Identification Discrète des Paramètres Elasto-Plastiques des Sols Pulvérulents à partir des Essais Biaxial et Pressiométrique

Ngoc Han VU – Damien RANGEARD – Juan MARTINEZ

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (EA 3913) INSA de Rennes 20 avenue des Buttes de Coesmes 35043 Rennes {ngoc-han.vu, damien.rangeard, juan.martinez}@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. On simule par éléments distincts, les essais biaxial et pressiométrique en vue de l'identification des paramètres élasto-plastiques macroscopiques de milieux granulaires non cohésifs. L'essai biaxial fournit aisément l'ensemble des paramètres. Les résultats montrent les difficultés d'identification à partir de l'essai pressiométrique et l'intérêt de séparer l'identification des paramètres élastiques et plastiques.

ABSTRACT. Distinct element simulations of biaxial and pressuremeter tests are lead in order to identify the macroscopic elasto-plastic parameters of non cohesive granular media. The biaxial test provides quite easily the whole set of parameters. The results show the difficulties of the identification from the pressuremeter test and the interest of separating the identification of elastic parameters from this of plastic ones.

MOTS-CLÉS : éléments distincts, milieux granulaires, module de cisaillement, angle de frottement. KEYWORDS: distinct elements, granular media, shear modulus, friction angle.

1re soumission à AUGC 2006, le 1 mars 2006

2 1^{re} soumission à AUGC 2006

1. Introduction et Méthodologie

Dans cet article, on simule, par éléments distincts, les essais biaxial et pressiométrique pour identifier les paramètres élasto-plastiques des sols pulvérulents. En adoptant le modèle de Mohr-Coulomb, les paramètres à déterminer sont les paramètres élastiques (module d'Young E, coefficient de Poisson ν ou module de cisaillement G) et les paramètres plastiques (angle de frottement φ et angle de dilatance ψ). Dans le cas de l'essai biaxial, on peut déterminer ces paramètres directement à partir des résultats obtenus par la simulation. Dans le cas de l'essai pressiométrique, une solution analytique du problème aux limites (Rangeard *et al.*, 2004) est développé pour l'identification des paramètres par calcul inverse.

Dans cet article, on simule, par la Méthode des Eléments Distincts (Cundall, 1971), les essais biaxial et pressiométrique pour identifier les paramètres élasto-plastiques des sols pulvérulents. Dans le cas de l'essai biaxial, en utilisant des formules simples appliquées en deux dimensions, on peut déterminer ces paramètres (module d'Young E, coefficient de Poisson ν , angle de frottement ϕ et angle de dilatance ψ) à partir des résultats obtenus directement par la simulation. Dans le cas de l'essai pressiométrique, un modèle continu analytique (Rangeard *et al.*, 2004) va être développé pour l'identification des paramètres élasto-plastiques (Module de cisaillement G et angle de frottement ϕ).



Figure 1. Schéma de l'identification des paramètres élasto-plastiques macroscopiques à partir des essais biaxial et pressiométrique.

Les simulations par éléments distincts sont menées en 2D avec le code PFC^{2D} (Itasca Consulting Group, 1996-1999) et des particules de forme circulaire et de masse volumique $\rho = 2600 \ kg/m^3$. L'assemblage granulaire est constitué de particules de trois diamètres : 2, 3 et 4 mm avec des proportions pondérales de 25, 50 et 25 % respectivement. Le modèle de contact se compose de deux parties : (*i*) une partie élastique linéaire avec des rigidités normale k_n et tangentielle k_t ($k_n = k_t = 10^8 N/m$), et (*ii*) un critère de frottement de Coulomb de coefficient de frottement $\mu = 1$. Ces paramètres micromécaniques corespondent à des contacts moyennement rigides et assez frottants. Les procédures de l'identification sont présentées sur la figure 1.

2. Identification à partir de l'essai biaxial

2.1. Préparation des échantillons

Les dimensions de l'échantillon $(200 mm \times 200 mm)$ correspondent à un rapport entre le côté de l'échantillon et le diamètre maximal des particules égal à 50, et à un nombre total de particules égal à 5500 (Figure 2). Ces valeurs permettent de considérer l'échantillon comme un VER (Masson, 1997).



