

ANALYSE DE LA REPONSE SISMIQUE DE FONDATIONS FILANTES SOLLICITEES PAR L'INCIDENCE D'ONDES PLANES DE TYPES P, SV ET RAYLEIGH EN UTILISANT LA METHODE DES EQUATIONS INTEGRALES AUX FRONTIERES

M. HADID

Attaché de Recherche, C.G.S Alger

M.K. BERRAH

Maître de Conférences, Ecole Nationale Polytechnique, Alger

RESUME

Dans cet article, une étude dans le domaine des fréquences de la réponse sismique de fondations filantes rigides sur demi-espace homogène élastique sollicitées par l'incidence d'ondes planes de types P, SV et Rayleigh selon différents angles est présentée. La méthode des équations intégrales aux frontières est utilisée à travers ce travail de recherche conjointement avec une procédure analytique contournant les intégrations numériques de fonctions de Green singulières pour l'évaluation de la réponse de la fondation induite par le champ sismique incident. Les résultats obtenus montrent que l'effet de passage d'onde réduit les composantes du mouvement de translation aux fréquences moyennes et élevées et développe, aux fréquences moyennes, une composante rotationnelle de la réponse, qui se réduit aux fréquences supérieures.

Mots clés : méthode des équations intégrales aux frontières • fondations filantes • ondes sismiques •

1 INTRODUCTION

Dans l'hypothèse de la propagation verticale des ondes, le déplacement est identique en tout point de la fondation superficielle, il est égal à celui en champ libre. La fondation ne subit alors que des mouvements de translation. Cette hypothèse peut être fondée dans le cas où le foyer du tremblement

de terre se trouve à une profondeur suffisamment importante ou lorsque les couches de surface sont suffisamment molles pour avoir filtré par réfraction les ondes à incidence faible par rapport à l'horizontale. En revanche, elle n'est plus valable dans les situations contraires de sol dur et de foyer peu profond où les ondes obliques et de surface contribuent de façon non négligeable au mouvement en champ libre.

La méthode des équations intégrales aux frontières (MEIF) a été appliquée pour la première fois aux problèmes de diffraction d'onde sismique par Dominguez[1] en 1978. Il a étudié dans le domaine des fréquences, la réponse des fondations tridimensionnelles, enterrées dans un sol viscoélastique et excitées par l'incidence des ondes planes de types SV, SV et P. Récemment, Karabalis et Beskos [6], Spyarakos et Beskos [7][8] ont mené une étude similaire bi-et tridimensionnelle, dans le domaine des temps. L'effet du sol sous-jacent et celui d'un substratum non rigide sur l'amplification du site et sur la réponse de fondations filantes sous sollicitations sismiques de type P et SV, enterrées dans un demi-espace viscoélastique a été analysé récemment par Dominguez et Abascal [2].

Dans cet article, nous appliquons la méthode des équations intégrales basée sur les travaux de Hadid et Berrah [3][4][5] à l'analyse sismique des fondations filantes sollicitées par l'incidence d'ondes de types P, SV et de Rayleigh en supposant que le sol est homogène et élastique.

2 FORMULATION INTEGRALE

La formulation intégrale aux frontières des équations de l'élastodynamiques est représentée comme suit :

$$[c]^i \{u\}^i + \int_{\Gamma} [p^*] \{u\} d\Gamma - \int_{\Gamma} [u^*] \{p\} d\Gamma = \frac{1}{2} \{u_s\}^i \quad (1)$$

où $[c]^i$ est une matrice constituée par des valeurs constantes déterminées suivant une configuration géométrique au voisinage du point i , $\{u\}^i$ est le vecteur déplacement au point i , $[u^*]$ et $[p^*]$ sont les matrices déplacement et contrainte respectivement dues à un chargement unitaire au point i , $\{u\}$ et $\{p\}$ sont les vecteurs déplacement et contrainte respectivement, Γ est la frontière d'intégration, et $\{u_g\}^i$ est le vecteur déplacement en champ libre nécessaire pour l'analyse du problème de diffraction d'onde.

Supposons maintenant que le contour soit divisé en n éléments, et que les champs de déplacement et de traction soient constants au sein des éléments, l'équation intégrale (1) se met alors sous la forme discrétisée suivante :

$$[c]^i \{u\}^i + \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma_j} [p^*] \{u\} d\Gamma_j - \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma_j} [u^*] \{p\} d\Gamma_j = \frac{1}{2} \{u_s\}^i \quad (2)$$

où $\{u\}_j$ et $\{p\}_j$ sont les vecteurs déplacements et contraintes du $j^{\text{ème}}$ élément, respectivement.

