

Modèle simplifié 3D de l'interaction sol structure : application au génie parasismique

Stéphane Grange, Panagiotis Kotronis & Jacky Mazars

Laboratoire 3S-R & structure fédérative VOR - Grenoble Universités
Domaine Universitaire - St Martin d'Hères
BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9 - France
Stephane.Grange@hmg.inpg.fr

Résumé :

Dans le domaine du génie parasismique, l'interaction du sol avec la structure (ISS) est un phénomène important à considérer pour espérer rendre compte du comportement réel d'une structure et donc évaluer sa vulnérabilité. Ce travail présente la construction d'un élément d'interface 3D modélisant une fondation superficielle circulaire reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de prendre en compte l'ISS en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Basé sur la méthode des macro-éléments, cet élément permet de travailler en variables globales (forces et déplacements) et permet ainsi de simplifier le modèle et d'obtenir des temps de calculs très réduits. Il est implémenté dans FedeesLab, un code élément finis développé dans Matlab. Après une description mathématique, des comparaisons avec des résultats expérimentaux d'une fondation soumise à des chargements statiques monotones et cycliques montrent le bon fonctionnement du macro élément 3D d'ISS.

Abstract :

In structural engineering, Soil-Structure Interaction (SSI) is an important phenomenon that has to be taken into account. This paper presents a 3D non linear interface element able to compute SSI. Several approaches exist to take this phenomenon into account: the following work is based on the "macro element" concept. The particularity of the macro-element lies in the fact that the movement of the foundation is entirely described by a system of generalised variables (forces and displacements) defined in the foundation centre. The non linear behaviour of the soil is reproduced using the classical theory of plasticity. The failure surface is defined using an adequate overturning mechanism. The element is able to simulate the 3D behaviour of a circular rigid shallow foundation under monotonic and cyclic static loadings considering rocking. It is implemented into FedeesLab, a finite element Matlab toolbox. Comparisons with experimental results under monotonic static and cyclic loadings show the good performance of the approach.

Mots-clefs :

macro-élément; fondation; ISS

1 Introduction

Par le passé, différentes expérimentations sur table sismique ont été réalisées sur des structures élancées de type bâtiment multi-étages reposant sur des fondations superficielles - Camus IV CAFEEL-ECOEST/ICONS (2001). Ces essais ont montré que les non linéarités présentes dans le comportement du sol, ou encore dans le décollement de la fondation, jouaient le rôle d'isolateur en réduisant les efforts en base. En contre partie des déplacements plus importants sont observés, ce qui nécessite une étude approfondie de ces phénomènes. Ce travail présente la description mathématique d'un élément d'interface 3D modélisant une fondation superficielle circulaire reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de prendre en

compte l'interaction sol-structure en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Il est basé sur la méthode des macro-éléments de Nova *et al.* (1991), et plus particulièrement s'inspire du modèle 2D réalisé par Crémer (2001).

Son implantation dans un code élément finis a permis de réaliser des comparaisons avec des résultats expérimentaux d'une fondation soumise à des chargements statiques, et cycliques, afin de montrer le bon fonctionnement du macro-élément 3D d'interaction sol-structure.

2 Type de fondation utilisées et cinématique associée

Afin de simplifier le problème, la fondation étudiée est considérée circulaire (figure 1). Ainsi grâce à l'axisymétrie du problème, les chargements horizontaux dans les directions x et y peuvent être traités de la même manière, de plus il devient alors aisé de reproduire l'interaction entre les efforts horizontaux d'une part et les moments d'autre part. La fondation est supposée infiniment rigide et toutes les non-linéarités sont condensées en son centre. Ainsi il est approprié de travailler avec les variables généralisées (ou globales) suivantes : l'effort vertical V , les forces horizontales H_x , H_y , et les moments M_x , M_y mais aussi les déplacements correspondants : le tassement vertical u_z , les déplacements horizontaux u_x , u_y , et les rotations θ_x , θ_y . Le moment de torsion (M_z) n'est pas pris en compte dans le modèle.

