kN/m³.

Les contraintes initiales du terrain constituent la **référence** pour chaque phase ultérieure.

Plus la tranche est mince, plus le résultat est précis ; dans un calcul à la main, une seule tranche donne un résultat approché.

Nappe phréatique au niveau du terrain

Pour γ_{sat} = 18, γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³ et σ'_{v0} = 8.19 z. Tous les exemples suivants utilisent ce sol.

Énoncé

EXEMPLE

Données

Sol	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(au-dessus du niveau de la nappe),** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(en dessous)**
Nappe	**1.5 m à partir de la surface du sol**
Profondeurs	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

À DÉTERMINER

Déterminer les valeurs de **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** à chaque profondeur.

Solution

SOLUTION

1 z = 3.0 m (nappe à 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

Sous la nappe, σ'_{v0} augmente plus **lentement** (pente $\gamma' = 8.19$ kN/m³) : à z = 6 m, la contrainte totale vaut 106.5 et la contrainte effective seulement 62.4 kPa.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

σ'_p = OCR · σ'_{v0} ou valeur de laboratoire

THÉORIE

Pour chaque modèle, une **seule définition** est utilisée : soit le rapport de surconsolidation OCR, soit la valeur de σ'_p déterminée en laboratoire :

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{ou} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1 : argile normalement consolidée ; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$ et tout chargement au-delà de la contrainte initiale correspond à une compression vierge.

Si la valeur de laboratoire de σ'_p est inférieure à σ'_{v0}, elle est relevée à σ'_{v0} avec un avertissement : **l'argile sous-consolidée est hors du domaine d'application**.

σ'_p représente la contrainte maximale subie dans le passé et ne diminue pas avec l'excavation.

QUE NOUS DIT L'OCR ?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Un OCR élevé signifie une large zone de recompression dans laquelle l'argile se comprime d'abord sous charge avec un **faible C_r**.

Énoncé

EXEMPLE

Données

Tranche	**point milieu $z = 3\ \mathrm{m}$: $\sigma'_{v0} = 24.57\ \mathrm{kPa}$ (nappe au niveau du terrain, $\gamma_{sat} = 18$)**
Cas	**(a) $OCR = 3$ · (b) laboratoire $\sigma'_p = 60\ \mathrm{kPa}$ · (c) laboratoire $\sigma'_p = 20\ \mathrm{kPa}$**

À DÉTERMINER

Dans chaque cas **σ′p** et **OCR** ; interpréter l'état.

Solution

SOLUTION

1 (a) OCR donné et (b) valeur de laboratoire

$$\text{(a)}: \ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad \text{(b)}: \ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) valeur de laboratoire inférieure à σ′v0

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow \ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) et (b) argile surconsolidée (σ′p > σ′v0) ; pour (c), le module émet un avertissement et considère l'argile comme **normalement consolidée** (σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa) : l'argile sous-consolidée est hors du domaine d'application.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Déchargement et soulèvement

THÉORIE

La charge retirée est la **contrainte verticale effective initiale des terres** au fond de fouille (niveau de la nappe inchangé ; sous l'eau, le poids retiré est calculé avec γ′). Le déchargement se répartit selon le coefficient d'influence de Boussinesq de l'emprise de la fouille, I_{exc} (I_{exc} = 1 pour une fouille large) :

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{lift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\, \Delta H}{1 + e_0}\, \log_{10} \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

Le gonflement est **négatif** (tassement +, gonflement –). Si C_s n'est pas donné, on prend $C_s = C_r$, ce qui est indiqué dans le rapport.

La pression nette $q_{net} = q_{br} - q_{sou}$ est seulement consignée ; le calcul n'est pas mené en une seule étape avec la pression nette, c'est le chemin de contraintes qui est suivi.

NEDEN KABARMA?

L'excavation réduit la contrainte effective et l'argile gonfle. Lorsque la structure recharge le sol, le gonflement est récupéré : il s'agit de la **recompression du sol gonflé**.