Sous forme matricielle, en prenant en considération tous les éléments, l'équation (2) devient :

$$[H] \{u\} - [G] \{p\} = \frac{1}{2} \{u_s\} \quad (3)$$

L'équation (3) sera utilisée pour la détermination de la réponse dynamique de la fondation. Les éléments de frontières sont divisés en deux parties. La première partie identifiée par l'indice c , désigne les éléments de contact sol-fondation; la deuxième partie identifiée par l'indice l , désigne les éléments de la surface libre.

En vertu de ce partitionnement, l'équation (3) se présente comme suit :

$$\begin{bmatrix} H^{cc} & H^{cl} \\ H^{lc} & H^{ll} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^c \\ u^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{cc} & G^{cl} \\ G^{lc} & G^{ll} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p^c \\ p^l \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} u^{gc} \\ u^{gl} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

or le vecteur contrainte t^l est nul (*surface libre*) d'où :

$$\begin{bmatrix} H^{cc} & H^{cl} \\ H^{lc} & H^{ll} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^c \\ u^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{cc} \\ G^{lc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p^c \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} u^{gc} \\ u^{gl} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

d'après l'équation (5), nous pouvons écrire le système d'équation suivant :

$$H^{cc} u^c + H^{cl} u^l = G^{cc} p^c + \frac{1}{2} u^{gc} \quad (6a)$$

$$H^{lc} u^c + H^{ll} u^l = G^{lc} p^c + \frac{1}{2} u^{gl} \quad (6b)$$

de l'équation (6.b), on a :

$$u^l = (H^{ll})^{-1} \left[G^{lc} p^c + \frac{1}{2} u^{gl} - H^{lc} u^c \right] \quad (7)$$

Remplaçons (7) dans (6.a), nous pouvons déterminer le vecteur contrainte à l'interface sol fondation en fonction de son homologue le vecteur déplacement, d'où :

$$p^c = [G^{cc} - H^{cl} (H^{ll})^{-1} G^{lc}]^{-1} \left[(H^{cc} - H^{cl} (H^{ll})^{-1} H^{lc}) u^c + \frac{1}{2} (H^{cl} (H^{ll})^{-1} u^{gl} - u^{gc}) \right] \quad (8)$$

La relation cinématique entre les degrés de liberté rigide de translation et de rotation de la fondation et les déplacements des éléments de frontières sont données par la relation suivante :

$$u^c = T u_f \quad (9)$$

avec

u_f : déplacement du centre de gravité de la fondation (deux translations et une rotation)

T : matrice de transformation.

La relation force-contrainte au sein de l'interface sol-fondation est donnée par :

$$P = T^t A q^c \quad (10)$$

où A est la matrice diagonale désignant "l'aire" de chaque élément de frontière de la fondation. La matrice d'impédance est définie comme étant :

$$P = K u_f \quad (11)$$

d'après les équations (9), (10) et (11) nous pouvons montrer que :

$$P = K u_f + \frac{1}{2} T^t A (G^{cc} - H^{cl} (H^{ll})^{-1} G^{lc})^{-1} (H^{cl} (H^{ll})^{-1} u^{gl} - u^{gc}) \quad (12)$$

où K est la matrice d'impédance définie comme étant :

$$K = T^t A (G^{cc} - H^{cl} (H^{ll})^{-1} G^{lc})^{-1} (H^{cc} - H^{cl} (H^{ll})^{-1} H^{lc}) T \quad (13)$$

Il en découle que le vecteur déplacement de la fondation en l'absence des sollicitations harmoniques est défini comme :

$$u_f = \frac{1}{2} K^{-1} T^T A (G^T - H^T (H^H)^{-1} G^H)^{-1} (u^H - H^H (H^H)^{-1} u^H) \quad (14)$$

3 PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Trois types d'onde sismique (P, SV et de Rayleigh) sont considérés dans cette étude. La réponse de la fondation filante superficielle (Figure 1) à l'incidence oblique des ondes est concrétisée par les composantes horizontales u_1^f verticale u_2^f et de balancement u_3^f du déplacement de son centre. les amplitudes de déplacement normalisées de la fondation excitée par les différents types d'ondes P, SV et de Rayleigh :

$$\left| \frac{u_1^f}{u_1^g} \right|, \left| \frac{u_2^f}{u_2^g} \right|, eI \left| \frac{u_3^f}{u_2^g} \right|$$

(où u_1^g et u_2^g sont respectivement les composante horizontale et verticale du déplacement de champ libre de la surface de sol) sont définies comme étant les fonctions de transfert du mouvement de champ libre au mouvement de la fondation. Ces fonctions représentées dans les figures 2, 3 et 4 pour les cinq valeurs de θ (angle d'incidence de l'onde harmonique par rapport à l'horizontale), en fonction de la fréquence adimensionnelle variant de 0 à 9.