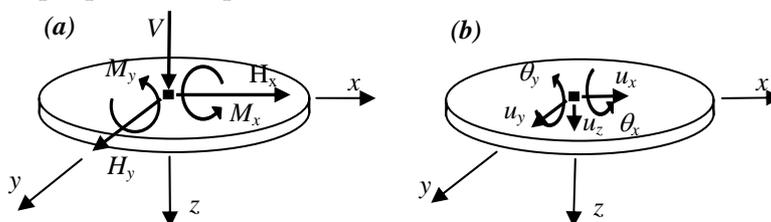


FIG.1 – Type de fondation et variables globales: (a) forces et (b) déplacements

3 Deux mécanismes non linéaires : la plasticité et le décollement

3.1 Décomposition des mécanismes non linéaires

Trois mécanismes différents doivent être pris en compte dans le macro-élément d'ISS 3D : l'élasticité, la plasticité du sol ainsi que le décollement de la fondation. Le décollement de la fondation caractérise le fait qu'une partie de la fondation se décolle du sol, ce qui ne n'implique pas forcément que le centre de la fondation se soulève par rapport à sa position initiale. Il peut en effet y avoir décollement et tassement du sol sous le centre de la fondation. Dans le cas contraire, lorsqu'il y a décollement du centre de la fondation, on parle alors de soulèvement de la fondation. Le déplacement total est décomposé en la somme des déplacements élastique, plastique et de soulèvement. Dans la version actuelle, le macro-élément 3D d'ISS n'est capable de prendre en compte que l'élasticité et la plasticité du sol ainsi que le décollement de la fondation. Le soulèvement du centre de la fondation n'est pas calculé.

La plasticité et le décollement sont deux mécanismes couplés car la partie de la fondation qui ne touche plus le sol ne subit plus aucune contrainte de la part de ce dernier. Ainsi la plastification du sol dépend fortement de cette composante de décollement. Inversement, le comportement de décollement et de soulèvement (non implanté pour le moment dans l'élément) dépend aussi de l'état de plastification du sol. En effet dans un cas extrême, le décollement n'intervient pas de la même manière sur un sol élastique que sur un sol plastique Crémer (2001).

En conclusion, l'implémentation de la plasticité dans le macro-élément doit prendre en compte ce couplage avec le décollement.

4 Description mathématique du macro-élément 3D

4.1 Comportement élastique

La loi de comportement élastique peut s'écrire: $\vec{F} = K^{el}(\vec{u} - \vec{u}^{pl})$ où les déplacements et les efforts sont des grandeurs adimensionnées:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} V' \\ H'_x \\ M'_y \\ H'_y \\ M'_x \end{pmatrix} = \frac{1}{\pi D^2 q_{max}} \begin{pmatrix} V \\ H_x \\ M_y \\ D \\ H_y \\ M_x \\ D \end{pmatrix} \quad \vec{u} = \begin{pmatrix} u'_z \\ u'_x \\ \theta'_y \\ u'_y \\ \theta'_x \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} u_z \\ u_x \\ D\theta_y \\ u_y \\ D\theta_x \end{pmatrix} \quad K^{el} = \begin{pmatrix} K^{el}_{zz} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K^{el}_{hh} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K^{el}_{\theta\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^{el}_{hh} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K^{el}_{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

D est le diamètre de la fondation et q_{max} la capacité portante de la fondation. Grâce à la forme circulaire de la fondation, les raideurs élastiques correspondant aux déplacements horizontaux d'une part et aux rotations d'autre part sont les mêmes.

En utilisant cette notation adimensionnée on obtient la matrice de rigidité ci-dessus (S étant la surface de la fondation). avec $K^{el}_{zz} = \frac{K^{el}_{zz} D}{Sq_{max}}$, $K^{el}_{hh} = \frac{K^{el}_{hh} D}{Sq_{max}}$, et $K^{el}_{\theta\theta} = \frac{K^{el}_{\theta\theta}}{DSq_{max}}$

4.2 Comportement plastique

Critère de rupture

Le critère de rupture est défini pour un mécanisme de renversement avec soulèvement (couplage). Il est issu du travail de Pecker (1997) et a déjà été utilisé dans le macro-élément 2D de Crémer (2001). Ce critère a été initialement développé pour une fondation superficielle filante. Toutefois Gottardi *et al.* (1999) ont montré que la forme des surfaces de rupture pour une fondation circulaire est très similaire. De plus, grâce à la symétrie de révolution du problème, l'adaptation en 3D est très simple et consiste à ajouter deux termes : l'un par rapport à l'effort horizontal réduit H'_x et l'autre par rapport au moment M'_y afin d'obtenir une surface de dimension 5:

$$f_{\infty} \equiv \left(\frac{H'_x}{aV'^c (1-V')^d} \right)^2 + \left(\frac{M'_y}{bV'^e (1-V')^f} \right)^2 + \left(\frac{H'_y}{aV'^c (1-V')^d} \right)^2 + \left(\frac{M'_x}{bV'^e (1-V')^f} \right)^2 - 1 = 0$$

Les coefficients: a, b, c, d, e et f définissent la taille et la forme de la surface dans les différents plans.

