

Chapitre 2

TASSEMENT ET CONSOLIDATION DES SOLS

2.1 Notions de déformation

Sous l'application de charges, le sol comme tout solide se déforme. Pour déterminer les déformations qui ont lieu dans toutes les directions autour du point M du sol, il suffit de connaître les valeurs des déformations dans les directions Ox, Oy et Oz autour de ce point. On définit ainsi le tenseur de déformations :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

Les déformations sont reliées aux déplacements u,v,w par les relations :

- Elongations : $\varepsilon_x = \partial u / \partial x$; $\varepsilon_y = \partial u / \partial y$ et $\varepsilon_z = \partial u / \partial z$
- Distorsions : $\gamma_{xy} = 2 \varepsilon_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$
 $\gamma_{xz} = 2 \varepsilon_{xz} = \partial u / \partial z + \partial w / \partial x$
 $\gamma_{yz} = 2 \varepsilon_{yz} = \partial u / \partial z + \partial w / \partial y$

ε_{ij} sont les déformations de cisaillement

La variation de volume du petit élément autour du point M est : $\Delta V / V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ (2.1)

Il existe aussi trois directions principales pour lesquelles les déformations angulaires sont nulles ($\gamma_{ij} = 0$). Ces directions sont appelées directions principales de déformation, et les déformations principales sont notées : ε_1 , ε_2 et ε_3 .

2.2 Relations contraintes - déformations

Ces relations sont appelées « lois de comportement » puisqu'elles permettent de caractériser la réponse d'un matériau sous l'effet d'un chargement.

Dans le domaine de déformations élastiques dans un solide isotrope, les relations entre les contraintes et les déformations (loi Hooke) sont :

E: module d'élasticité longitudinal.

v: coefficient de Poisson.

G: module de cisaillement transversal.

$$G = E / [2(1+v)]$$

E et **v** peuvent être déterminés à partir des résultats d'essais en laboratoire ou in-situ.

2.3 Tassements des sols-Consolidation

Sous l'effet d'un chargement donné (fondation, remblai, etc..), le sol se déforme. On sait que dans la plus part des cas, la surface du sol est horizontale et les charges sont verticales ; les déformations et par conséquent les déplacements, seront dans la même direction. Ils sont appelés tassements.

Pour un sol, les tassements résultent essentiellement de sa compressibilité (diminution de volume) qui est dû :

- à la compression du squelette solide,
- à l'évacuation de l'eau contenue dans les vides,
- et à la compression de l'eau et de l'air contenus dans les vides.

A noter que pour les contraintes courantes l'eau et le squelette solide peuvent être considérés incompressibles.

Dans le cas des sols grenus (sable et gravier ayant un coefficient de perméabilité élevé), saturés ou non, le tassement est immédiat Δh_i .

Pour les sols fins saturés (faible coefficient de perméabilité), sous l'action d'une charge, l'eau libre ne peut s'évacuer immédiatement et supporte toutes les contraintes appliquées (suppressions interstitielles $\Delta u = \Delta \sigma$) pendant la phase de construction de l'ouvrage ; on aura le tassement immédiat Δh_i .

La transmission des contraintes au squelette solide se fait progressivement au cours du drainage de l'eau et les suppressions interstitielles diminuent. Cet écoulement s'arrête lorsque Δu s'annule ; on obtient donc le tassement à long terme ou le tassement final de consolidation primaire Δh_c .

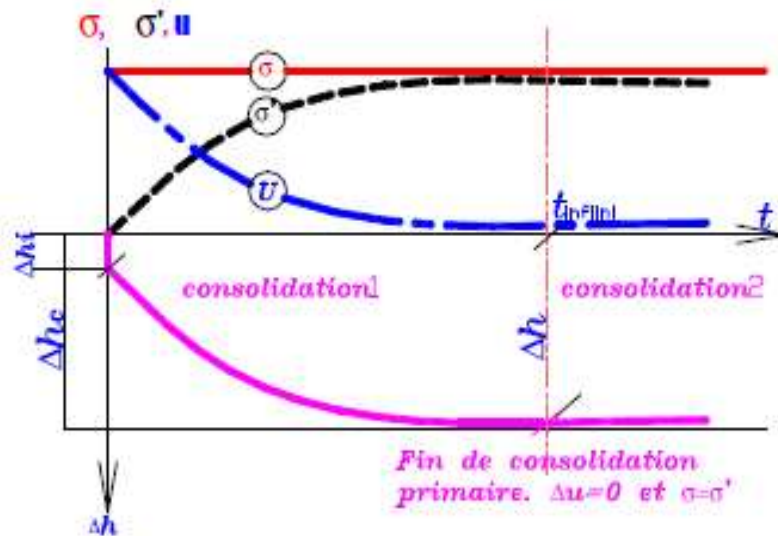


Fig. 2.1 Tassement finale de la consolidation primaire

À t_{infini} : $\Delta h = \Delta h_i + \Delta h_c$

À un instant (t) : $\Delta h(t) = \Delta h_i + \Delta h_c(t)$

2.3.1 Relations entre le tassement, l'indice des vides et la contrainte effective

Pour une couche de sol de hauteur « h » et d'indice des vides initial « e_0 », après un chargement donné et à un instant « t », on a ;

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} = \frac{\Delta h}{h} \dots \dots \dots (1)$$

Δh et e sont le tassement et l'indice des vides à l'instant « t ».

