SDLX106 – Impédances de sol sous une fondation rectangulaire enfoncée dans un milieu homogène

Résumé :

Ce test participe à la validation du chaînage *Code_Aster* - MISS3D. Il représente un cas type de calcul d'impédances de sol sous une fondation rectangulaire enfoncée dans un milieu homogène. Les fonctions de transfert inverses des impédances obtenues par le chaînage entre *Code_Aster* et MISS3D sont comparées à celles obtenues par une autre méthode de calcul, utilisant une modélisation exclusive par *Code_Aster*, où on représente la condition de milieu infini par des éléments absorbants affectés aux frontières d'un volume de sol homogène entourant la fondation. On obtient des écarts d'environ 10 % pour 2 valeurs de fréquence choisies respectivement dans la gamme basse et la gamme élevée.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Le logiciel MISS3D utilise la méthode fréquentielle de couplage pour tenir compte de l'interaction sol-structure. Cette méthode, basée sur la sous-structuration dynamique, consiste à découper le domaine d'étude en trois sous-domaines :

- le sol (qui est discrétisé en éléments de frontières),
- la fondation (qui est maillée en EF),
- la structure (qui est maillée en EF et représente le bâtiment et/ou un domaine borné de sol).

Le sol

Le sol correspond à une couche de milieu homogène semi-infini.

La fondation

La fondation rectangulaire est représentée sur la [Figure 1.1-a] ci-dessous. Elle a pour dimensions une longueur de $24\,m$ dans la direction X, une largeur de $12\,m$ dans la direction Y et une hauteur d'enfoncement de $8\,m$. Elle est modélisée alors par 108 éléments surfaciques. Pour accélérer les calculs, on a volontairement déraffiné en hauteur : en pratique, il faudrait utiliser des mailles de forme carré et donc deux fois plus de mailles en hauteur.

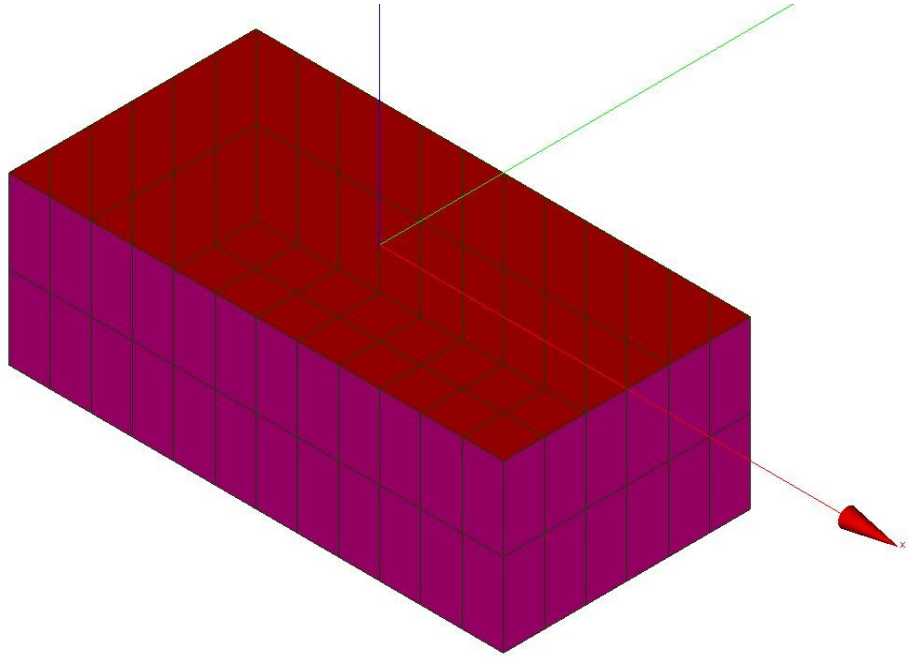


Figure 1.1-a : Maillage surfacique de la fondation

La structure

La structure est constituée d'éléments massifs représentant un volume de sol homogène entourant la fondation. Elle a pour dimensions une longueur de $72\,m$ dans la direction X, une largeur de $72\,m$ dans la direction Y et une hauteur d'enfoncement de $36\,m$. Elle est modélisée alors par 11520 éléments massifs. La structure est représentée sur la [Figure 1.1-b] ci-dessous.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