Ces paramètres peuvent être calés sur différents résultats expérimentaux que l'on peut trouver dans la littérature (*cf.* résultats expérimentaux présentés dans la prochaine partie)

Surface de charge

La surface de charge utilisée provient aussi du travail de Crémer (2001). L'adaptation pour la fondation 3D est la même que pour le critère de rupture avec l'ajout de $\vec{\tau} = (\alpha, \beta, \delta, \eta)$ le vecteur composé des variables d'érouissage cinématique, et ρ la variable d'érouissage isotrope. La variable γ est choisie pour paramétrer le second point d'intersection de la surface de charge avec l'axe V' (l'autre point étant l'origine de l'espace des forces). Cette variable d'érouissage donne l'effort vertical maximum que la fondation a subi tout au long de son histoire.

$$f_c(F, \bar{\tau}, \rho) \equiv \left(\frac{H'_x}{\rho a V'^e (\gamma - V')^d} - \frac{\alpha}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{M'_y}{\rho b V'^e (\gamma - V')^f} - \frac{\beta}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{H'_y}{\rho a V'^e (\gamma - V')^d} - \frac{\delta}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{M'_x}{\rho b V'^e (\gamma - V')^f} - \frac{\eta}{\rho} \right)^2 - 1 = 0$$

Lois d'écroissements cinématique et isotrope

Les variables d'écroissements cinématiques $\alpha, \beta, \delta, \eta$ permettent de déterminer le centre de l'ellipsoïde dans l'hyper plan (H'_x, M'_y, H'_y, M'_x) . L'évolution de ces variables a été obtenue en étudiant le comportement expérimental dans Gottardi *et al.* (1999) et à partir de simulations numériques de Crémer (2001) d'une fondation sous chargement cyclique. Deux grandeurs sont alors introduites pour chacune des variables d'écroissement afin de respecter la dissymétrie totale du problème lors d'un chargement cyclique dû au décollement de la fondation (le chargement de la fondation dans un sens $\dot{M} > 0$ n'influence pas l'autre $\dot{M} < 0$, autrement dit lorsque le chargement change de sens, le comportement est vierge). L'évolution de ces variable est de la forme suivante (seulement β est présenté ici, les autres variables ayant les même propriétés) :

$$\begin{cases} \dot{\beta}^{\oplus} = \frac{1}{b V'^e (\gamma - V')^f} K^{el}_{\theta\theta} \left(\frac{M_y^{*\infty}}{\beta^{\oplus}} - 1 \right) \left| \dot{\theta}'_{y'} \right| \\ \dot{\beta}^{\ominus} = -\frac{1}{b V'^e (\gamma - V')^f} K^{el}_{\theta\theta} \left(-\frac{M_y^{*\infty}}{\beta^{\ominus}} - 1 \right) \left| \dot{\theta}'_{y'} \right| \end{cases} \quad \begin{array}{l} M_y^{*\infty} \text{ est la limite de la courbe } \beta(\dot{\theta}'_{y'}) \\ \text{(avec } \beta = \beta^{\oplus} + \beta^{\ominus} \text{) quand } \dot{\theta}'_{y'} \text{ tend vers l'infini.} \\ \text{Cette limite est calculée grâce à une loi de tangente} \\ \text{décrite dans Grange } et al. (2007). \end{array}$$

La loi d'évolution de γ est donnée par Grange *et al.* (2007).