Δσ sous le centre de la semelle

THÉORIE

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

Rectangle B × L, sous son centre : avec le coefficient de coin de Newmark, $I_z = 4 \cdot I_{coin}$(m = B/2z′, n = L/2z′) :

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

(Si V < m²n², le terme d'arc tangente est augmenté de π). **Semelle filante** (largeur B), sous sa ligne médiane : $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. Pour z′ = 0, $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

REMARQUE

L'accroissement de contrainte est pris le long de la verticale sous le centre de la fondation (tranches et analyse temporelle) ; dans les zones d'isovaleurs (bandes de couleur), pour les points situés hors de la fondation, il est décomposé en rectangles d'angle.

Énoncé

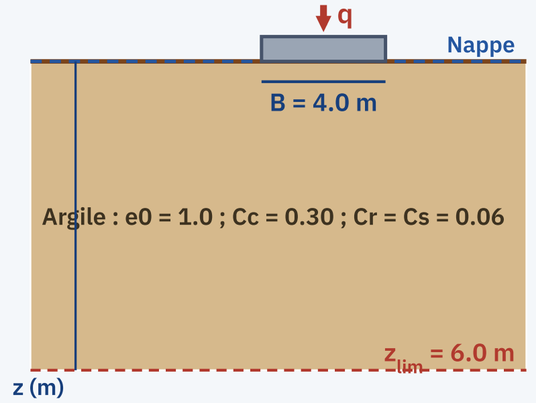
EXEMPLE

Données

Fondation	**rectangle de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, à la surface du sol ($D_f = 0$)**
Point	**point milieu de la tranche z′ = 3 m, sous le centre**
Comparaison	**B = 4 m de largeur de bande**

À DÉTERMINER

I_z et **Δσ** ; les mêmes valeurs s'appliquent à la bande.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Rectangle : m = B/2z′ = 2/3 = 0.667 ; n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2 n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2 n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1} \frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 Rectangulaire et filante

$$\text{rectangulaire} : I_{;z} = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}\ \text{kPa}$$

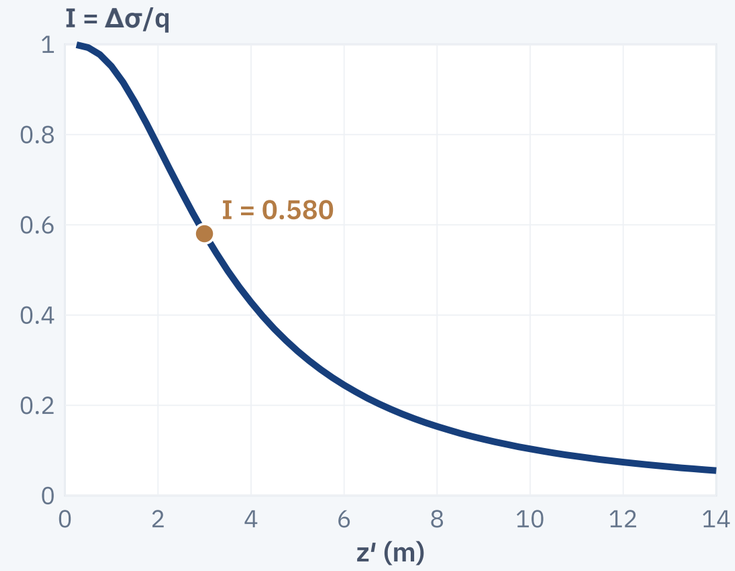
$$\text{bande} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

Solution (2/2)

SOLUTION

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



Au centre de la tranche, Δσ = **87.0 kPa** (58 % de q) ; une bande étroite (même B) donne 100.2 kPa : **une semelle longue agit plus profondément**. L'accroissement de contrainte atteint encore 10 % à z′ = 10 m.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Profondeur d'influence : I(z′) = p

