

FORMULES EMPIRIQUES DE CALCUL DES PÉRIODES FONDAMENTALES DE SYSTÈMES SOL-STRUCTURE : VALIDATION ET ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

EMPIRICAL FORMULAS FOR COMPUTATION OF FUNDAMENTAL PERIODS OF SOIL-STRUCTURE SYSTEMS: VALIDATION AND PARAMETRIC STUDY

Réception : 14/12/2018

Acceptation : 15/05/2019

Publication : 30/06/2019

OUZANDJA Djamel¹, TILIOUINE Boualem²¹Laboratory of Materials and Mechanics of Structures (LMMS), University of Msila, Algeria

E-mail : dj_ouzandja@yahoo.com

²Civil Engineering Department, Ecole Nationale Polytechnique, Algiers, Algeria

E-mail : boualem.tiliouine@g.enp.edu.dz

Résumé - Le comportement sismique d'un ouvrage dépend du mouvement sismique imposé par le sol, de la réponse dynamique de l'ouvrage, du comportement des fondations pendant et après le séisme, ainsi que de la capacité de résistance de la superstructure. Les caractéristiques du sol jouent un rôle important sur les trois premiers aspects. La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de cette interaction sol-structure est de considérer la structure parfaitement encastree dans le sol ; cette hypothèse est d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure, par exemple dans le cas d'un bâtiment rigide sur un sol rocheux. Dans la présente étude, les principaux résultats d'une étude de la validation par la méthode des éléments finis (M.E.F) de deux formules empiriques de calcul des périodes fondamentales de systèmes sol-structure sont présentés. Cette étude est complétée par une investigation paramétrique des effets de quelques paramètres significatifs sur l'interaction sol-structure. L'étude est réalisée en utilisant le code ANSYS où la structure est modélisée par des éléments barres et le sol par des ressorts discrets.

Mots - clés : Période fondamentale, Réponse dynamique, Interaction sol-structure, Modélisation

Abstract - The seismic behavior of a structure depends on the seismic movement imposed by the soil, the dynamic response of the structure, the behavior of the foundations during and after the earthquake, and the resistance capacity of the superstructure. Soil characteristics play an important role in the first three aspects. The most radical procedure to eliminate the problem of this soil-structure interaction is to consider the structure perfectly embedded in the ground; this hypothesis is even more valid that the foundation soil is not very deformable vis-à-vis the structure, for example in the case of a rigid building on rocky soil. In this study, the main results of a validation study by (F.E.M) finite element method of two empirical formulas for computation of the fundamental periods of soil-structure systems are presented. This study is completed by a parametric investigation of the effects of some significant parameters on the soil-structure interaction. The study is carried out using the ANSYS code where the structure is modeled by bar elements and the soil by discrete springs.

Keywords : Fundamental period, Dynamic response, Soil-structure interaction, Modeling

1. Introduction

L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement et à l'investigation des méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol de la fondation. Les effets

de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse sismique n'ont été sérieusement pris en considération qu'après le tremblement de terre de 1971 à San Fernando et au début de la construction nucléaire en Californie. Les conséquences catastrophiques de plusieurs récents tremblements de terre dans différentes régions du monde ont posé un problème sérieux aux ingénieurs pour mieux comprendre le comportement sismique des structures en tenant

compte de l'effet de l'interaction sol-structure [1]. L'analyse sismique d'une structure tenant compte des propriétés locales du site diffère de celle considérée encastree à sa base. De ce fait, il est particulièrement important de considérer l'ISS dans les zones sismiques où la réponse dynamique des sols peut changer la réponse des structures soumises à l'excitation sismique [2 & 3]. De plus, les sites meubles (sols mous) recevant des structures rigides et massives peuvent changer les caractéristiques dynamiques de ces dernières de manière significative [4].

La période fondamentale est un paramètre essentiel pour la détermination de la réponse des structures à un chargement sismique. Ce paramètre est généralement calculé en utilisant des formules empiriques fournies par les règlements sismiques et développées à partir des données statistiques. Ces formules négligent généralement la flexibilité du sol qui peut avoir une influence significative sur la période fondamentale de la structure et conduire par conséquent à un mauvais dimensionnement de celle-ci. Une étude réalisée par Ghrib et Mamedov (2004) [5] sur des bâtiments contreventés par des voiles en béton a montré l'insuffisance des formules employées par les règlements comme l'UBC-97 et NBCC-95 (code de bâtiment national du Canada) [6].