Figure 2. Echantillon utilisé pour la simulation de l'essai biaxial : (a) vue d'ensemble ; b) détail de l'échantillon.

Avant l'application de la sollicitation biaxiale, l'échantillon subit une phase de consolidation isotrope ($\sigma_x = \sigma_y = 90$ kPa) qui conduit à une porosité initiale β_0 et à une coordinance initiale z_0 respectivement égales à 0.19 et 2.8, ce qui correspond à un assemblage moyennment compact.

A partir de cet état initial, la contrainte axiale σ_y est appliquée par le déplacement des parois horizontales, en maintenant une contrainte latérale σ_x égale à la contrainte initiale. Le frottement entre particules et parois est nul par hypothèse (parois lisses). Afin d'assurer un régime quasi-statique, la vitesse de déplacement des parois horizontales est fixée à $10^{-4}m/s$ (Shafabakhsh, 1999).

4 1re soumission à AUGC 2006

2.2. Identification de paramètres macroscopiques

La simulation est réalisée en 2D avec une hypothèse de déformation plane ($\varepsilon_3 = \varepsilon_z = 0$), ε_3 étant la déformation perpendiculaire au plan de simulation (direction Oz).

Le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν sont donnés par :

$$E = (1 - \nu^2) \frac{\Delta \sigma_y}{\Delta \varepsilon_y}; \ \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_y} = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}$$
[1]

où $\Delta \sigma_y$ et $\Delta \varepsilon_y$ sont respectivement les incréments de contrainte et de déformation suivant la direction de sollicitation et $\Delta \varepsilon_v$ est l'incrément de la déformation volumique : $\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_y + \Delta \varepsilon_x$.

Le module de cisaillement G est déduit du module d'Young et du coefficient de Poisson en considérant le milieu isotrope.

Les angles de frottement φ et de dilatance ψ sont déterminés par :

$$\sin\varphi = \frac{(\sigma_y - \sigma_x)^{max}}{(\sigma_y + \sigma_x)^{max}}; \, \tan\psi = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_y}$$
[2]



Figure 3. *Résultat de l'essai biaxial simulé avec* $\sigma_x = 90kPa$.

Les résultats de la simulation sont présentés sur la Figure 3 qui met en évidence un caractère dilatant de l'échantillon. Les paramètres macroscopiques obtenus sont présentés dans le Tableau 1.

Ces paramètres correspondent à un sol moyennement rigide avec un angle de frottement macroscopique (18°) très inférieur à la valeur microscopique (45°) du fait de la forme circulaire des particules (Mahboubi *et al.*, 1996).

Identification des Paramètres de Sols 5

E (kPa)	8450
ν	0.38
G (kPa)	3100
φ (degrés)	18
ψ (degrés)	8

Tableau 1. Valeurs des paramètres macroscopiques déterminés à partir de l'essai biaxial.

3. Identification à partir de l'essai pressiométrique

3.1. Préparation des échantillons

Les paramètres micromécaniques sont identiques à ceux utilisés pour l'essai biaxial. L'essai pressiométrique présentant une symétrie de révolution dans le plan horizontal, on considère un quart de cercle (figure 4) de manière à limiter le nombre de particules. L'essai pressiométrique étant non homogène et à frontières infinies, le rayon du quart de cercle a été pris suffisamment grand (1200 mm) ce qui conduit à un nombre de particules d'environ 150 000. L'échantillon est limité par des frontières radiales fixes et des frontières circonférentielles mobiles. Les condition aux limites sont suivantes : déplacements normaux nuls aux frontières radiales ; contrainte normale constante sur la frontière circulaire extérieure ($p_0 = 90 \ kPa$). Compte tenu du diamètre maximal des particules, le rayon initial de la sonde a a été choisi égal à 100 mm afin d'obtenir une pression de contact sonde/sol suffisamment homogène. L'essai est simulé par le gonflement de la sonde avec une vitesse constante (5 mm/s).