THÉORIE

L'accroissement de contrainte diminue avec la profondeur mais ne s'annule jamais ; la somme des compressions des tranches exige une borne inférieure : la **profondeur de calcul z_{lim}**. Dans la règle de la profondeur d'influence, l'argile se comprime jusqu'à ce que l'accroissement de Boussinesq sous le centre tombe à une fraction **p** de la contrainte appliquée (usuellement p = 10 %) :

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

Le même coefficient d'influence régit aussi le déchargement d'une fouille de même forme en plan ; la profondeur est donc la même, qu'elle soit lue à partir de q_{brut} ou de q_{net}.

Si le profil se termine au-dessus de z_{lim}, la dernière couche se prolonge jusqu'à z_{lim} avec les mêmes caractéristiques ; s'il se termine au-dessous, le sol situé sous z_{lim} est considéré comme incompressible.

La règle alternative est la **base du profil** : une base rigide est supposée. (Le critère $\Delta\sigma = 0.2\ \sigma'_{v0}$ descend plus profondément pour une petite semelle située en profondeur ; la règle du module ne dépend que de la géométrie.)

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
bande	6.34 B	3.13 B

Énoncé

EXEMPLE

Données

Fondations	**(a) 4 × 6 m, p = 10 % et 20 % · (b) radier 20 × 30 m, p = 10 % et 20 %**
Règle	**profondeur d'influence ; $D_f = 0$**

À DÉTERMINER

Dans chaque cas, **z′** et **z_{lim}** ; vérification de I(z′) pour 4 × 6 m.

Solution

SOLUTION

1 Vérification : 4 × 6 m, p = 10 % ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

Fondation	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
Radier 20 × 30 m	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′ est **proportionnel aux dimensions de la fondation** : pour une semelle de 4 × 6 m, z_{lim} = 10.19 m ; pour un radier de 20 × 30 m, **50.9 m**. Le radier prend en compte l'argile qui se comprime jusqu'à une profondeur d'environ 51 m.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Confinement des tranches au rechargement

THÉORIE

$f = \Delta H/(1 + e_0)$ pour la tranche ; avec $\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{v0} \leq \sigma'_p$, compression de la tranche selon la position de la contrainte finale :

Condition	Confinement des tranches au rechargement
$\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{son} \leq \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{exc})$: une partie du gonflement est récupérée
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \leq \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{fin}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{final} < \sigma'_{exc}$	Gonflement complémentaire avec C_s (négatif)

S'IL N'Y A PAS DE FOUILLE

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ et $S_b = 0$: recompression classique et compression vierge, à partir de la contrainte initiale.

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

Énoncé

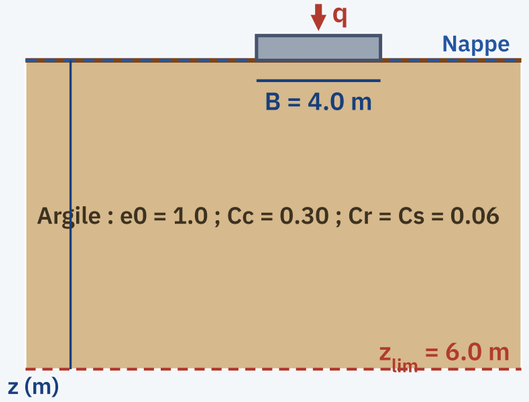
EXEMPLE

Données

Sol	**couche d'argile unique, épaisseur 6 m ; $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$; niveau de la nappe à la surface du sol ;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
Fondation	**Rectangle de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, à la surface du terrain (sans fouille)**
Tranche	**tranche unique, H = 6 m, point milieu** $z = 3\ \mathrm{m}$ **:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57\ \mathrm{kPa}$
Surconsolidation	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Accroissement de contrainte	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04\ \mathrm{kPa}$ **(Exemple 3)** ⇒ $\sigma'_{final} = 111.61\ \mathrm{kPa}$

À DÉTERMINER

Le **régime** et le tassement de consolidation $\mathbf{S_c}$ pour chaque argile.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Commun : f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m ; log($\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC :}\quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6 : σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{fin} ⇒ recompression seulement

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

Même argile, même charge : l'argile normalement consolidée tasse de **591.6 mm**, celle d'OCR = 6 de **118.3 mm** ; l'écart provient du rapport C_c/C_r = 5.