Des observations post-sismiques suggèrent que l'interaction sol-structure peut être nuisible [7]. Des simulations numériques effectuées par Jeremic et al. (2004) [8] ont montré que l'interaction sol-structure peut avoir des effets avantageux ou nuisibles sur le comportement de la structure en fonction des caractéristiques du sol et de celles du chargement sismique.

L'objectif de notre travail est d'effectuer une validation par la MEF de deux formules empiriques de calcul des périodes fondamentales de systèmes sol-structure. Cette validation est suivie par une investigation paramétrique des effets de quelques paramètres significatifs sur l'ISS.

2. Présentation du modèle de référence

Dans un premier temps l'analyse dynamique des structures étudiées est évaluée en considérant l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base (Fig. 1). Dans un deuxième temps, on considère le couplage sol-structure en modélisant le sol par des ressorts (Fig. 2) moyennant une approche numérique par la méthode des éléments finis (code de calcul ANSYS). Les éléments de ressorts sont modélisés par l'élément COMBIN14. La tige et la masse ponctuelle sont modélisées par l'élément BEAM3 et l'élément MASS21 respectivement.

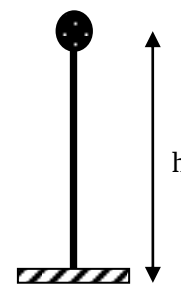


Figure 1 : Modèle sans prise en compte de l'ISS

Figure 1 : Model without taking into account of SSI

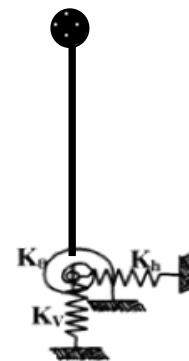


Figure 2 : Modèle simplifié tenant en compte de l'ISS

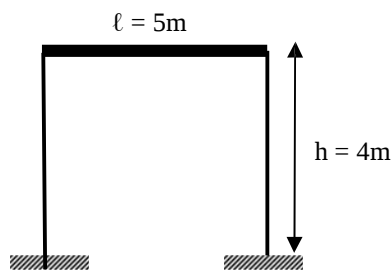
Figure 2 : Simplified model with taking into account of SSI

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du sol de fondation et de la structure**Table 1 :** Mechanical characteristics of foundation soil and structure

Sol			Structure		
V_s [m/s]	P [KN/m ³]	ν	EI [KN.m ²]	h [m]	ν
100			21600	4	
200			68267	7	
400	20	0.3	166667	10	0.2
800			345600	13	

2.1. Modèle de la structure

Il s'agit d'une structure auto-stable en béton armé (Fig. 3) à un seul étage de hauteur $h = 4\text{m}$ possédant un poids de 18 KN et une rigidité latérale de 16200 KN/m. L'étude comprend la variation du moment d'inertie I du poteau suivant la hauteur d'étage en fixant le module d'élasticité du béton. Les simulations ont été effectuées en faisant varier les paramètres présentés dans le Tab. 1.

**Figure 3 :** Modèle de la structure étudiée**Figure 3 :** Model of the studied structure

2.2. Modèle du sol

Le sol est assimilé à un milieu élastique linéaire, caractérisé par sa masse volumique ρ et les paramètres de comportement, le module de cisaillement G , le coefficient de Poisson ν et la vitesse des ondes de cisaillement V_s ($V_s = G/\rho$) d'une part et la base de la fondation circulaire d'une structure à un disque rigide de rayon r_0 ($r_0 = 1.5\text{ m}$) posé de façon superficielle sur le sol d'autre part.

L'interaction de la structure avec le sol est modélisée par l'intermédiaire de ressorts élastiques discrets de translation (horizontale et verticale) et de rotation. Les coefficients de raideur de ces ressorts sont donnés par les formules suivantes pour les fondations circulaires :

- Translation horizontale :

$$K_h = \frac{8.G.r_0}{2-\nu} \quad (1)$$

- Translation verticale :

$$K_v = \frac{4.G.r_0}{1-\nu} \quad (2)$$

- Rotation:

$$K_\theta = \frac{8.G.r_0^3}{3(1-\nu)} \quad (3)$$

où :

G : module de cisaillement du sol;

ν : coefficient de Poisson du sol;

r_0 : rayon de la fondation circulaire.

