

ANALYSE DYNAMIQUE NON-LINÉAIRE DES SYSTÈMES

SOLS-STRUCTURES

A. Gouasmia Département de génie civil, Université Badji Mokhtar , BP 12 Annaba, 23000, Algérie.

K. Djeghaba .Département de génie civil, Université Badji Mokhtar , BP 12 Annaba, 23000, Algérie.

Reçu le :26/04/2006 Accepté le :21/01/2007

Résumé

L'interaction entre le sol et la structure peut affecter la réponse des structures, particulièrement pour celles fondées sur un sol relativement flexible. Par conséquent, l'introduction des effets de l'interaction sol-structure (ISS) est particulièrement importante dans l'analyse des structures situées dans des zones sismiques actives.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer les effets de l'ISS sur les caractéristiques modales ainsi que sur la réponse dynamique et sismique des structures courantes. L'accent est mis sur le comportement d'ensemble d'une structure réelle de cinq étages, afin de favoriser l'introduction de telles méthodes dans la pratique courante des ingénieurs, permettant ainsi une bonne compréhension des aspects essentiels d'un problème d'ISS. Des études de sensibilité sont entreprises afin d'étudier les effets de la rigidité de la fondation sur la réponse dynamique et sismique de la structure.

Mots-clés : réponse dynamique des structures, interaction sol-structure, méthode non linéaire de Wilson (FNA).

Abstract

The interaction between the ground and the structure can affect the response of structures, particularly for those founded on a relatively flexible ground. Consequently, the introduction of the effects of soil structure interaction (SSI) is particularly significant in the analysis of structures located in a relatively active seismic zones.

The objective of this study is thus to evaluate the effects of SSI on the modal characteristics and on the dynamic response of current structures. The stress is on the overall behavior of a real structure of five storeys typically encountered in Algeria, in order to support the introduction of such methods in the current practice of civil engineers, thus allowing a good comprehension of the essential aspects of a problem including SSI effects. Sensitivity studies are undertaken in order to study the effects of the rigidity of the foundation on the dynamic response of such structures.

Key words: dynamic response of structures, soil structure interaction, Wilson Fast Nonlinear Analysis (FNA).

1 INTRODUCTION

Les conditions de sol d'un site donné peuvent amplifier la réponse dynamique d'une structure lors des mouvements sismiques forts. Ne pas tenir compte de ces amplifications de réponse peut compromettre la stabilité de la structure ou même mener à une ruine prématurée.

Les méthodes actuelles d'analyses des systèmes couplés sol-structure sont souvent réservés à des

systèmes simplifiés à un degré liberté ou à des structures longues et massives telles que les grands ponts et les centrales nucléaires, mais rarement à des structures courantes telles que les bâtiments.

L'idée principale de cette recherche est motivée par le fait qu'il reste une grande incertitude quant à la signification de l'interaction sismique sol-structure pour les structures ordinaires typiquement rencontrées en Algérie. Il peut y

avoir des effets bénéfiques et nuisibles de l'ISS. Cependant, dans beaucoup de cas, l'ISS est simplement ignoré lors de la conception sans établir si de telles interactions augmentent ou diminueront la réponse d'une structure donnée. Un deuxième objectif est que la probabilité d'un tremblement de terre important peut se produire dans les régions qui ont éprouvés des tremblements de terre forts tels que Chlef ou Zemmouri. Par conséquent, les études qui tiennent compte des effets de l'ISS aideront à mieux prévoir le comportement dynamique des structures lors des futurs tremblements de terre. On a montré dans une communication récente que les effets de l'ISS devraient être inclus, et que de tels effets ne sont pas toujours conservatifs [1].

La détermination d'un modèle sol-fondation nécessite de prendre en compte l'influence du sol de fondation en le modélisant soit par des ressorts soit par des éléments finis.