Solution (2/2)

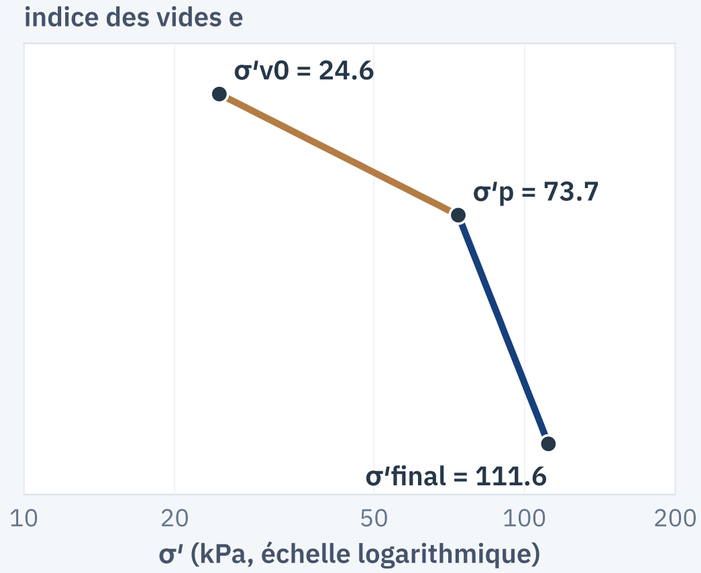
SOLUTION

3 (c) OCR = 3 : $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{fin} = 111.61$ ⇒ recompression + compression vierge

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	régime	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	intact	0	591.6	**591.6**
6	147.4	recompression	118.3	0	**118.3**
3	73.7	recompression + vierge	85.9	162.2	**248.0**



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

À partir du terrain d'origine ou du fond soulevé ?

THÉORIE

Après la fouille vient la fondation : le tassement dépend de la **référence** à partir de laquelle les déplacements sont mesurés (option *déplacements après la fouille* à la phase de fouille) :

Conservé — à partir du terrain initial (par défaut) : le soulèvement est aussi indiqué séparément ; le tassement de la fondation est la déformation nette à la fin du chargement : **$S = S_c + S_{sou}$** = compression totale au-delà de σ'_{v0}. Une charge qui ne dépasse pas les terres enlevées donne S = 0 ; si elle est plus faible, le sol reste au-dessus du niveau initial (signalé dans le rapport, tassement 0).

Remis à zéro avant le chargement : les déplacements de la phase d'excavation sont remis à zéro ; le tassement est mesuré à partir du fond de fouille soulevé : **$S = S_c = S_b + S_r + S_v$**. La recompression du soulèvement compte comme tassement : une fondation parfaitement compensée tasse d'autant que le fond s'est soulevé. Si la fouille est restée ouverte jusqu'à la construction de l'ouvrage et que le soulèvement s'est développé, c'est la réponse correcte.

Les deux mesures sont toujours imprimées ; le choix détermine celle qui est retenue comme tassement de la semelle, la courbe de tassement en fonction du temps et le résultat.

SYNTHÈSE

Conservé : $S = S_c + S_{gonf}$ (petit). Mis à zéro : $S = S_c$ (grand).

