

DYNAMIQUE DES SOLS

Chapitre 5

Liquéfaction des sols

Exercices

Prof. Mohamed KHEMISSA

*Département de Génie Civil, Faculté de Technologie,
Université Mohamed Boudiaf – M'Sila*

Ex. 1 Calculer le coefficient de sécurité à la liquéfaction sous un séisme d'accélération maximale $a_{max} = 0.3g$ d'un massif de sable homogène d'épaisseur $h = 5 \text{ m}$, de poids volumique saturé $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ et de résistance au cisaillement cyclique $\tau_l = 20 \text{ kPa}$. Commenter le résultat trouvé.

Rép. 1

A. Coefficient de sécurité à la liquéfaction

- Résistance au cisaillement cyclique :

$$\tau_l = 20 \text{ kPa}$$

- Contrainte de cisaillement équivalente :

$$\tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

avec : $\gamma = \gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$

$$h = 5 \text{ m}$$

$$a_{max} = 0.3g$$

$$r_d = 1 - 0.012h = 1 - 0.012 \times 5 = 0.94$$

Soit donc :

$$\tau_{eq} = \frac{2}{3} \times \frac{21 \times 5}{g} \times 0.3g \times 0.94 = 19.74 \text{ kPa}$$

- Coefficient de sécurité à la liquéfaction :

$$F_L = \frac{\tau_l}{\tau_{eq}}$$

$$\Rightarrow F_L = \frac{20}{19.74} = 1.01$$

B. Commentaire

$F_L \approx 1 \Rightarrow$ Le sol se trouve dans un état critique, c'est-à-dire à la limite de la liquéfaction.

Ex. 2 Soit un massif de sable homogène d'épaisseur $h = 10 \text{ m}$, de poids volumique saturé $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ et de résistance au cisaillement cyclique $\tau_l = 20 \text{ kPa}$. Calculer l'accélération sismique maximale a_{max} à partir de laquelle ce massif de sable commence à se liquéfier. Si l'on considère l'exercice Ex. 1, quel commentaire pourrait-on alors faire vis-à-vis de la résistance à la liquéfaction du massif de sable.

Rép. 2

A. Accélération sismique maximale

Le massif de sable commence à se liquéfier lorsque sa résistance au cisaillement cyclique τ_l serait inférieure à la contrainte de cisaillement équivalente τ_{eq} , c'est-à-dire lorsque le coefficient de sécurité à la liquéfaction $F_L < 1$. Soit donc :

$$F_L = \frac{\tau_l}{\tau_{eq}} < 1$$

D'où :

$$\tau_{eq} > \tau_l$$

Sachant que :

$$\tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

On a alors :

$$a_{max} > \frac{3}{2} \cdot \frac{g}{\gamma \cdot h} \cdot \frac{\tau_l}{r_d}$$

avec : $\gamma = \gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$

$$h = 10 \text{ m}$$

$$r_d = 1 - 0.012h = 1 - 0.012 \times 10 = 0.88$$

$$\tau_l = 20 \text{ kPa}$$

Soit donc :

$$a_{max} > \frac{3}{2} \times \frac{g}{21 \times 10} \times \frac{20}{0.88} = 0.16g$$

B. Commentaire

$$a_{max}|_{h=10 \text{ m}} = 0.16g < a_{max}|_{h=5 \text{ m}} = 0.3g$$

⇒ Plus le massif de sable est épais, plus il est susceptible de se liquéfier.

Ex. 3 Soit une couche de sable de poids volumique saturé $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$ et d'épaisseur $h = 10 \text{ m}$ soumise à une accélération sismique maximale $a_{max} = 0.4g$.

- Déterminer la résistance au cisaillement cyclique critique du sable.
- Des mesures au SPT montrent que la résistance au cisaillement cyclique maximale est de l'ordre de $\tau_l = 30 \text{ kPa}$. Quel serait donc le coefficient de sécurité à la liquéfaction sous un séisme d'accélération maximale $a_{max} = 0.4g$. Commenter le résultat trouvé.
- Quelle serait alors l'accélération sismique maximale limite à ne pas dépasser pour qu'il n'y ait pas apparition de liquéfaction selon les mesures au SPT.