Afin de reproduire au mieux le comportement cyclique de la fondation et notamment le fait que pour un chargement radial le comportement reste inchangé dans le sens opposé à celui de la sollicitation en cours (dû au décollement de la fondation), la variable d'écroissement isotrope doit respecter la relation suivante : $\dot{\rho} = \|\bar{\tau}\|$

Loi d'écoulement

Comme pour la plupart des modèles de sol, une loi d'écoulement non associée est nécessaire. Son expression simplifiée et sa représentation dans un plan $(M'-V')$ avec la surface de charge f_c associée au point de charge F sont données par la figure 2 :

$$g \equiv \left(\frac{H'_x}{\rho \frac{a V'^e}{(\kappa\gamma + V'_0)^d} (\gamma - V')^d (\kappa\gamma + V')^d} - \frac{\alpha}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{M'_y}{\rho \frac{b V'^e}{(\xi\gamma + V'_0)^f} (\gamma - V')^f (\xi\gamma + V')^f} - \frac{\beta}{\rho} \right)^2 \dots - 1 = 0$$

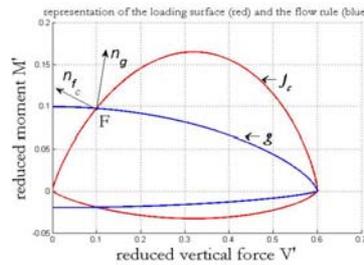


FIG. 2 – Loi d'écoulement

Les tangentes horizontales de la loi d'écoulement peuvent être ajustées grâce à 2 paramètres ξ and κ afin de modifier l'évolution des déplacements plastiques dans l'hyper plan $(u'_x, \theta'_{y'}, u'_y, \theta'_x)$.

5. Simulations numériques

Le macro-élément est implanté dans FedeeasLab, un code élément finis développé sous Matlab par Filippou *et al.* (2004). L'algorithme (return mapping) est utilisé pour le mécanisme

de plasticité. Trois types de simulations ont été effectués, deux d'entre elles sont détaillées dans cet article. Des simulations dynamiques ont été effectuées par Grange *et al.* (2006).

5.1 Comportement statique monotone

Le détail de ces tests est présenté dans Gottardi *et al.* (1999). Une fondation circulaire $2R=D=0.1m$ reposant sur un sable est soumise à un chargement à déplacements imposés. Un déplacement vertical constant est imposé alors qu'on applique un déplacement horizontal croissant. Les courbes obtenues sont tracées dans l'espace des efforts associés pour 2 déplacements verticaux différents. On montre que le chemin de réponse doit épouser le critère de rupture (« Swipe tests »). Le macro-élément est capable de reproduire ce phénomène qualitativement ainsi que quantitativement.

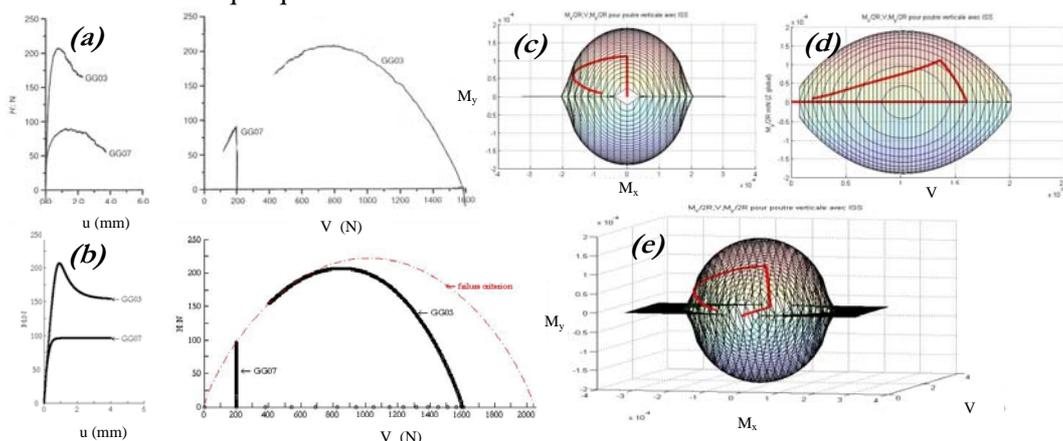


FIG. 3 – Essais statiques – (a) et (b) Comparaisons Exp/Num 2D – (c), (d), (e) Essais 3D

Afin de montrer le bon fonctionnement 3D du modèle, un autre test purement numérique a été effectué. Cette fois ci les déplacements imposés n'ont plus un caractère radial mais 3D. La courbe réponse dans l'espace des forces est donnée par la figure 3 (c), (d), (e). Là aussi le chemin d'effort épouse le critère de rupture.