Des modèles mathématiques ont été développés et le logiciel d'éléments finis SAP2000 a été adopté pour l'analyse numérique. Les différents types d'analyses incluent ce qui suit :

- 1) structure à base fixe (encastré à la base), sans tenir compte des effets de l'interaction sol-structure (ISS);
- 2) analyses linéaires et non linéaires tenant compte des effets de l'ISS, avec les non linéaires se produisant d'abord dans le sol;
- 3) interaction non linéaire du système sol-structure en tenant compte du soulèvement et du glissement de la fondation.

Une étude de sensibilité est entreprise afin de clarifier l'importance de l'interaction non linéaire sol-structure pour le type de structure considérée.

2 STRUCTURE CONSIDÉRÉE

Les structures ordinaires en Algérie sont du type portique auto stable au nombre d'étages variant de 1 à 10. De telles structures sont généralement conçues d'après les conditions du Règlement Parasismique Algérien (RPA) [2] négligeant les effets de l'interaction sol-structure (ISS). L'objectif de cette étude comme rapporté plus haut, est la modélisation numérique des structures incorporant différents types d'appuis, afin d'évaluer les effets de l'ISS sur la réponse dynamique des structures.

On sait que l'interaction sol-structure rallongera surtout la période du mode fondamental par rapport aux modes supérieurs qui restent

presque innaffectés, et s'accompagnera généralement d'une réduction apparente de l'effort tranchant total à la base [5-8]. L'effet qui mériterait une attention particulière à cause de cette interaction, c'est surtout l'amplification des déformations dans la structure qui s'étend de négligeable à profond, et dépend principalement de la rigidité relative du sol et de la structure, ces effets mériteraient d'être investis [9-16].

Par exemple, on sait qu'une interaction importante entre le sol et la structure se manifestera par un mouvement de basculement de cette dernière (soulèvement partiel de la fondation) et peut-être aussi par des déformations locales au niveau de la fondation [17-22]. Ainsi, une bonne modélisation devrait être conçue pour observer ces effets. Différents modèles de sols (en termes de rigidités d'appuis) sont employés, afin de simuler les déplacements relatifs dans les directions horizontales, verticales et de rotation.

3 DÉFINITION DU PROBLÈME

Les structures modélisées sont des bâtiments ordinaires en béton armé de 5 étages. Des analyses par éléments finis sont entreprises afin d'étudier la réponse dynamique de telles structures. Le cas d'un modèle à base fixe (encastré à la base, sans ISS) sert de référence pour statuer sur les effets ISS.

Pour tenir compte des effets de l'ISS on utilise les propriétés d'une fondation circulaire équivalente rigide posée sur la surface d'un demi-espace semi-infini et ceci pour estimer les déformations et les constantes du ressort pour un sol homogène et isotrope [27-29]. En outre, une méthode simple et pratique, la méthode FNA (Fast Nonlinear Analysis) [4] est employée dans une analyse temporelle non linéaire. Des analyses non linéaires sont ainsi conduites considérant la flexibilité de la fondation, pour une gamme pratique de rigidités de fondations afin de simuler les différentes conditions d'appuis.

4 INTÉRACTION SOL-STRUCTURE

4.1 Modélisation

La détermination d'un modèle, tenant compte le plus correctement possible de la distribution des masses et des rigidités est une phase essentielle dans l'étude de la réponse d'une structure à une excitation dynamique quelconque.

La structure est modélisée par éléments finis, la liaison sol-structure par des ressorts (Fig.1(a): horizontal et un ressort agissant en rotation. En outre un ressort ne travaillant qu'en compression est utilisé pour modéliser le soulèvement de la fondation (ressort lié en série à un élément Gap (Fig.1(b); "Gap element" dans la bibliothèque des éléments non linéaires de SAP2000) [3].

Etant donné que nous connaissons mal les propriétés dynamiques du sol, on a assimilé le sol à un milieu élastique infini caractérisé par un module d'Young E , un coefficient de Poisson ν , et une densité ρ . Les coefficients de rigidités ainsi calculés seront variés pour tenir compte des différentes conditions d'appuis et les incertitudes relatif au sol de fondation.