Rép. 3

A. Résistance au cisaillement cyclique

La résistance au cisaillement cyclique critique correspond à un coefficient de sécurité à la liquéfaction critique. Soit donc :

$$(F_L)_{cri} = \frac{(\tau_l)_{cri}}{\tau_{eq}} = 1 \quad | \quad \tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

D'où :

$$(\tau_l)_{cri} = \tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

avec : $\gamma = \gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$

$h = 10 \text{ m}$

$r_d = 1 - 0.012h = 1 - 0.012 \times 10 = 0.88$

$a_{max} = 0.4g$

Soit donc :

$$(\tau_l)_{cri} = \frac{2}{3} \times \frac{20 \times 10}{g} \times 0.4g \times 0.88 = 46.93 \text{ kPa}$$

B. Coefficient de sécurité à la liquéfaction

- Résistance au cisaillement cyclique :

$$\tau_l = 30 \text{ kPa}$$

- Contrainte de cisaillement équivalente :

$$\tau_{eq} = (\tau_l)_{cri} = 46.93 \text{ kPa}$$

- Coefficient de sécurité à la liquéfaction :

$$F_L = \frac{\tau_l}{\tau_{eq}}$$

$$\Rightarrow F_L = \frac{30}{46.93} = 0.64$$

- Commentaire :

$$F_L = 0.64 < 1$$

⇒ Il y a liquéfaction de la couche de sable.
 Les mesures au SPT montrent bien que la couche de sable ne résiste pas à l'accélération sismique maximale $a_{max} = 0.4g$.

C. Accélération sismique maximale limite

Elle correspond à une contrainte de cisaillement équivalente τ_{eq} égale à la résistance au cisaillement cyclique τ_l du sable, c'est-à-dire lorsque le coefficient de sécurité à la liquéfaction $F_L = 1$. Soit donc :

$$F_L = \frac{\tau_l}{\tau_{eq}} = 1$$

D'où :

$$\tau_{eq} = \tau_l$$

Sachant que :

$$\tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

On a alors :

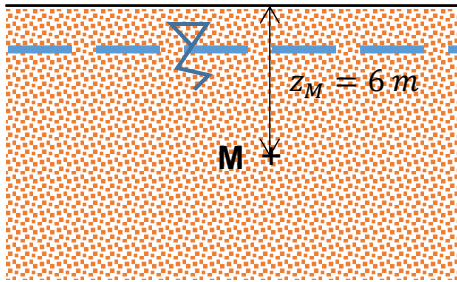
$$(a_{max})_l = \frac{3}{2} \cdot \frac{g}{\gamma \cdot h} \cdot \frac{\tau_l}{r_d}$$

avec : $\tau_l = 30 \text{ kPa}$

Soit donc :

$$(a_{max})_l = \frac{3}{2} \times \frac{g}{20 \times 10} \times \frac{30}{0.88} = 0.25g$$

Ex. 4 (Interro. du 17/05/2022). Considérons le profil de sol sableux roulé suivant :



Sable roulé

- Poids volumique saturé $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$
- Angle de frottement interne effectif $\varphi' = 30^\circ$
- Indice des vides en place $e_o = 0.8$
- Densité relative $D_r = 40\%$
- Accélération de la pesanteur $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Calculer au point M la résistance au cisaillement cyclique critique permettant à ce massif sableux saturé de ne pas se liquéfier sous une accélération sismique maximale $a_{max} = 0.4g$.

Rép. 4

La résistance au cisaillement cyclique critique correspond à un coefficient de sécurité à la liquéfaction critique. Soit donc :

$$(F_L)_{cri} = \frac{(\tau_l)_{cri}}{\tau_{eq}} = 1 \quad | \quad \tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

D'où :

$$(\tau_l)_{cri} = \tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

avec : $\gamma = \gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$

$$h = 6 \text{ m}$$

$$r_d = 1 - 0.012h = 1 - 0.012 \times 6 = 0.928$$

$$a_{max} = 0.4g$$

Soit donc :

$$(\tau_l)_{cri} = \frac{2}{3} \times \frac{20 \times 6}{9.81} \times 0.4g \times 0.928 = 29.696 \text{ kPa}$$