Énoncé

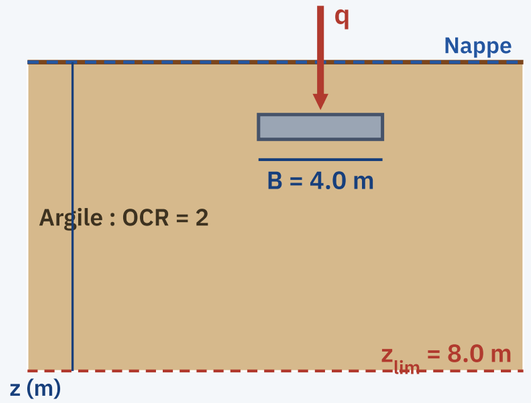
EXEMPLE

Données

Sol	**argile 0–8 m, $\gamma_{sat} = 18$, nappe au niveau du terrain ; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$; $OCR = 2$**
Fouille	**excavation large (I_{exc} = 1), profondeur 2 m ; à la base de la fouille de fondation**
Fondation	**4 × 6 m, $q_{gross} = 100\ \mathrm{kPa}$**
Tranche	**tranche unique 2–8 m, $H = 6$ m, $z = 5$ m, $f = 3$ m : $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95\ \mathrm{kPa}$**

À DÉTERMINER

σ'_{exc}, gonflement, S_b, S_r, S_v, S_c ; tassement de la fondation (à partir du sol initial et après remise à zéro).



Solution (1/3)

SOLUTION

1 Fouille : charge retirée, déchargement et soulèvement

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = \mathbf{-39.9 \text{ mm}}$$

2 Chargement : $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (exemple 3) ; $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

Solution (2/3)

SOLUTION

3 Régime : $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{fin} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

Au rechargement, le gonflement est d'abord récupéré (S_b = 39.9 mm = la totalité du gonflement), puis viennent 54.2 mm de recompression avec C_r et 3.3 mm de compression vierge dépassant légèrement σ'_p.

Solution (3/3)

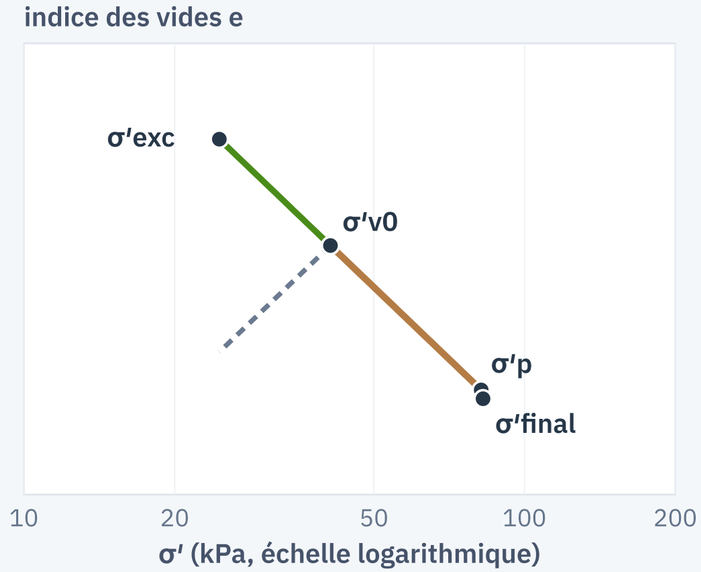
SOLUTION

4 Tassement de la semelle

$$\text{est conservé :}\quad S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$$

$$\text{s'annule :}\quad S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

Le tassement mesuré à partir du sol d'origine est de **57.5 mm** ; mesuré à partir du fond soulevé, il est de **97.4 mm**. L'écart est égal au soulèvement (39.9 mm) : le choix de la référence modifie le résultat de 69 %.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Chemin linéaire : $\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H$

THÉORIE

Il s'agit d'une méthode de calcul distincte et **linéaire** : le même m_v est utilisé à la fois au déchargement et au rechargement ; C_c, C_r, C_s et e_0 n'interviennent pas :

$$\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H_{slice}$$

$$\text{soulèvement} = -m_v \left(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc}\right) H \qquad S_c = m_v \left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right) H$$

La partie de S_c jusqu'à σ'_{v0} correspond au gonflement récupéré (S_b).