4.2 Appuis élastiques

La modélisation du sol est basée sur le modèle de Winkler [24-26]. Trois ressorts indépendants de rigidités K_v , K_h , K_{rot} (modélisant la raideur du sol) sont utilisés pour les directions verticale, horizontale et de rotation afin de tenir compte de l'ISS (Fig. 1(a)).

4.3 Appuis non linéaires

Ces appuis sont supposés élasto-plastiques autorisant le soulèvement et le glissement de la semelle. Ils sont représentés par des éléments ressorts de type Gap Fig.1(b). Les éléments Gap travaillent uniquement en compression, et le soulèvement et le glissement des appuis est pris en compte. L'avantage de cet élément c'est son comportement élasto-plastique permettant ainsi de tenir compte de la non linéarité du système sol-fondation.



Figure 1

4.4 Choix des propriétés de l'élément Gap

Les propriétés matérielles (en particulier de rigidités) assignées à l'élément Gap dépendent de la manière dont il est employé. Trois cas sont possibles. L'élément peut être utilisé comme:

1. un dispositif artificiel pour relier deux sous domaines ensemble ;
2. une interface réelle raide par rapport au matériel environnant, mais qui peut glisser et Ritz (prenant en compte l'influence des efforts dynamiques) donneraient des résultats plus

un ressort vertical, un ressort

s'ouvrir en réponse à un chargement donné (ce cas inclus également la situation dans laquelle les rigidités sont inconnus ou sans importance, mais où le glissement et/ou la séparation sont possibles — par exemple, glissement et/ou soulèvement d'une fondation lors d'un séisme majeure) ;

3. une vraie interface de rigidité faible qui peut influencer le comportement du système (par exemple, l'interface entre la semelle et un sol mou). Dans cette étude, on a tenu compte de ces 3 cas.

4.4.1 Rigidité et ouverture initiale de l'élément Gap

Pour le premier cas considérer, l'élément Gap est introduit comme une interface artificielle entre la fondation et le sol autorisant le soulèvement et le glissement et ayant une rigidité infini. Ce concept purement théorique n'est pas autorisé en pratique, et une rigidité réelle devrait être introduite dans un logiciel de calcul pour simuler cette situation.

D'autre part, des valeurs excessivement grande de la rigidité K causerait des problèmes numérique dans la solution. Les programmes de calcul SAP2000 indiquent que K devrait être dans la gamme de 10^2 à 10^4 fois la rigidité correspondante de tous les éléments reliés. Dans notre étude, une ouverture initiale nulle de l'élément Gap est choisie avec un coefficient 10^2 fois la rigidité et ceci pour différentes valeurs de K (c.à.d. K_v et K_h correspondant à différents types de sol de $V_s = 50\text{m/s}$ à 1200m/s (Tableau 1)).

Pour le 2^{ème} et le 3^{ème} cas cités en haut, les rigidités K_v et K_h sont prises sans le coefficient multiplicateur 10^2

5 ANALYSE MODALE

La recherche a montré que les formes normales des modes propre résultant de la vibration libre ne sont pas le meilleur moyen d'une analyse modale. une analyse modale qui prendrait en compte l'effet des efforts statiques sur la réponse dynamique représenterait donc mieux le comportement réel de la structure, ceci est assuré en utilisant les vecteurs de Ritz [4]. Wilson a montré que les analyses dynamiques basées sur un certain nombre de vecteurs de précis que les mêmes analyses qui utiliseraient un nombre équivalent de vecteurs propres (ne

prenant pas en compte l'influence des efforts dynamiques) [23].

6 ANALYSE DYNAMIQUE

Dans cette partie, une analyse modale utilisant les vecteurs de Ritz est effectuée afin de déterminer les caractéristiques propres de la structure (valeurs propres et vecteurs propres). Pour surmonter les difficultés liées à l'analyse non linéaire, on se propose d'utiliser la méthode FNA (Fast Nonlinear Analysis) de Wilson afin de tenir compte des non linéarités qui se développent dans le système sol-structure [4].