Pour le cas de référence, les raideurs de ressorts sont égales à : $K_h = 760000\text{ KN/m}$, $K_v = 920000\text{ KN/m}$ et $K_\theta = 2500000\text{ KN.m/rd}$. L'analyse dynamique a été effectuée en utilisant une modélisation par éléments finis (Code de calcul ANSYS). La fréquence obtenue pour le cas de référence est $f = 11.593\text{ Hz}$. Cette valeur diffère de 7 % de la fréquence du même système avec un encastrement à la base ($f_{en} = 12.410\text{ Hz}$).

Afin de présenter l'effet de la rigidité des ressorts sur la période fondamentale, une simulation a été effectuée en variant la vitesse d'onde de cisaillement du sol : V_s : 100 m/s (sol très meuble), 200, 400 et 800 m/s (sol très rigide).

2.3. Prise en compte de l'effet de l'interaction sol-structure

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence de l'ISS sur la réponse dynamique des structures. Veletsos et al. (1974, 1975) [9 & 10] & Bielak (1975) [11] étaient les premiers à proposer des formules pour la détermination de la période fondamentale des structures auto-stables en considérant la flexibilité de la fondation. Ces formules ont la forme suivante :

$$\frac{T_{flexible}}{T_{fixe}} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_u} + \frac{kh^2}{k_\theta}} \quad (4)$$

Avec :

k_u et k_θ : rigidités de translation et de rotation de ressorts;

h et k : hauteur et rigidité à la flexion de la structure respectivement;

T_{fixe} et $T_{flexible}$: périodes fondamentales de la structure avec base encastree et base flexible respectivement.

Le règlement BSSC (2003) [12] propose l'utilisation d'une formule similaire :

$$\frac{T_{flexible}}{T_{fixe}} = \sqrt{1 + 25\alpha \left(\frac{r_a \bar{h}}{V_s^2 T^2} \right) \left[1 + \left(\frac{1.12 r_a \bar{h}^2}{\alpha_\theta r_m^2} \right) \right]} \quad (5)$$

Avec :

$\bar{h} = 0.7h_n$ où h_n est la hauteur totale de la structure;

V_s : vitesse des ondes de cisaillement;

α : densité relative du poids de la structure et du sol, définie par : $\alpha = \frac{\bar{W}}{\gamma A \bar{h}}$ avec

γ : poids unitaire du sol;

A : aire de la fondation;

$\bar{W}$: charge effective de gravité de la structure;

r_a et r_m : paramètres définis par $r_a = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ et

$$r_m = \sqrt[4]{\frac{4 I_0}{\pi}}$$

avec I_0 : moment d'inertie de la fondation;

α_θ : paramètre dépendant de la rigidité de la fondation.

Ces formules sont applicables aux cas des systèmes à un seul degré de liberté.

Le Tab. 2 ci-après illustre la valeur du rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ du système évalué en utilisant les formules empiriques (formules de Veletsos et du règlement BSSC (2003)) et la méthode des éléments finis (M.E.F). D'après les résultats obtenus, on peut observer que le règlement BSSC (2003) donne relativement des résultats précis parce que ces résultats sont très proches de ceux obtenus par la méthode des éléments finis (M.E.F) qui est une approche numérique.

Tableau 2 : Période fondamentale du système suivant les modèles de Veletsos, du règlement BSSC (2003) et la M.E.F

Table 2 : Fundamental period of the system according to Veletsos models, (2003) BSSC regulation and F.E.M

Modèle	Veletsos	BSSC (2003)	MEF
$T_{flexible}/T_{fixe}$	1.0119	1.0163	1.0705

3. Analyse paramétrique

Afin de déterminer l'effet de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des structures, nous allons procéder à une variation des paramètres de base relatifs au sol et à la structure en vue de déterminer le rapport entre la période propre du mode fondamental T_{fixe} , du modèle encastree (fixe à la base) et celle du même modèle $T_{flexible}$, avec base flexible (prise en compte de l'ISS). Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence l'influence de l'interaction sol-structure sur la période propre fondamentale de la structure.