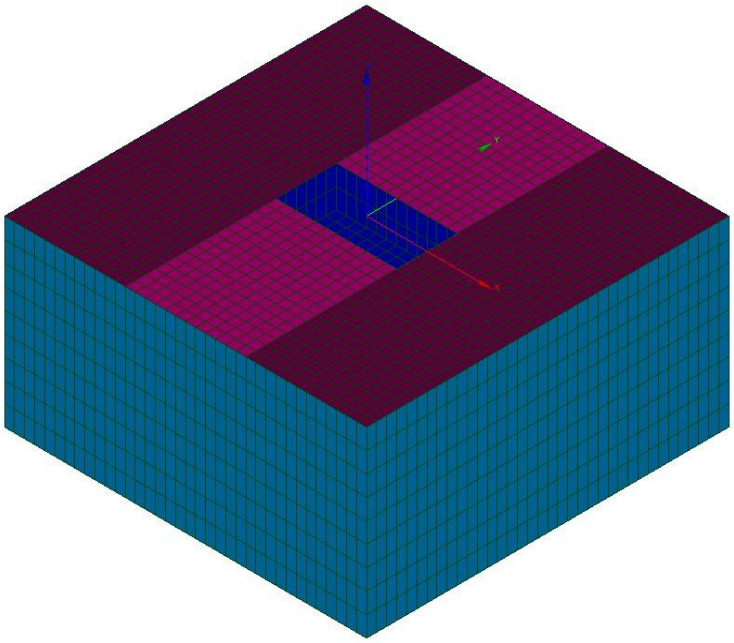


Figure 1.1-b : Maillage volumique de la structure

Le sol

Les caractéristiques mécaniques du modèle de sol élastique qui ont été utilisées sont celles indiquées ci-dessous. Elles permettent d'obtenir une vitesse d'onde de cisaillement de $800\,m/s$ pour le sol homogène.

$E\ (N/m^2)$	4.13 E9
ν	0.333
$\rho\ (kg/m^3)$	2420
AMOR_HYST	0.1

La fondation et la structure

Les caractéristiques mécaniques de la fondation et de la structure qui ont été utilisées sont les mêmes que celles du sol décrites plus haut.

1.2 Conditions aux limites et chargements mécaniques

Pour calculer les 6 modes statiques de corps rigide de la fondation et les modes propres, on bloque les 6 degrés de liberté de translation et de rotation du nœud central à la base de la fondation en y imposant une relation de liaison solide. On applique également en ce nœud central 6 chargements de force nodale de module 1.E6 en chacune des 6 composantes de translation et de rotation.
On obtient alors comme réponses à ces 6 sollicitations les fonctions de transfert inverses des impédances par deux chemins de calcul harmonique : soit un calcul modal sur la base des modes statiques de fondation en inversant directement les impédances obtenues par le chaînage entre *Code_Aster* et MISS3D sur un modèle réduit à la fondation, soit un calcul sur base physique par une autre méthode utilisant une modélisation exclusive par *Code_Aster* d'un grand volume de sol homogène entourant la fondation : avec cette modélisation, on représente la condition de milieu infini par des éléments surfaciques absorbants affectés aux frontières de ce volume.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Les résultats de référence sont les impédances de sol obtenues à partir des champs de déplacements incidents et des contraintes induites calculés par le logiciel MISS3D en divers niveaux de profondeur d'un sol stratifié. Le champ incident à la surface du sol est considéré unitaire dans chaque direction de l'espace et pour toute fréquence de sollicitation. La variation de ce champ dans la profondeur du sol, ou déconvolution, est obtenue à partir de fonctions de Green. Ces fonctions constituent une base de solutions élémentaires, représentant la réponse, en divers niveaux récepteurs, à des sollicitations unitaires en divers niveaux sources du sol [bib1].

2.2 Résultats de référence

On compare les fonctions de transfert inverses des impédances obtenues par le chaînage entre *Code_Aster* et MISS3D à celles obtenues par l'autre méthode de calcul, utilisant une modélisation exclusive par *Code_Aster*, où on représente la condition de milieu infini par des éléments absorbants affectés aux frontières d'un grand volume de sol homogène entourant la fondation.
On pourra également comparer les valeurs d'impédance pour chacune des 6 directions de corps rigide obtenues par inversion des fonctions de transfert précédentes à celles données par la référence [bib2] faisant la synthèse de plusieurs études numériques ou semi-analytiques réalisées par divers auteurs.