Comme elle est linéaire, la boucle se referme d'elle-même.

L'unité de m_v est 1/kPa (coefficient de compressibilité volumique) ; il doit être choisi en fonction de l'intervalle de contrainte.

DIFFÉRENCE AVEC e – log σ′

La méthode m_v ne tient pas compte du niveau de contrainte (pas de σ'_p) : chaque accroissement de contrainte produit la même compression.

Énoncé

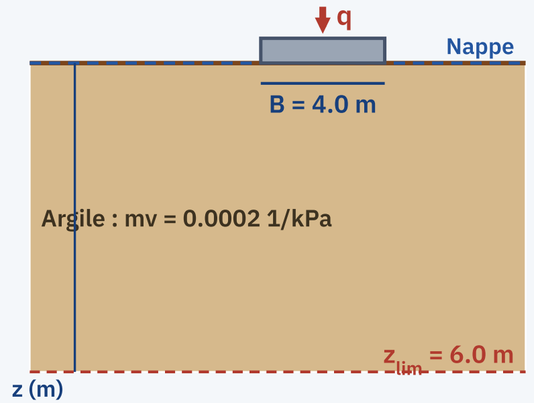
EXEMPLE

Données

Sol	**6 m d'argile, $m_v = 0.0002\ 1/\mathrm{kPa}$, nappe au niveau du terrain**
Cas (a)	**sans étaiement : 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (exemple 3)**
Cas (b)	**La fouille et la fondation de l'exemple 6 (fouille de 2 m, $q = 100$ kPa, tranche de 2–8 m)**

À DÉTERMINER

S_c dans chaque cas ; pour (b), soulèvement, S_b et tassement net.



Solution

SOLUTION

1 (a) Sans excavation

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) Avec fouille : σ'_{v0} = 40.95 ; σ'_{exc} = 24.57 ; $\Delta\sigma_{ch}$ = 58.03 ; σ'_{fin} = 82.60 kPa

$$\text{soulèvement} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

Tassement net (à partir du sol d'origine) S = S_c + soulèvement = **50.0 mm** ; seul l'accroissement de 41.65 kPa dépassant σ'_{v0} engendre un tassement. Dans la voie linéaire, la méthode e – log σ′ ne fait intervenir aucun effet de σ'_p.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Terzaghi : T_v, U et t

THÉORIE

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

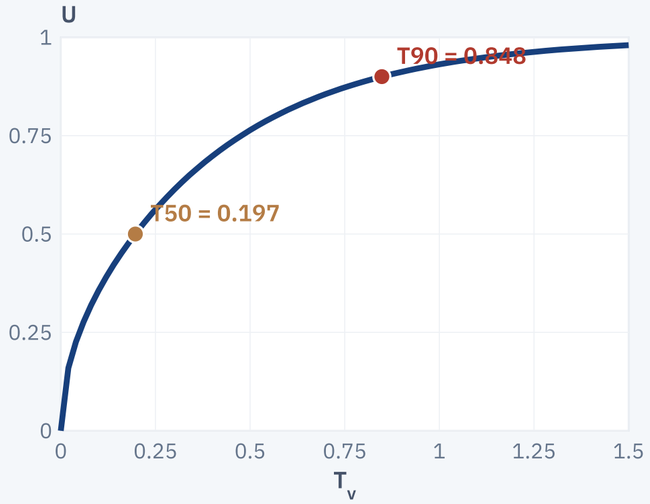
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (drainage unidirectionnel) ou H/2 (drainage bidirectionnel) ; H est l'épaisseur de la couche sous le niveau de la fondation (jusqu'à z_{lim} pour la dernière couche qui dépasse le profil).

$T_{v,50}$ = 0.197 ; $T_{v,90}$ = 0.848. Pour T_v < 0.05, la solution aux temps courts $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$ est utilisée.