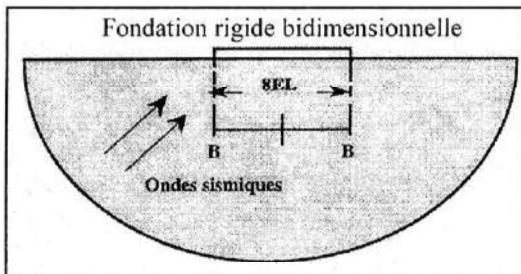


Figure 1 : Discrétisation et géométrie d'une fondation.

Les résultats observés dans la figure 2 montre que la réduction des composantes horizontale et verticale de déplacement de la fondation sous l'effet de l'onde SV est remarquable aux fréquences moyennes et élevées pour les ondes non verticales. Cette réduction est plus importante pour les ondes à angle d'incidence faible (inférieur à 45°) que pour les ondes à angle d'incidence important. Aussi, nous observons un développement important du balancement aux fréquences moyennes. Ce dernier se réduit aux fréquences supérieures. Cette réduction est plus accentuée pour les ondes à angle d'incidence faible.

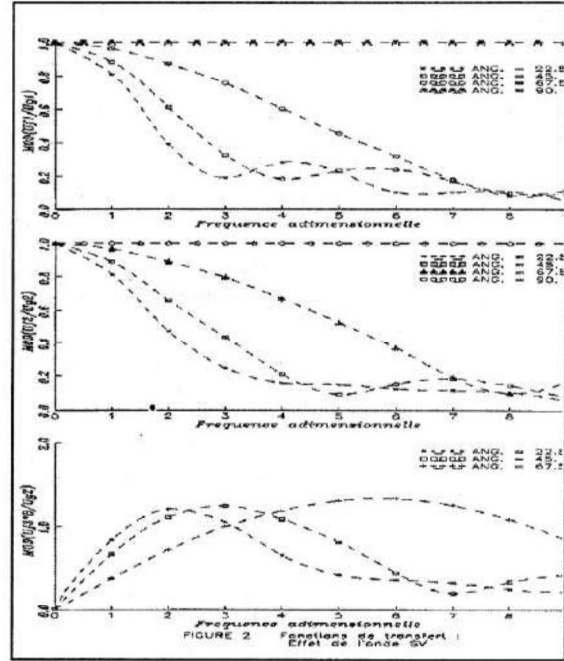


Figure 2 : Fonctions de transfert : Effet de l'onde SV.

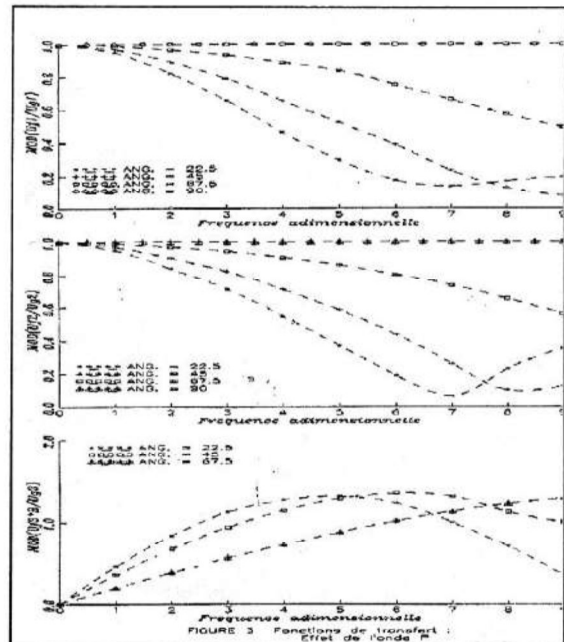


Figure 3 : Fonctions de transfert : Effet de l'onde P.