7 EXEMPLE NUMÉRIQUE

La structure choisie est un bâtiment courant en béton armé de R+5 (Fig. 2), la hauteur d'étage est de 4,08m avec trois travées de 3,50m chacune. Les dimensions des poteaux et des poutres sont de 0,3m x 0,3m. On a deux types de

fondations, semelles isolées sous poteaux de 1,5x1,5m et de 2,1x2,1m.

charges permanentes:

Niveau terrasse: $G = 2,35\text{t/m}$

Niveau étage: $G = 2,92\text{t/m}$

charges d'exploitations:

Niveau terrasse: $Q = 0,34\text{t/m}$

Niveau étage: $Q = 1,18\text{t/m}$

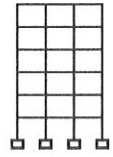


Figure 2

Cas considérés:

- Modèle A: structure encastré à la base;
- Modèle B: Eléments Gap sous poteaux extérieures (autorisant le soulèvement et le glissement de la fondation) et ressorts sous poteaux internes (K_v , K_h et K_{rot});
- Modèle C: même cas que Modèle B avec toutes les rigidités multiplier par un facteur 10^2 ;
- Modèle D: Ressorts sous poteaux (K_v , K_h et K_{rot}).

vitesse des ondes de cisaillement (m/s)	Rigidité KN/m					
	Semelle: 1,5 x 1,5(m)			Semelle: 2,1 x 2,1(m)		
V_s	K_v	K_h	K_{rot}	K_v	K_h	K_{rot}
50	20553	20606	6942	28773	28863	19094
100	82212	82423	27770	115090	115450	76378
200	328848	3296	111078	460360	461802	305510
300	739908	741805	249926	1035810	1039054	687398
400	1315392	1318765	444312	1841440	1847206	1222042
500	2055300	2060570	694238	2877250	2886260	1909440
600	2059632	2967221	999702	4143240	4156214	2749594
1200	11838528	11868883	3998808	16572960	16624858	10998374

Tableau 1: propriétés du problème considéré *

Note: les coefficients d'impédances K_v , K_h et K_{rot} sont calculés d'après les équations données au tableau 2; l'amortissement est fixé à 0,05%

Direction	Verticale	Horizontale	Rotation
Rigidité	$K_v = \frac{4Gr}{1-\nu}$	$K_h = 18,2Gr \frac{(1-\nu^2)}{(2-\nu)^2}$	$K_{rot} = 2,7Gr^3$

Tableau 2: Impédance de fondations superficielles circulaire rigide reposant sur un demi-espace élastique et homogène *

où: G - module de cisaillement ($G = V_s \rho / g$); r - rayon de la fondation circulaire équivalente; ρ - densité.

*Source: Fundamentals of Earthquake Eng., by Newmark and Rosenblueth, Prentice-Hall, 1971.

8 RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Pour la structure mentionnée ci-dessus une comparaison des résultats est entreprise afin d'évaluer les effets de l'ISS, en premier lieu, en

termes de périodes fondamentales (Tableau 3). On limite notre présentation et analyse des résultats pour trois types de sol seulement de caractéristiques mécaniques ($V_s = 50, 400, 1200\text{m/s}$) représentant trois conditions de sols: meuble, moyen et dur.

L'analyse non linéaire incluant les effets ISS est la partie la plus importante de l'étude (les structures réelles sont non linéaires par nature). Pour observer mieux le rallongement des périodes fondamentales, des analyses linéaires et non linéaires incluant les effets ISS sont comparées à ceux des conditions à bases fixes. Il est aussi intéressant de comparer le comportement du bâtiment qui n'est pas autorisé ni au soulèvement ni au glissement (comportement linéaire) avec le comportement du même bâtiment ou le soulèvement et le glissement sont permis (comportement non linéaire) (Tableau 4).

Il faut souligner que l'analyse non linéaire incluant les effets ISS devrait être conduite afin de vraiment évaluer les effets ISS.