Des couches de C_v et de H_{dr} différents se consolident à des vitesses différentes : la courbe du profil est la **somme des courbes des couches** ; ses propres valeurs t_{50} et t_{90} se lisent sur cette somme.

La courbe se rapporte au tassement de chargement S_c ; le gonflement est supposé achevé avant le chargement.



Énoncé

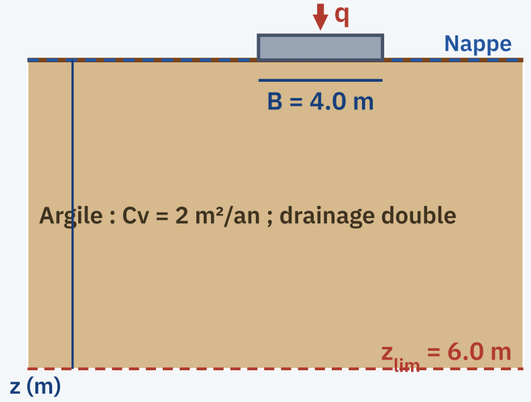
EXEMPLE

Données

Argile	**6 m, normalement consolidé (exemple 5a) : $S_c = 591.6$ mm**
Consolidation	**$C_v = 2\ \mathrm{m}^2/\mathrm{an}$; drainage en haut et en bas (double face)**
Temps	**t = 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ans**

À DÉTERMINER

H_{dr}, t_{50}, t_{90} et S(t) ; t_{90} avec drainage unilatéral.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Chemin de drainage et durées caractéristiques

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{an} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{an}$$

2 Drainage unidirectionnel (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3}\ \text{an}$$

Avec un drainage double, le chemin de drainage est divisé par deux et la durée est réduite au **quart** : t_{90} = 3.82 ans, contre 15.3 ans en drainage simple.

Solution (2/2)

SOLUTION

t (ans)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	S(t) = U S_c (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

En 1 an, seuls 53 % du tassement sont réalisés, 91 % en 4 ans (S_c = 592 mm) ; en 8 ans, U = 0.990. Pour de faibles valeurs de T_v (< 0.05), on utilise $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

EXEMPLE

Données

Fondation	**4 × 6 m, q = 150 kPa, à la surface du terrain ; nappe au niveau du terrain (γ_{sat} = 18)**
Couche A (0–4 m)	**mou, NC : $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; double drainage**
Couche B (4–8 m)	**raide, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; drainage simple face**
Calcul	**base du profil (8 m) ; chaque couche en une seule tranche (A : z = 2 m, B : z = 6 m)**

À DÉTERMINER

La valeur de $\mathbf{S_c}$, t_{50} et t_{90} de chaque couche ; la courbe S(t) du système.

Solution (1/3)

SOLUTION

1 A : z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38 ; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19 ; σ'_{fin} = 132.57 ; f = 4/2.10 = 1.9048 m ; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B : z = 6 m, σ'_{v0} = 49.14 ; σ'_{p} = 98.28 ; $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74 ; σ'_{final} = 85.88 < σ'_{p} ; f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

Tassement de consolidation total **627.0 mm** : la couche supérieure molle NC porte 97 % du total ; la couche inférieure raide et surconsolidée seulement 21.6 mm.

Solution (2/3)

SOLUTION

3 Chemin de drainage et durées ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{an}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{an}$$