2.3 Références bibliographiques

1 D. CLOUTEAU : « Manuel de référence de MISS3D – version 6.3 – Centrale Recherche SA »

2 J. G. SIEFFERT & F. CEVAER : « Calcul des impédances de fondation – Centrale Nantes – Editions Ouest-France »

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Les caractéristiques utilisées et le maillage sont ceux déduits des données du [§1]. On utilise 2 fréquences de calcul correspondant respectivement à une fréquence de la gamme basse et une fréquence de la gamme haute pour des valeurs respectives de paramètre adimensionnel de fréquence $a0=\omega R/Vs$ de 0.4 et 1.2 soit 8.5 et $25.5\,Hz$ si on prend une valeur de $6\,m$ pour R égale à la demi-largeur de la fondation.
On utilise dans CALC_MISS le mode de calcul automatisé des paramètres de MISS3D.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage fourni à *Code_Aster* contient des mailles de types QUAD4 pour modéliser la fondation rectangulaire modélisée par des éléments DST. Il est important d'avoir orienté les éléments de surface de la fondation avec normale rentrant dans le sol. On obtient en tout 108 mailles surfaciques pour la fondation avec une taille de maille de $2\,m$ environ en horizontal et $4\,m$ en vertical (on a déraffiné en vertical pour diminuer le temps de calcul mais la valeur recommandée est de $2\,m$).

Le maillage contient également 23040 mailles de type HEXA8 pour modéliser le volume de sol homogène entourant la fondation avec des éléments massifs 3D. La surface extérieure de ce volume de sol est discrétisée par 3888 mailles QUAD4 affectées par des éléments 3D_ABSO pour représenter la condition de frontière absorbante.

3.3 Grandeurs testées et résultats

Les fonctions de transfert inverses des impédances obtenues par le chaînage entre *Code_Aster* et MISS3D sont comparées à celles obtenues par une autre méthode de calcul, utilisant une modélisation exclusive par *Code_Aster*, où on représente la condition de milieu infini par des éléments absorbants affectés aux frontières du volume de sol homogène entourant la fondation.

Les valeurs des fonctions de transfert ci-dessous sont testées pour chacune des 6 composantes à 2 valeurs de fréquence correspondant respectivement à une gamme haute et une gamme basse et à des valeurs de $a0$ proches respectivement de 0.4 et 1.2 .

Calcul de référence (Code_Aster uniquement) :

Identification	Valeur de référence	Type de référence	Tolérance
$U11$ ($8.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U11$ ($25.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U22$ ($8.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U22$ ($25.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U33$ ($8.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U33$ ($25.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U44$ ($8.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U44$ ($25.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U55$ ($8.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U55$ ($25.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U66$ ($8.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-
$U66$ ($25.5\,Hz$)	-	'NON_REGRESSION'	-

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Calcul *Code_Aster*-MISS3D :

Comparaison avec le calcul *Code_Aster* uniquement

Identification	Valeur de référence	Type de référence	Tolérance
$U11b$ ($8.5\,Hz$)	4.405562E-06-3.103320E-06j	'AUTRE_ASTER'	7%
$U11b$ ($25.5\,Hz$)	9.786317E-07-2.972870E-06j	'AUTRE_ASTER'	11%
$U22b$ ($8.5\,Hz$)	4.174931E-06-2.920876E-06j	'AUTRE_ASTER'	9%
$U22b$ ($25.5\,Hz$)	1.042063E-06-2.641335E-06j	'AUTRE_ASTER'	18%
$U33b$ ($8.5\,Hz$)	3.670733E-06-3.539087E-06j	'AUTRE_ASTER'	21%
$U33b$ ($25.5\,Hz$)	5.687622E-07-2.420604E-06j	'AUTRE_ASTER'	18%
$U44b$ ($8.5\,Hz$)	6.997733E-08-1.411643E-08j	'AUTRE_ASTER'	35%
$U44b$ ($25.5\,Hz$)	4.736895E-08-4.387128E-08j	'AUTRE_ASTER'	35%
$U55b$ ($8.5\,Hz$)	3.938570E-08-1.105361E-08j	'AUTRE_ASTER'	26%
$U55b$ ($25.5\,Hz$)	1.757004E-08-2.782686E-08j	'AUTRE_ASTER'	21%
$U66b$ ($8.5\,Hz$)	3.058106E-08-6.790613E-09j	'AUTRE_ASTER'	7%
$U66b$ ($25.5\,Hz$)	1.627885E-08-2.253177E-08j	'AUTRE_ASTER'	11%

