

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Pression de Gonflement—Pression de Consolidation

Swelling Pressure and Consolidation Pressure

L. PAREZ Ing. E.C.P., Sol-Essais,
M. BACHELIER Ing. E.T.P., Prof. Ecole Beaux Arts, Sol-Essais, Colombes, France

RESUME. Après un bref exposé du dispositif de mesure de la pression de gonflement à l'oedomètre électrique, avec système asservi, les auteurs proposent une méthode de détermination plus précise de la pression de consolidation à partir d'un modèle basé sur la considération de l'énergie potentielle élastique accumulée puis restituée.

La pression de consolidation d'une couche argileuse est une valeur qui se détermine à partir de "constructions" plus ou moins empiriques, telle celle dite de CASAGRANDE sur un graphique oedométrique.

Nous avons cherché à préciser cette valeur à partir de l'hypothèse suivante :

Un échantillon de sol intact, consolidé sous une pression verticale p_c subit une détente élastique lorsqu'il est libéré un certain temps de toute contrainte extérieure. La variation de volume s'effectue entre la contrainte initiale p_c et la contrainte finale p_g dite pression de gonflement, cette dernière équilibrée par la résultante des tensions capillaires σ_c .

Nous montrons la similitude des champs uniaxial et sphérique du point de vue de l'énergie potentielle élastique accumulée par consolidation et de l'énergie restituée à la détente, avec une justification expérimentale sur modèle.

PRINCIPE DE LA CHAÎNE DE MESURE AUTOMATIQUE DE LA PRESSION DE GONFLEMENT (fig. 1)

L'oedomètre (échantillon A) est équipé d'un bras de levier de chargement avec rail de roulement pour poids mobile (P) tracté par une tige filetée mue par un moteur (D) à courant continu placé en bout.

Le capteur de déplacement linéaire (B) utilisé à une course de $\pm 25 \mu$.

Le capteur transforme le déplacement x du piston en une tension continue u , devenant U après amplification (C) qui est appliquée au moteur.

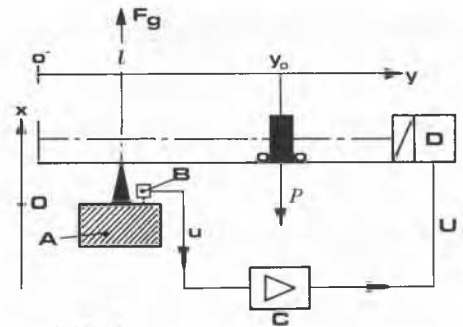


Fig. 1

La rotation du moteur a lieu dans un sens tel que le déplacement du poids mobile vienne s'opposer au déplacement de la tête du piston. A l'équilibre, la relation $Fg \times l - P \cdot y_0 = 0$ fournit la valeur de la force Fg d'où p_g .

Energie potentielle élastique

Le volume unitaire V a pour longueurs d'arêtes dx , dy , dz dans $Oxyz$. On suppose la facette d'abscisse dx mobile, les autres fixes.

La force appliquée sur la facette mobile passe de 0 à $\sigma_x \cdot dy \cdot dz$ et le déplacement de cette facette de 0 à $\epsilon_x \cdot dx$.

Les contraintes produisant les déformations effectuent un certain travail dW entre un état d'équilibre initial et un état d'équilibre final. Ce travail est récupérable si

les contraintes cessent ou diminuent. C'est l'énergie potentielle élastique

$$dW_x = \frac{1}{2}(\sigma_x \cdot dy \cdot dz) (\epsilon_x \cdot dx)$$

d'où le travail total :

$$dW = \frac{1}{2}(\sigma_x \cdot \epsilon_x + \sigma_y \cdot \epsilon_y + \sigma_z \cdot \epsilon_z)(dx \cdot dy \cdot dz)$$

Par unité de volume, on a $\frac{dW}{V} = \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma, \xi)$

Σ tenseur des contraintes,
 ξ tenseur des déformations.

Combinant avec la loi de HOOKE généralisée

$$\xi = \frac{1}{E} \cdot \Sigma - \frac{\nu}{E} \cdot s \cdot \bar{I}$$

$$s = \text{tr} \Sigma = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad \bar{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\frac{dW}{V} = \frac{1}{2} [(\lambda + 2\nu)e^2 - 4\mu \cdot e_2]$$

λ et ν coefficients de Lamé

$$e = \frac{1 - 2\nu}{E} \cdot s$$

$$e_2 = \epsilon_y \cdot \epsilon_z + \epsilon_z \cdot \epsilon_x + \epsilon_x \cdot \epsilon_y$$

Etats d'équilibre initial et final

(a) in situ

$$\sigma_z = \gamma z = p_0 = p_c \quad \epsilon_z = \frac{p_0}{E}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \quad \epsilon_x = \epsilon_y = -\frac{\nu}{E} \cdot p_0$$

(b) sur le solide extrait

$$\sigma = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \frac{1 + \nu}{E} (3\sigma) - \frac{\nu}{E} (3s)$$

$$\text{d'où } \frac{\Delta V}{V} = \frac{3(1 - 2\nu)}{E} \cdot \sigma$$

$$\text{ou } \frac{\Delta V}{V} = \frac{3(1 - 2\nu)}{E} \cdot (p_c - p_g) \quad (1)$$

d'après notre hypothèse.