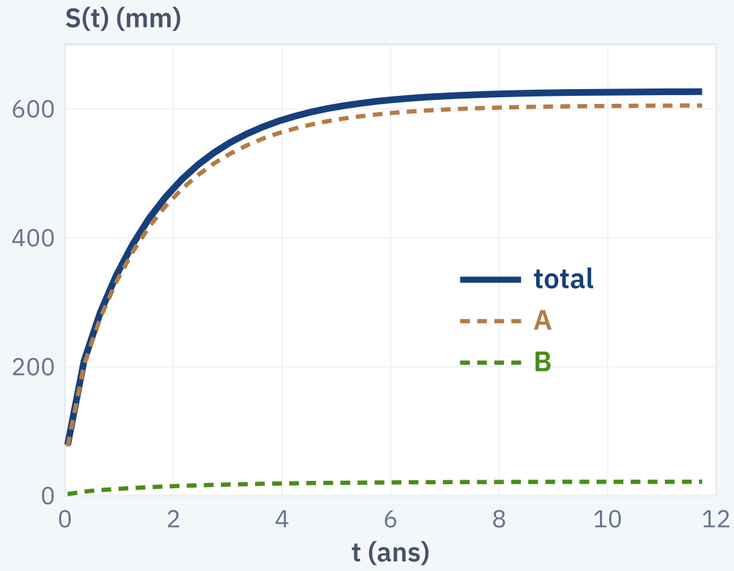
La courbe du système est la somme $S(t) = U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$; ses temps propres se lisent sur cette somme : **t_{50} = 0.794 an, t_{90} = 3.43 ans** (proches de la couche dominante A).

Solution (3/3)

SOLUTION

t (ans)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000

56 % du tassement est achevé en 1 an et 96 % en 5 ans ; il se termine en environ 10 ans (627 mm). La courbe est gouvernée par la **couche molle A**.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Points à retenir lors de la lecture des résultats

THÉORIE

Niveau de la semelle = fond de fouille (surface du terrain s'il n'y a pas de fouille) ; pression interstitielle **hydrostatique** ; la nappe n'est pas affectée par la fouille.

L'accroissement de contrainte est pris **sur la verticale passant par le centre de la fondation** (tranches et analyse en fonction du temps) ; les zones de couleur suivent le même chemin de contraintes en chaque point.

e_0 est l'indice des vides initial à chaque phase ; **il n'y a pas de compression secondaire (C_α)**.

Le tassement est positif, le gonflement négatif ; le sélecteur de l'en-tête inverse cette convention et passe à l'affichage positif vers le haut (le moteur de calcul reste classique).

Bandes de couleurs : les zones qui décroissent rapidement avec la profondeur, comme le tassement, le gonflement et la déformation, sont représentées selon les classes $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$; des bandes égales feraient tenir toute la zone inférieure dans une seule couleur.

Synthèse

Points à retenir

Chemin de contrainte : $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}$ (C_s) $\rightarrow \sigma'_p$ (C_r) $\rightarrow \sigma'_{fin}$ (C_c) ; $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, ne diminue pas avec la fouille

Compression de la tranche $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC : C_c f $\log(\sigma'_{fin}/\sigma'_{v0})$; OC et $\sigma'_{fin} \leq \sigma'_p$: C_r f log(…) ; $\sigma'_{fin} > \sigma'_p$: parties C_r + C_c

Fouille : $q_{sou} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, soulèvement = $-C_s$ f $\log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{soul}$ (sol d'origine) ou S_c (remis à zéro)

Boussinesq : $\Delta\sigma = q\ I_z(z')$; centre du rectangle 4 I_{ang}, semelle filante $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (semelle carrée 2.09 B, L = 1.5 B 2.55 B, semelle filante 6.34 B)

Méthode $\mathbf{m_v}$: $\Delta H = m_v\ \Delta\sigma'\ H$, linéaire ; gonflement = $-m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\ H$

Temps : $T_v = C_v\ t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (simple) ou H/2 (double) ; $S(t) = \Sigma\ U_i\ S_{c,i}$

Références bibliographiques

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

REMARQUE

Tous les exemples numériques ont été produits avec le moteur de calcul propre au module, et le module donne les mêmes valeurs (tranches de l'exemple : dz = épaisseur de la couche).

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Calculer les exemples de cette présentation pas à pas dans GeoTerva ; dans le module, le nombre de couches et la fouille se saisissent librement.

Ouvrir le module → | **Page de théorie →**

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

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