Exemple :

Une couche de sol possédait les caractéristiques suivantes : épaisseur égale à 10m, indice des vides égal à 1,0. Après la construction d'un remblai, la couche s'est consolidée. L'indice des vides final n'était que de 0,8. Calculer le tassement de la couche de sol.

L'utilisation pratique de l'expression en dessus

Pour déterminer la relation entre l'indice des vides et la contrainte σ due à l'action des charges, on doit réaliser un essai oedométrique qui permet d'étudier la consolidation des sols (amplitudes et durée des tassements pour une charge donnée)

L'essai consiste à placer un échantillon de sol saturé dans un moule cylindrique indéformable (module oedométrique) et de le charger verticalement (charge constante) jusqu'à dissipation des surpressions interstitielles, tout en mesurant les tassements.

En appliquant un chargement discontinu par paliers et en déterminant la contrainte effective σ' et l'indice des vides « e » pour chaque palier de chargement, on peut tracer la courbe : $e = f(\log \sigma')$ appelée courbe oedométrique. Cette courbe peut être schématisée par la figure suivante.

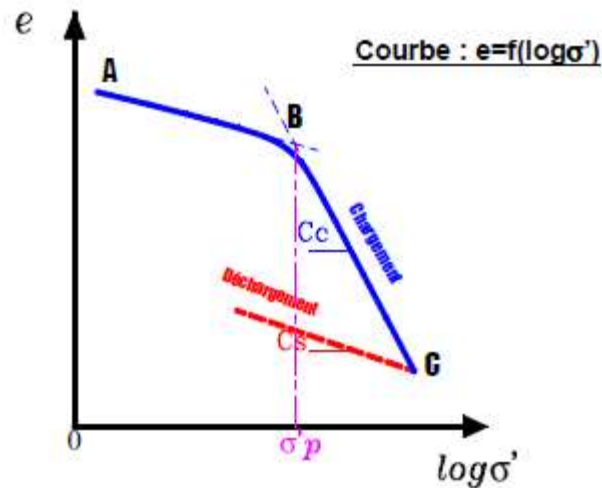


Fig. 2.2 courbe indice des vides en fonction de la contrainte effective.

On déduit de cette courbe :

- L'indice de compression (pente de la droite BC): $C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \dots \dots \dots (2)$

- L'indice de gonflement (pente de la droite DC): $C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \dots \dots \dots (3)$

- La pression de préconsolidation : σ'_p C'est la plus grande contrainte qu'a supporté le sol durant son histoire géologique.

Le rapport de surconsolidation (R_{oc}) nous permet de connaître l'état de consolidation du sol. Il est défini par :

$$R_{oc} = \sigma'_p / \sigma'_0 \dots \dots \dots (4)$$

σ'_0 : Contrainte effective verticale du sol en place.

- Si $R_{oc} = 1$, le sol est normalement consolidé, c.à.d qu'il n'a jamais été le site d'une érosion ou supporté des surcharges (Glaciers..) qui en suite ont disparue. Ces sols sont sujettes à développer des grands tassements, puisque toute surcharge peut augmenter la contrainte effective à un niveau que le sol n'a jamais atteint, ce qui pourra réduire considérablement l'indice des vides.

- Si **Roc > 1**, le sol est surconsolidé. Dans ce cas les tassements seront très faibles tant que la contrainte effective finale est inférieure à la pression de préconsolidation. Dans le cas contraire les tassements seront plus prononcés.
- Si **Roc < 1**, le sol est sousconsolidé. C'est le cas des sols en cours de formation (vases, etc.).