Comme prévu, le sol meuble et pour tous les modèles considérés (Modèles B, C et D) amplifie la réponse structurale, l'effort axial et prolonge les périodes fondamentales mais réduisait considérablement l'effort tranchant et le moment de basculement (Tableau 5). Pour le sol moyen, on obtient une réduction importante de l'effort tranchant avec tous les autres résultats presque inchangés.

Pour le cas d'un sol dur, les résultats obtenus sont presque identiques à celles obtenues dans le cas d'un système à encastrement parfait. Et on peut déduire dans ce cas que le modèle à encastrement parfait, largement utilisé dans la pratique, représente en fait un sol dur ($V_s=1200\text{m/s}$).

L'autre remarque, c'est l'influence de la rigidité de l'élément Gap sur les résultats. Pour un sol meuble, c'est le moment à la base qui est le plus influencé. Pour un sol moyen, c'est plutôt l'effort tranchant; et pour un sol dur, il n'y a aucune influence sur les résultats. Pour le cas des structures considérées (R+5), on préconise de prendre la vraie rigidité de l'élément Gap.

En permettant le soulèvement et le glissement des fondations le déplacement latéral au sommet de la structure n'a pas beaucoup changé. Cependant, l'effort tranchant à la base est réduit considérablement (-74,0%), permettant ainsi une réduction du moment total de basculement. Il est ainsi clair qu'autorisant le soulèvement et le glissement des fondations constituerait un moyen naturel d'isolation sismique.

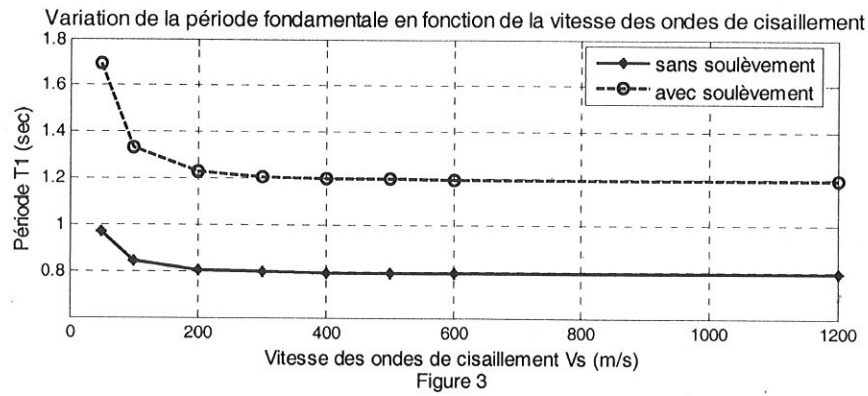
Dans le tableau 4 on trouve aussi les résultats de la même structure, si cette dernière est soumise à deux fois les accélérations du séisme d'El Centro.

En plus de la perspicacité gagnée d'une analyse ISS, on améliore notre compréhension du vrai comportement des structures. En raison de cette compréhension, les méthodes actuelles d'analyses et de conceptions des structures peuvent être modifiées de sorte que les dommages et les dégâts causés par de futurs tremblements de terre soient réduits au maximum. Il est possible d'étudier les effets de l'ISS, en créant d'abord un modèle qui représente le plus correctement possible la structure et puis exécuter une analyse de sensibilité tenant compte du soulèvement et glissement des fondations.

V_s (m/s)		50	100	200	300	400	500	600	1200
T_1 (sec)	Sans soulèvement	0,96840	0,84304	0,80254	0,7968	0,7940	0,79271	0,7920	0,79079
	Avec soulèvement	1,69253	1,33465	1,22908	1,20854	1,20127	1,19789	1,1960	1,19290
	Encastré	0,79038							

Tableau 3: période du mode fondamental en fonction des vitesses des ondes de cisaillement

Les résultats donnés au tableau 3 sont représentés sur la figure 3.