Figure 4. *Echantillon utilisé pour la simulation de l'essai pressiométrique : (a) vue d'ensemble ; b) détail de l'échantillon.*

Un déplacement adéquat des frontières circulaires a permis d'obtenir un champ initial de contraintes isotrope $\sigma_r = \sigma_{\theta} = 90 \, kPa$, σ_r et σ_{θ} étant les contraintes radiale et circonférentielle. La porosité initiale β_0 et la coordinance initiale z_0 sont respectivement égales à 0.19 et 2.8 comme dans le cas de l'essai biaxial.

6 1re soumission à AUGC 2006

3.2. Solution analytique

On utilise ici une solution semi-analytique (Rangeard *et al.*, 2004) de l'expansion d'une cavité cylindrique en condition de déformations planes au sein d'un milieu fini élasto-plastique. Le comportement élastique est supposé linéaire isotrope. Le comportement plastique est défini par la fonction de charge $F(\sigma)$, correspondant au critère de Mohr-Coulomb :

$$F(\sigma) = \sigma_1 - \sigma_3 + \sin\varphi(\sigma_1 + \sigma_3)$$
[3]

et par la fonction d'écoulement $G(\sigma)$ non associée :

$$G(\sigma) = \sigma_1 - \sigma_3 + \sin\psi(\sigma_1 + \sigma_3) \tag{4}$$

La courbe pressiométrique s'exprime alors par :

$$\frac{u_a}{a} = \frac{C_2}{2G(n+N)} \left(\Delta p + p_0\right) - \frac{C_3 p_0}{n+1} + C_4 a^{-n-1}$$
^[5]

où $\frac{u_a}{a}$ et ΔP sont la déformation radiale et l'incrément de pression dans la sonde et n, N, C_2, C_3, C_4 sont des constantes fonction des paramètres géométriques ou mécaniques.

3.3. Identification de paramètres macroscopiques



Figure 5. Identification conjointe des paramètres mécaniques macroscopiques à partir de l'essai pressiométrique

La Figure 5 présente une première méthode d'indentification des paramètres mécaniques à partir de l'essai pressiométrique par calcul inverse. On approche la courbe pressiométrique obtenue par la simulation discrète, dans son ensemble, à l'aide de la solution analytique en utilisant une minimisation aux moindres carrés. L'optimisation porte sur les paramètres G et φ ; les valeurs de ν et de ψ étant fixées égales à celles obtenues par l'essai biaxial. Les résultats sont portés sur la Figure 5. Une méthode variante consiste à séparer l'identification des paramètres élastiques et plastiques. Au début du chargement, le comportement du sol est entièrement élastique. La courbe pressiométrique s'exprime alors :

$$\frac{u_a}{a} = -\frac{\chi}{2G} \Delta p \,; \ avec \ \chi = \frac{\frac{b^2}{a^2} + (1 - 2\nu)}{\frac{b^2}{a^2} - 1}$$
[6]

Compte tenu de la valeur élevée du rapport $\frac{b}{a}$, le paramètre χ est pris égal à 1.

Le module de cisaillement G est alors déduit simplement à partir de la courbe présentée sur la Figure 6 ($G = 2600 \ kPa$).



Figure 6. Détermination du module G à partir de la courbe pressiométrique

Pour déterminer l'angle de frottement, on utilise le rapport $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{r}}$ dont la valeur au sein de la zone plastique et donnée par :

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_r} = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \tag{7}$$

La figure 7 présente l'évolution du quotient $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{r}}$ le long d'un rayon pour différentes déformations $\frac{u_{a}}{a_{0}}$. A l'état initial ($\frac{u_{a}}{a_{0}} = 0$), le quotient $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{r}}$ est proche de 1 (champ de contrainte isotrope); pour un niveau de déformation élevée $\frac{u_{a}}{a_{0}} = 40\%$, ce quotient garde une valeur constante (environ 0.54) au voisinage de la sonde ce qui traduit une plastification partielle du milieu. La valeur correspondante de l'angle de frottement interne est de 17°.

4. Comparaison des résultats, conclusions

Les résultats obtenus (Tableau 2) montrent une assez bonne concordance entre les valeurs fournies par les différentes méthodes pour ce qui est de l'angle de frottement.