4. Résultats de calcul et discussion

4.1. Variation des paramètres du sol

Cette variation a été conduite en considérant différentes vitesses des ondes de cisaillement dans le sol. Le premier effet de l'ISS constaté est l'augmentation de la période fondamentale de la structure par rapport à la valeur obtenue dans le cas de la structure à base encastree. Cet effet est exprimé par la diminution du rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ pour une augmentation de la vitesse des ondes de

cisaillement dans le sol. Les Figs. 4 (a et b) montrent les valeurs du rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ obtenues en fonction de la vitesse des ondes de cisaillement associée aux différentes catégories de site. On constate clairement que plus la raideur du sol augmente, plus le rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ diminue.

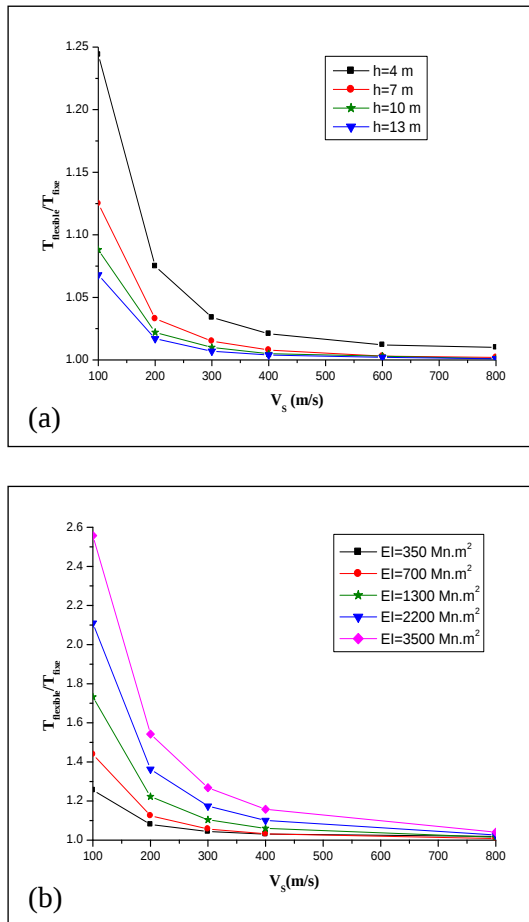


Figure 4 (a et b) : Influence de la vitesse des ondes de cisaillement sur la période fondamentale

Figure 4 (a et b) : Influence of shear waves velocity on the fundamental period

4.2. Variation des paramètres de la structure

À partir de cette étude numérique, les principales constatations concernant la variation des paramètres de base de la structure sont :

- L'augmentation du rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ quand la rigidité à la flexion (EI) de la structure augmente. Il est à noter cependant que cette augmentation est moins significative pour les sols rigides ($V_s = 800$ m/s) comme illustré dans la Fig. 5.
- Les courbes de tendance de la variation du rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ en fonction des paramètres de la structure sont approximativement linéaires.
- En ce qui concerne le paramètre h de la structure, celui-ci affecte le rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$. La variation de la hauteur h de 4 à 13 m diminue le rapport $T_{flexible}/T_{fixe}$ de 1.244 à 1.067 comme le montre la Fig. 6.

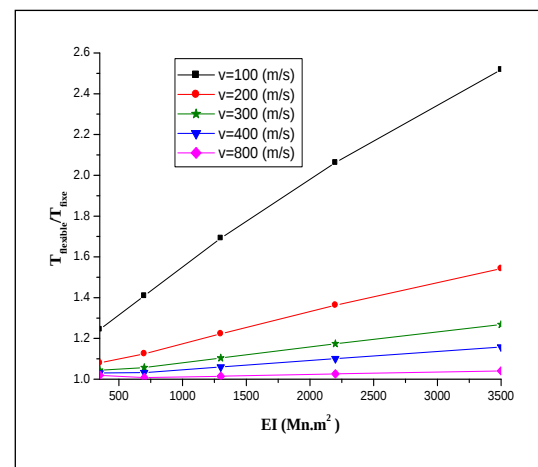


Figure 5 : Influence de la rigidité à la flexion de la structure sur la période fondamentale