Comparaison avec la référence bibliographique

Identification	Valeur de référence	Type de référence	Tolérance
$U11b$ ($25.5\,Hz$)	1.2679e-06-3.03637e-06j	'SOURCE_EXTERNE'	0,7%
$U22b$ ($8.5\,Hz$)	4.37312e-06-3.25212e-06j	'SOURCE_EXTERNE'	2%
$U22b$ ($25.5\,Hz$)	1.42056e-06-2.83346e-06j	'SOURCE_EXTERNE'	2%
$U33b$ ($8.5\,Hz$)	4.3762e-06-4.24318e-06j	'SOURCE_EXTERNE'	2%
$U33b$ ($25.5\,Hz$)	6.76519e-07-2.78195e-06j	'SOURCE_EXTERNE'	2%
$U44b$ ($8.5\,Hz$)	8.69847e-08-2.13947e-08j	'SOURCE_EXTERNE'	7%
$U44b$ ($25.5\,Hz$)	6.02497e-08-5.34563e-08j	'SOURCE_EXTERNE'	7%
$U55b$ ($8.5\,Hz$)	4.75128e-08-1.46293e-08j	'SOURCE_EXTERNE'	4%
$U55b$ ($25.5\,Hz$)	2.08904e-08-3.20829e-08j	'SOURCE_EXTERNE'	4%
$U66b$ ($8.5\,Hz$)	3.23981e-08-7.32988e-09j	'SOURCE_EXTERNE'	0,8%
$U66b$ ($25.5\,Hz$)	1.91983e-08-2.22916e-08j	'SOURCE_EXTERNE'	0,8%

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

Identique à la modélisation A, en supposant qu'il n'existe pas les groupes de nœuds PB et PB2 pour le nœud du centre de gravité de la fondation.
Une solution sans remailler est montrée dans cette modélisation. La méthodologie permet de trouver ce nœud par DEFI_GROUP, s'il existe dans le maillage, ou de la créer par POST_ELEM.

5 Modélisation C

Semblable à la modélisation B, dans le sens qu'on ajoute un nœud fictif de liaison pour le macro-élément par le nouveau mot clé GROUP_NO de MACR_ELEM_DYNA permettant de calculer les impédances fréquentielles de sol sous la fondation.
Les modes statiques d'interface de liaison rigide sont remplacés par les 6 premiers modes de fréquence nulle de la structure lde fondation ibre. On constitue un nouveau modèle mixte constitué de la structure de fondation et de la super-maille s'appuyant sur le macro-élément de sol. On teste également l'option MATR_IMPE_INIT pour extraire le comportement du sol à partir de deux fréquences.
Les réponses fréquentielles sont équivalentes à celles obtenues directement par le chaînage entre *Code_Aster* et MISS3D qui tiennent lieu de référence 'AUTRE_ASTER'.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Synthèse des résultats

La comparaison entre les fonctions de transfert inverses des impédances obtenues par le chaînage entre *Code_Aster* et MISS3D et celles obtenues par un calcul sur base physique d'un modèle, exclusivement par *Code_Aster*, du volume de sol homogène entourant la fondation, donne des écarts assez importants de 18 % en moyenne et montant jusqu'à 35 %. Cela s'explique par les points suivants dans le calcul Code_Aster seul :

- une indépendance en fréquence dans la formulation des éléments absorbants affectés aux frontières du volume représentant la condition de milieu infini.
- un volume de sol modélisé pas suffisamment grand
- un maillage du sol pas suffisamment fin

Par contre la comparaison du calcul par chaînage avec les résultats de la référence bibliographique sont bons. Les écarts sont en moyenne autour de 2 % avec la valeur basse à 0,7 % et la valeur la plus haute à 7 %.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)