8 1re soumission à AUGC 2006



Figure 7. Détermination de l'angle de frottement φ à partir du quotient $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{r}}$

Par contre, la valeur du module de cisaillement obtenue par la méthode conjointe (essai pressiométrique) est d'environ 30 % inférieure à celle donnée par l'essai biaxial. Cette différence provient du fait que dans le cas de l'approximation par moindres carrés sur l'ensemble de la courbe, le module de cisaillement calculé n'a pas la signification mécanique stricte d'un module élastique défini pour de faibles déformations, mais davantage celle d'une variable d'optimisation mathématique sur une gamme de déformations très étendue. Cela montre la difficulté d'identification des paramètres à partir de l'essai pressiométrique et plus généralement, l'intérêt d'identifier séparément les différents paramètres de comportement, lorsque possible. Les résultats des simulations font actuellement l'objet d'une analyse microstructurelle dans le but de caractériser et de différencier, à cette échelle, les réponses élastique et plastique.

Paramètres	ν	G (kPa)	ϕ (degrés)	ψ (degrés)
Essai biaxial	0.38	3100	18	8
Essai pressiométrique				
- Identification conjointe	—	2145	16.5	—
- Identification séparé	_	2610	17	_

Tableau 2. Comparaison des paramètres macroscopiques identifiés par l'essai biaxial et l'essai pressiométrique.

5. Bibliographie

- Cundall P. A., « A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems », 1971.
- Itasca Consulting Group, Praticle Flow Code, USA, 1996-1999.
- Mahboubi A., Ghaouti A., Cambou B., « La simulation numérique discrète du comportement du matériau granulaire », 1996.

- Masson S., « Simulations numériques discrètes d'un matériau granulaire ensile », Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 1997.
- Rangeard D., Masson S., Vu N. H., « Multiscale analysis of pressuremeter test », *NUMOG IX*, vol. 1, Ottawa, p. 189-201, 2004.
- Shafabakhsh G. A., « Simulation numérique discrète des matériaux de chaussées non traités », Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 1999.
- Vu N. H., Rangeard D., Masson S., Martinez J., « Analyse microstructurelle de l'essai pressiométrique », CFM2005, vol. 1, Troyes, p. 189-201, 2005a.
- Vu N. H., Rangeard D., Masson S., Martinez J., « Discrete analysis of cavity expansion test », *Powder and Grains*, vol. 1, Stuttgart, p. 189-201, 2005b.

ANNEXE POUR LE SERVICE FABRICATION

A FOURNIR PAR LES AUTEURS AVEC UN EXEMPLAIRE PAPIER DE LEUR ARTICLE ET LE COPYRIGHT SIGNE PAR COURRIER LE FICHIER PDF CORRESPONDANT SERA ENVOYE PAR E-MAIL

- 1. Article pour la revue : *AUGC 2006*
- 2. AUTEURS : Ngoc Han VU — Damien RANGEARD — Juan MARTINEZ
- 3. TITRE DE L'ARTICLE : Identification Discrète des Paramètres Elasto-Plastiques des Sols Pulvérulents à partir des Essais Biaxial et Pressiométrique
- 4. TITRE <u>ABRÉGÉ</u> POUR LE HAUT DE PAGE <u>MOINS DE 40 SIGNES</u> : *Identification des Paramètres de Sols*
- 5. DATE DE CETTE VERSION : *3 avril 2006*
- 6. COORDONNÉES DES AUTEURS :
 - adresse postale :

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (EA 3913) INSA de Rennes 20 avenue des Buttes de Coesmes 35043 Rennes

{ngoc-han.vu, damien.rangeard, juan.martinez}@insa-rennes.fr

- téléphone : 02 23 23 20 02
- télécopie : 02 23 23 20 02
- e-mail : ngoc-han.vu@insa-rennes.fr
- 7. LOGICIEL UTILISÉ POUR LA PRÉPARATION DE CET ARTICLE : LATEX, avec le fichier de style article-hermes.cls, version 1.2 du 03/03/2005.

8. FORMULAIRE DE COPYRIGHT :

Retourner le formulaire de copyright signé par les auteurs, téléchargé sur : http://www.revuesonline.com

SERVICE ÉDITORIAL – HERMES-LAVOISIER 14 rue de Provigny, F-94236 Cachan cedex Tél : 01-47-40-67-67 E-mail : revues@lavoisier.fr Serveur web : http://www.revuesonline.com