2.4 Evolution du tassement au cours du temps

2.4.1 Tassement final de consolidation primaire

Pour une couche de sol de hauteur « h », d'indice de compression « Cc », d'indice de gonflement « Cs » et de pression de préconsolidation « σ_p' », si la contrainte verticale initiale due aux poids propres du sol est « σ_o' », calculée au centre de la couche et si le chargement provoque un supplément de contrainte $\Delta\sigma$, les tassements se calculent comme suit :

- **Roc = 1**: le sol est normalement consolidé :

$$\Delta h_c = \frac{C_c}{1+e_o} h \log \left(\frac{\sigma_o' + \Delta\sigma}{\sigma_o'} \right) \dots\dots\dots(5)$$

- **Roc > 1** : le sol est sur consolidé : Deux cas peuvent se présenter :

- Si $\sigma_o' + \Delta\sigma > \sigma_p'$ alors :

$$\Delta h_c = \frac{C_s}{1+e_o} h \log \left(\frac{\sigma_p'}{\sigma_o'} \right) + \frac{C_c}{1+e_o} h \log \left(\frac{\sigma_o' + \Delta\sigma}{\sigma_p'} \right) \dots\dots\dots(6)$$

- Si $\sigma_o' + \Delta\sigma < \sigma_p'$ alors :

$$\Delta h_c = \frac{C_c}{1+e_o} h \log \left(\frac{\sigma_o' + \Delta\sigma}{\sigma_p'} \right) \dots\dots\dots(7)$$

- **Roc < 1**: le sol est sous consolidé :

$$\Delta h_c = \frac{C_c}{1+e_o} h \log \left(\frac{\sigma_o' + \Delta\sigma}{\sigma_o'} \right) \dots\dots\dots(8)$$

On doit noter que :

- Si le sol est composé de plusieurs couches compressibles, le tassement total sera la somme des tassements de chaque couche.
- Si la hauteur de la couche est supérieure à 3m, on subdivisera la couche en sous couches.

2.4.2 Tassement à un instant « t »

Le tassement à un temps donné $\Delta h_c(t)$ est calculé en fonction du tassement final Δh_c , à partir de la formule suivante :

$$\Delta h_c(t) = U \cdot \Delta h_c \dots\dots\dots(9)$$

U : étant le degré de consolidation moyen défini à un instant « t » par la relation :

$$U = 1 - \frac{\int_0^h u(z, t) dz}{\int_0^h u(z, 0) dz} = 1 - \frac{\Delta u(t)}{\Delta u(0)}$$

$\Delta u(t)$: surpression interstitielle au temps t.

$\Delta u(0)$: surpression interstitielle à l'instant initiale ($\Delta \sigma$).

Pour déterminer le degré de consolidation « U », il suffit de déterminer l'équation de $u(z, t)$.

La théorie de consolidation unidimensionnelle de Terzaghi, basée sur des hypothèses simplifiées nous donne l'équation de consolidation en fonction du coefficient de consolidation: C_v (déterminé à partir de la courbe du tassement en fonction du temps pour un des paliers de chargement de l'essai œdométrique).

On peut alors déterminer le degré de consolidation U pour un temps « t », ou plutôt pour un facteur temps « T_v » fonction du temps, C_v et des conditions de drainage :

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H'^2} \dots\dots\dots(10)$$

H' : représente le chemin de drainage.

Pour une couche de hauteur h :

$H' = h/2$ si la couche est doublement drainée.

$H' = h$ si couche est simplement drainée.

Le tableau 2.1 suivant donne les valeurs de U en fonction de T_v

Tableau 2.1 les valeurs de U en fonction de T_v

U (%)	T_v	U (%)	T_v
12	0.01	70	0.40
20	0.03	80	0.57
30	0.07	90	0.85
40	0.13	95	1.20
50	0.20	99	2.00
60	0.29	100	2.08

Notons que pour la fin de la consolidation primaire ($U=100\%$), on prendra $T_v=2.08$ (correspondant à un degré de consolidation de 99.5%).

2.5 Contrainte effective et pression interstitielle au cours du temps

A une profondeur « z » et à un instant « t » donnés, le degré de consolidation U_z est calculé à partir de la relation :

$$U_z = 1 - \frac{u(z, t)}{u(z, 0)}$$

U_z est déterminé en fonction de T_v et Z/H' .

(Z est compté à partir du niveau supérieur de la couche compressible étudiée).

La pression interstitielle : $u(z, t) = (1 - U_z) \Delta \sigma(z)$.

La contrainte effective : $\sigma'(z, t) = U_z \cdot \Delta \sigma(z)$, puisque $u(z, 0) = \Delta \sigma(z)$.

2.6 Conclusion

La méthode de calcul du tassement selon la théorie de consolidation est considérée l'une des plus célèbres agréées dans le domaine de la mécanique des sols et de la géotechnique. Ce, malgré toutes les conditions et hypothèses imposées en vue d'être utilisée. Ce mérite insinue de la complexité du phénomène de tassement des sols et rareté des méthodes qui répondent à ce sujet.

QUESTIONS A DEBATTRE

1. Pourquoi un sol tasse suite à un rabattement de la nappe ?
2. Une nouvelle fondation, peut-elle transmettre des charges à une fondation proche existante ?
3. Pourquoi les tassements surviennent-ils plus rapidement dans les sols à gros grains que dans les sols à grains fins ?