5.2 Comportement statique cyclique

Dans le cadre du programme Européen TRISEE (1998), des essais cycliques à déplacements imposés ont été réalisés sur une fondation superficielle reposant sur un sable très lâche. Cette souplesse du sol n'engendre que très peu de décollement. Ainsi une adaptation du modèle est nécessaire pour espérer reproduire le comportement expérimental. Ceci revient à annuler le développement de l'érouissage isotrope $\dot{\rho} = 0$. Les courbes expérimentales et numériques moments rotations (a) et (b) et celles montrant le tassement de la fondation (c) et (d) en fonction du temps sont représentés figure 4:

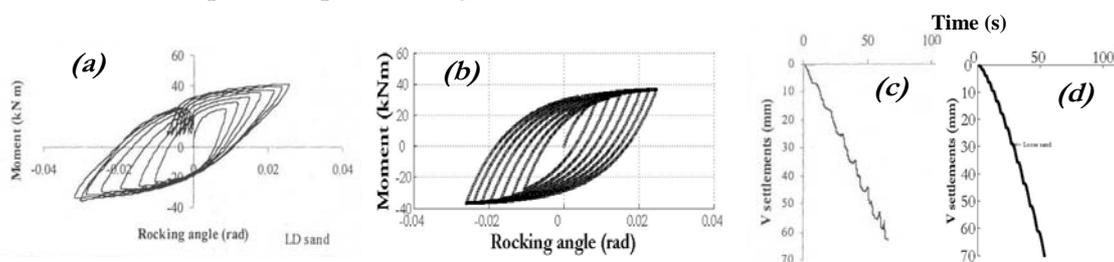


FIG. 4 – Essais cycliques – (a), (c) Résultats expérimentaux – (b), (d) Résultats Numériques

6. Conclusion

Le macro-élément 3D d'interaction sol-structure développé dans cet article donne des résultats satisfaisants pour simuler le comportement non linéaire d'une fondation superficielle circulaire rigide reposant sur un massif de sol semi infini et soumise à des chargements statiques monotones et cycliques. L'utilisation de variables globales permet de réduire significativement le temps de calcul. Il a été implanté dans FedeeasLab, un code éléments finis développé dans Matlab.

De nombreuses améliorations concernant le calage des paramètres (raideurs, forme de la surface de charge, loi d'écoulement) peuvent être effectuées. Mais la difficulté de développer ce modèle 3D réside principalement dans le fait qu'il doit être capable de simuler le comportement de la fondation soumise à un chargement non radial. La loi des tangentes joue un rôle clé dans ce problème et a besoin d'être améliorée. De plus, le phénomène de soulèvement du centre de la fondation est un phénomène important à prendre en compte et qui doit être introduit dans la formulation de l'élément.

Remerciements

Ces travaux de recherche sont soutenus par le projet Européen LESSLOSS (Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides Integrated Project; Project No.: GOCE-CT-2003-505488).

Références

- CAFEEL-ECOEST/ICONS. 2001 Thematic report N.5. Shear Walls Structures. Editors J.M. Reynouard, M.N. Fardis. gen. eds R. T. Severn and R. Bairrão (LNEC, ISBN 972-49-1891-2). September 2001.
- Crémer, C. 2001 Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séismes. PhD Thesis. LMT Cachan - ENS Cachan France.
- Filippou, F.C. & Constandines, M. 2004 FedeeasLab Getting Started Guide And Simulations Examples - Dpt of civil and env. Engng. UC Berkeley.
- Gottardi, G., Houlsby, G.T. & Butterfield, R. 1999 Plastic response of circular footings under general planar loading. *Géotechnique*. Vol. **49**, No. 4, pp. 453-469, 1999.
- Grange, S., Kotronis, P. & Mazars, J. 2006 Advancement of simplified modelling strategies for 3D phenomena and/or boundaries conditions for base-isolated buildings or specific soil-structure interactions. Project LESSLOSS, <http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00102513>.
- Nova, R. & Montrasio, L. 1991 Settlements of shallow foundations on sand. *Géotechnique*., Vol. **41**, No. 2, pp 243-256.
- Pecker, A., 1997 Analytical formulae for the seismic bearing capacity of shallow strip foundations. *Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures*. (ed Seco e Pinto), pp 261-268, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- TRISEE, 3D 1998 Site Effects and Soil-Foundation Interaction in Earthquake and vibration Risk Evaluation. Part 4 "Large-scale geotechnical experiments on soil-foundation interaction," European Commission, Directorate General XII for science, Res. and Dev.