Les énergies potentielles correspondantes sont :

Etat initial (a) :

$$\frac{dW}{V} = 0,5 \frac{p_0^2}{E} \text{ indépendante de } \nu$$

Etat final (b) :

$$\frac{dW}{V} = \frac{3(1 - 2\nu)}{2E} \cdot (p_0 - p_g)^2$$

Nous ferons $\nu = 0,25$, d'où les variations de volume

$$(a) \frac{\Delta V}{V} = \frac{0,5}{E} \cdot p_0$$

$$(b) \frac{\Delta V}{V} = \frac{1,5}{E} \cdot (p_0 - p_g)$$

Soit ρ le rapport de l'énergie restituée dans le champ sphérique à l'énergie accumulée dans le champ axial, il vient :

$$\rho = 3(1 - 2\nu) \left[\frac{p_0 - p_g}{p_0} \right]^2$$

et pour $\nu = 0,25$ $\rho = 1,5 \frac{(p_0 - p_g)^2}{p_0^2}$

Le couple (ρ, p_g) décrit le domaine hachuré (fig. 2).

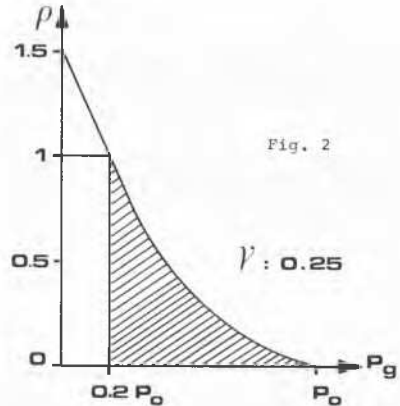


Fig. 2

La borne supérieure $(0, p_g)$ correspond à un sol nu, ne subissant aucune variation de volume, conserve intégralement l'énergie accumulée. On mesure alors $n_1 = p_0$, c'est le sol idéal.

La borne inférieure $(1, 0,2 p_0)$ résulte des hypothèses admises.

On voit que le sol resterait contraint sous une étreinte p_0 mini. = $0,2 p_0$.

Comme l'a montré HABIB (1), cette contrainte est équilibrée par la résultante des tensions capillaires sur le contour de l'échantillon. Elle varie au cours du temps de préparation si la résultante σ_c des actions capillaires varie effectivement (Fig. 3).

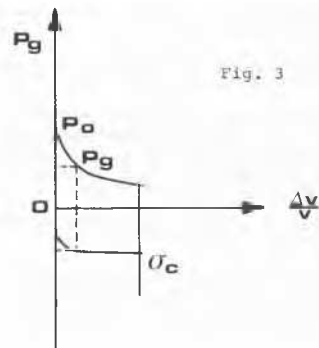


Fig. 3

Rappelons TEPZACHT (II) "... Avec l'évaporation, les ménisques ont tendance à se retirer vers l'intérieur. La tension capillaire s'y opposant, la courbure des ménisques s'accroît. La composante axiale des forces capillaires grandit parallèlement ...".

Il en résulte le schéma de la figure 3.

Généralement, la pression de gonflement est une valeur intermédiaire : l'énergie accumulée n'est pas totalement réversible.

Par ailleurs, la mesure de p_g est faite après détente sphérique de l'échantillon et dans un appareil uni-axial.

On admet cependant la similitude des énergies accumulées et restituées. Observons d'ailleurs que les divergences $\Delta V/V$ du vecteur déplacement calculées ci-dessus, sont de même forme et de signes opposés, correspondant à un flux entrant et à un flux sortant. L'étude expérimentale, dans laquelle nous nous donnons, a priori, la pression de consolidation p_0 montre la validité de cette hypothèse.

Résultats statistiques

Notre laboratoire a effectué une trentaine de mesures de la pression de gonflement sur échantillons d'origines géologiques différentes, allant de l'argile franche aux limons sableux. Pour chaque détermination, on a évalué le rapport p_g/PC (p_c étant la pression de consolidation de CASAGRANDE).

Les résultats sont traduits, figure 4, en courbe de fréquence.

N étant le % du nombre des cas où l'on a $\frac{p_g}{PC} > l'$ abscisse, on constate :

94 % des cas donnent $\frac{p_g}{PC} > 12 \%$

50 % des cas donnent $\frac{p_g}{PC} > 28 \%$

. pour les sols très cohérents (marnes vertes argiles plastiques ...) l'étreinte capillaire étant très grande, on a : p_g observée > p_g mini. théorique,

. pour les limons sableux, l'étreinte étant faible, on a : p_g observée = p_g mini. théorique.