Figure 5 : Influence of bending rigidity of the structure on the fundamental period

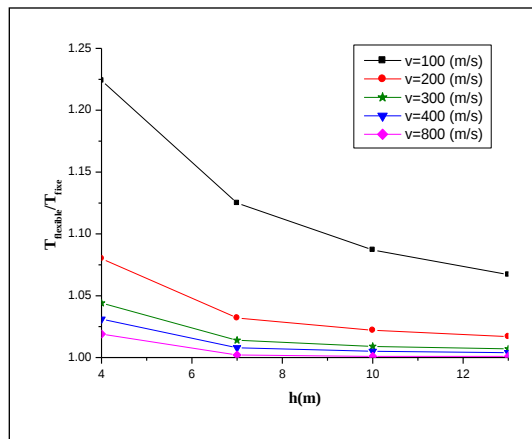


Figure 6 : Influence de la hauteur de la structure sur la période fondamentale

Figure 6 : Influence of height of the structure on the fundamental period

5. Conclusion et perspectives

Le présent travail a comporté une validation numérique de deux formules empiriques de calcul des périodes fondamentales des structures modélisables par un système à 1 DDL fondé sur une base flexible. Ce travail est complété par une investigation paramétrique des effets de quelques paramètres significatifs sur l'ISS réalisé en utilisant le code ANSYS où la structure est modélisée par des éléments barres et le sol par des ressorts discrets.

A partir de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La formule empirique de calcul des périodes fondamentales des structures à base flexible du règlement BSSC (2003) donne relativement des résultats précis;
- L'investigation paramétrique des effets de quelques paramètres prépondérants sur l'ISS a montré que cette influence dépend principalement de la rigidité du sol (ou encore de la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol, V_s), de la rigidité de flexion des structures (EI) et de la hauteur totale de la structure (h);

- Pour le cas d'une structure rigide sur un sol rigide, l'interaction sol-structure est négligeable;
- Pour le cas d'une structure rigide sur un sol flexible, l'interaction apparaît d'une manière significative.

Références

- [1] Wong, H.L. and Luco, J.E., *Dynamic response of rigid foundations of arbitrary shape.*, Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 4, pp 587-897, 1976.
- [2] Smith, H.A., Wu, W.H. and Borja, R.I., *Structural control considering soil-structure interaction effects.*, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol. 23: pp 609-626, 1994.
- [3] Mihailo, D.T., Maria, I.T. and Tzong-Ying, H., *Full-scale experimental studies of soil-structure interaction.*, Proc. of the 2nd US-Japan workshop on soil-structure interaction, Tsukuba City, Japan, 2001.
- [4] John, P.W. and Chongmin, S., *Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction.*, Eng. Struct., Vol. 24, pp 13-28, 2002.
- [5] Ghrib, F. and Mamedov, H., *Period formulas of shear wall buildings with flexible bases.*, J. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 33, pp 295-314, 2004.
- [6] National Research Council Canada, *Supplement to the national building code of Canada*, Ottawa, Canada, 1995.
- [7] Gazetas, G. and Mylonakis, G., *Seismic Soil-Structure Interaction: New Evidence and Emerging Issues.*, Emerging Issues Paper, Geotechnical Special Publication, ASCE, Vol. III, n° 75, pp 1119-1174, 1998.
- [8] Boris, J., Sashi, K. and Feng, X., *Influence of soil-foundation-structure interaction on seismic response of the I-880 viaduct.*, J. Struct. Engrg., Vol. 26, pp 391-402, 2004.



-
- [9] Veletsos, A.S. and Meek, J.W., *Dynamic behavior of building-foundation systems.*, J. Earthquake Engrg. Struct.Dyn, Vol. 3, n° 2, pp 121-138, 1974.
- [10] Veletsos, A.S. and Nair, V.V., *Seismic interaction of structures on hysteretic foundations.*, J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 101, n° 1, pp 109-129, 1975.
- [11] Bielak, J., *Dynamic behavior of structures with embedded foundations.*, J. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 3, n° 3, pp 259-274, 1975.
- [12] Building Seismic Safety Council (BSSC)., *The 200 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures Part 2: Commentary (FEMA 450).*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2003.