Cas considérés	vitesse des ondes de cisaillement (m/s)	Intensité du séisme	Déplacement latéral max. au sommet (cm)	Effort axial max. dans le poteau (KN)	Effort tranchant max. à la base (KN)	Moment max. à la base (KN.m)
Modèle A	Encastré	El Centro	11,1	575,5	440,8	108,3
		2El Centro	22,2	783,8	881,6	211,6
Modèle B	50	El Centro	19,77	617,6	327,0	0,0
		2El Centro	39,55	831,4	651,9	0,0
	400	El Centro	11,22	575,8	114,5	106,9
		2El Centro	22,87	792,5	225,3	207,7
	1200	El Centro	11,10	575,0	431,2	103,4
		2El Centro	22,62	792,0	856,6	205,7
Modèle C	50	El Centro	11,19	575,6	546,4	103,4
		2El Centro	22,85	793,5	897,4	206,0
	400	El Centro	11,09	575,2	445,1	108,1
		2El Centro	22,46	789,1	885,2	210,3
	1200	El Centro	11,12	575,7	440,8	288,0
		2El Centro	22,34	786,6	878,7	206,6
Modèle D	50	El Centro	18,32	609,4	325,1	66,1
		2El Centro	36,65	814,5	650,2	131,6
	400	El Centro	11,23	575,9	271,0	106,6
		2El Centro	22,45	783,4	542,0	208,4
	1200	El Centro	11,12	575,5	431,6	103,7
		2El Centro	22,25	783,8	863,2	206,8

Tableau 4. Sommaire des résultats pour le bâtiment R+5 soumis au séisme d'El Centro $\xi=0,05$

Les résultats donnés au tableau 4 en termes de déplacement latéral au sommet du bâtiment sont représentés sur la figure 4.