L'effet des ondes P sur la réponse des fondations filantes (Figure 3) est le même qualitativement que l'effet des ondes SV. Quantitativement, la réduction des déplacements de translation est moins accentuée que celle engendrée par le passage des ondes SV.

La réduction est relativement lente avec l'augmentation des fréquences. On note la même remarque en ce qui concerne le balancement engendré par le passage des ondes P. Dans le cas des ondes de Rayleigh, on observe une réduction très sévère des mouvements de translation (Figure 4). Les mouvements de translation s'atténuent rapidement dans la plage des fréquences adimensionnelles entre 0 à 2. L'onde de surface développe aussi le mode de balancement qui atteint son maximum aux environs de la fréquence adimensionnelle $a_0 = 2$, et tend à s'atténuer rapidement pour les fréquences moyennes et élevées.

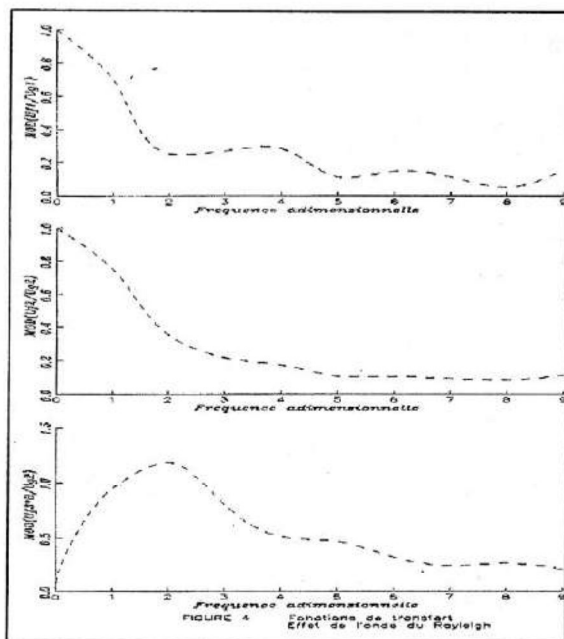


Figure 4 : Fonctions de transfert : Effet de l'onde de Rayleigh.

4 CONCLUSION

La méthode des équations intégrales aux frontières constitue un outil de calcul précis et efficace qui s'adapte particulièrement bien à l'étude dynamique des fondations superficielles et enterrées dans un milieu homogène. Dans cet article, nous avons exposé la formulation matricielle des équations intégrales aux frontières pour le calcul de la réponse sismique de la fondation filante et rigide, celle-ci est posée sur un demi-espace homogène et élastique et excitée par divers types d'ondes sismiques (P, SV, et Rayleigh) selon plusieurs angles d'incidence.

Pour les trois types d'excitation, nous pouvons conclure que les déplacements de translation se réduisent significativement aux fréquences moyennes et élevées. La réduction est plus importante pour les ondes à angle d'incidence faible (inférieur à 45°) que pour les ondes à angle d'incidence important. Aussi, aux fréquences moyennes, nous observons un développement important du balancement, lequel se réduit aux fréquences supérieures; cette réduction est plus accentuée pour les ondes à angle d'incidence faible.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Dominguez : "Response of Embedded Foundations to Travelling Waves". Report N°.R78.24, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, USA 1978.
- [2] J. Dominguez & R. Abascal : "Seismic response of strip footings on zonea viscoelastic Soils". J. of Eng mechanics, Vol.115, N°5, pp.913-934, 1989.
- [3] M. Hadid & M.K. Berrah : "Boundary élément method applied to elastodynamic problems : application to soil-foundation interaction". Algerian journal of technology, Ecole Nationale Polytechnique, série A, Vol.11, pp.1-13, 1995.
- [4] M. Hadid & M.K. Berrah : "Evaluation des impédances dynamiques de fondations filantes par la méthode des équations intégrales aux frontières : Formulation". Revue Algérie Equipement, N° 19, pp.10-15, 1995.
- [5] M. Hadid & M.K. Berrah : "Evaluation des impédances dynamiques de fondations filantes par la méthode des équations intégrales aux frontières étude paramétrique". Algérie Equipement, N° 20, pp.6-11, 1995.
- [6] D.L. Karabalis & D.E. Beskos : "Dynamic Response of 3D Rigid Surface Foundations by Time Domain Boundary Element Method". Earthquake Eng. and struct. Dys., Vol. 12, pp.73-94, 1984.