Processus expérimental

Un échantillon modèle est consolidé sous une pression p_c donnée. L'appareillage correspond à un oedomètre dont la paroi latérale est constituée par le tube de transport des prélèvements intacts. L'échantillon modèle a un diamètre de 89 mm pour une hauteur de 40 mm. Il est consolidé trois mois sous la pression p_c .

Après consolidation, l'échantillon extrait est équivalant à la partie d'un prélèvement intact destinée à l'essai oedométrique.

Il subit la détente élastique dans les conditions de préopération normale.

On mesure avec précision le poids volumique $(\gamma_d)_{2-1}$ après consolidation et le poids volumique $(\gamma_d)_{2-2}$ après préparation oedométrique normale, d'où $(\Delta V/V)_2$ correspondant à la détente élastique.

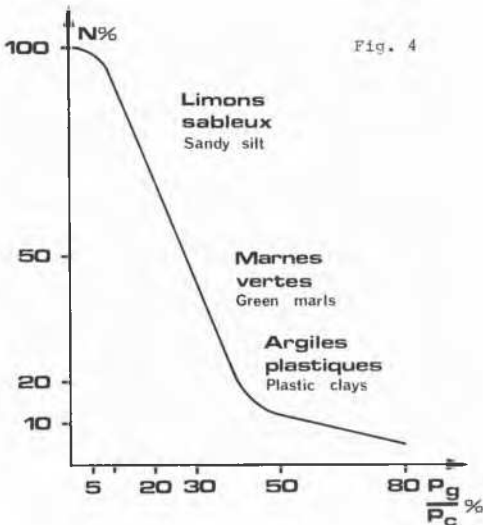
On procède à la mise en eau et à la mesure de la pression de gonflement p_g comme indiqué ci-dessus.

L'essai est ensuite conduit jusqu'à 1 MPa pour tracé de la pression de consolidation approchée de CASAGRANDE, soit p_c .

Sur un échantillon identique à l'échantillon oedométrique, on effectue une consolidation triaxiale sous une étreinte latérale égale à p_c ou légèrement supérieure.

On procède ensuite à la vidange complète de la pierre et de l'embase inférieures, mettant ainsi l'enrouvette au contact de la pression atmosphérique et l'on fait décroître la pression hydrostatique jusqu'à une valeur voisine de zéro, compatible avec la stabilité de l'enrouvette.

De cette manière, le modèle évolue entre une étreinte initiale voisine de p_c et une étreinte étreinte capillaire voisine de p_g . La variation de volume élastique concomitante $(\Delta V/V)_1$ est mesurée avec une grande précision (1 cm³ pour une dénivelée manométrique de 57 mm).



Résultats de quelques expériences sur argiles plastiques dans lesquelles la détente élastique a été particulièrement importante au cours d'une préparation oedométrique prolongée.

p_c en kPa (3 mois de consolidation)	p_g en kPa	p_c en kPa	$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_2$	$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_1$	p_c calculée en kPa
200	123	137	$\frac{1,636 - 1,551}{1,551}$	$\frac{0,60}{68,86}$	211
320	72	130	$\frac{1,803 - 1,744}{1,744}$	$\frac{0,50}{62,36}$	317
400	146	190	$\frac{1,635 - 1,534}{1,534}$	$\frac{0,80}{67,8}$	392

Des équations précédentes, on déduit la formule (2) :

$$p_c = p_g + m(p_c - p_g) \text{ avec } m = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_2}{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_1} \quad (2)$$

avec p_g pression de gonflement

p_c pression de CASAGRANDE ou étreinte triaxiale.

REFERENCES.

(I) HABIB - 1952 - LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES SOLS - Thèse de Doctorat - Université de PARIS.

(II) TERZAGHI Karl - THEORETICAL SOIL MECHANICS - NEW YORK John Wiley and Sons - 1943

CONCLUSION.

Le processus proposé pour une approximation meilleure de la pression de consolidation est donc le suivant. Sur échantillon intact du sondage :

- mesure de la pression de gonflement p_g
- détermination usuelle de la pression de consolidation approchée dite de CASAGRANDE p_c
- mesure de la variation de volume élastique correspondant à la préparation oedométrique soit $(\Delta V/V)_2$
- reconsolidation triaxiale d'une éprouvette de sol étudié sous une étreinte hydrostatique égale ou supérieure à p_c . Après consolidation, mise au contact de la pression atmosphérique et diminution de l'étreinte hydrostatique jusqu'à une valeur aussi voisine de zéro que l'on pourra, mesure de la variation de volume élastique correspondante $(\Delta V/V)_1$.

La pression de consolidation cherchée p_c est donnée par la formule (2).

Noter que la méthode n'est pas limitative. Elle peut être généralisée entre l'état initial in situ, jusqu'à l'état final après transport, préparation et mise en place dans les appareils de laboratoire.