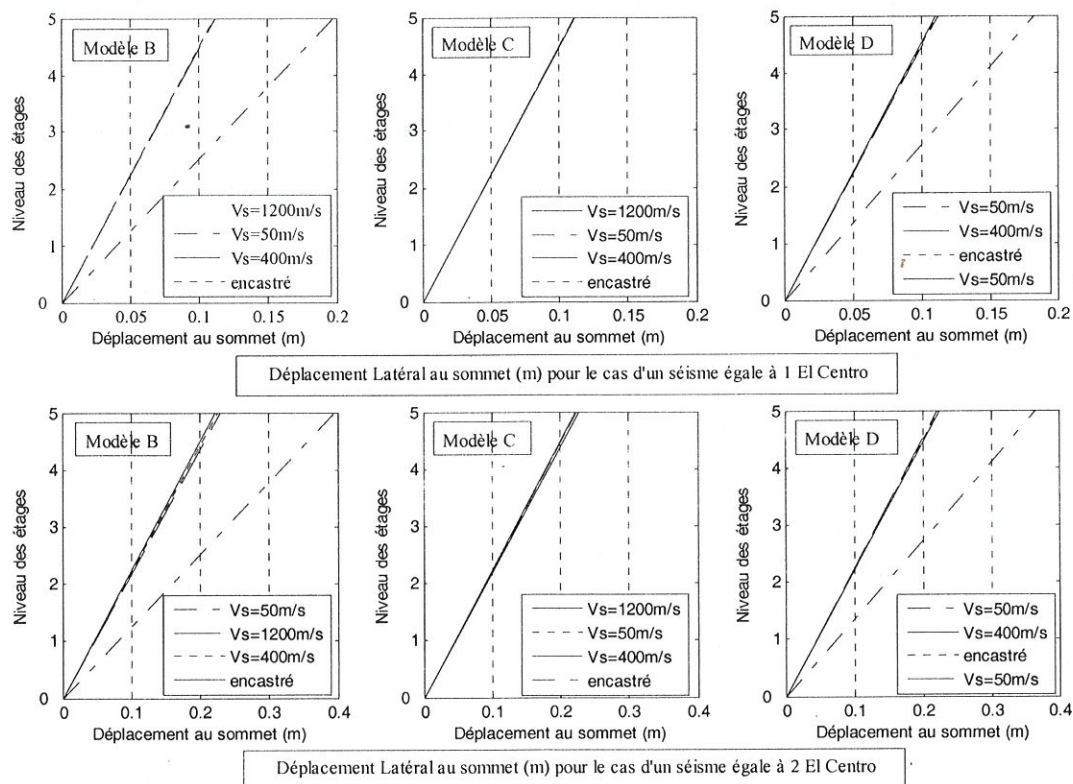


Figure 4

Différence entre Modèles considérés	vitesse des ondes de cisaillement (m/s)	Différence en %			
		Déplacement latéral max. au sommet	Effort axial max. dans le poteau	Effort tranchant max. à la base	Moment max. à la base
Modèle A & Modèle B	50	+43%	+6,8%	-25,8%	-99,9%
	400	+1%	0%	-74,0%	-1,2%
	1200	0%	0%	-2,2%	-4,4%
Modèle A & Modèle C	50	+58%	+29%	-28,2%	-39%
	400	0,3%	+0,9%	-41,3%	-1,3%
	1200	0%	+0,1%	-2,2%	-4,1%
Modèle A & Modèle D	50	+39%	+5,6%	-26,2%	-38,7%
	400	+1%	0%	-38,5%	-1,6%
	1200	0%	0%	-2%	-4,2%

Tableau 5. Sommaire des résultats en termes de pourcentage pour le bâtiment R+5 soumis au séisme d'El Centro

BIBLIOGRAPHIE

[1] A. Gouasmia, K. Djeghaba: "Effects of Nonlinear Dynamic Soil-Structure Interaction on the Response of Buildings". 4^{ème} Symposium International sur la Construction; Chlef 22-24 novembre 2005.

[2] Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / Version 2003.

[3] SAP2000 programs and Manuals. CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS and SAFE.

Computers and Structures Inc., Berekely, California, U.S.A. September 2004.

[4] E. L. Wilson: "A New Method of Dynamic Analysis for Linear and Non-Linear Systems". Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 1, pp. 21-23, 1985.

[5] P.C. Jennings and J. Bielak . "Dynamics of building-soil interaction". Bulletin of the Seismological Society of America. 63: 9-48, 1973.

[6] J.P. Wolf. "Dynamic soil-structure interaction". Prentice Hall 1985.

- [7] L. Menglin and W. Jingning. "Effects of Soil-Structure Interaction on Structural Vibration Control. Dynamic Soil-Structure Interaction: Current Research in China and Switzerland", ed. Z. Chuhan & J.P. Wolf, Elsevier Science, Amsterdam, 189-202, 1998.
- [8] M. Çelebi, J. Lysmer and E. Luco. "Recommendations for a Soil-Structure Interaction Experiment" USGS, OFR: 92-295, April 1992.
- [9] M. Çelebi. "Analyses of Responses of Two Instrumented Buildings With Downhole and Free-Field Recordings", Part III: Interaction, ASCE, 1992.
- [10] H. T. Tang et. al. "Lotung large-scale seismic experiment and soil-structure interaction method validation", Nuclear Engineering and Design, 123, 397-412, 1990.
- [11] D. Aubry, D. Clouteau and J.M. Crepel. "Interaction sismique structure-sol-structure, Application aux ponts", Proc. Journées 'Ponts en zone sismique', AFPS-AFPC, 1992.
- [12] D. Aubry J.M. Crèpel. "Interaction sismique fluide-structure : Application aux barrages voûte". Actes 1er Colloque français de Génie Parasismique. A.F.P.S. 1986.
- [13] M.D.Trifunac, S.S. Ivanovich, M.I. Todorovska, E.I. Novikova, A.A. Gladkov. "Experimental evidence for flexibility of a building foundation supported by concrete friction piles". Soil Dynam Earthquake Engng; 18:169-87, 1999.
- [14] M.D.Trifunac, S.S. Ivanovich, M.I. Todorovska. "Seven story reinforced concrete building in Van Nuys, California: strong data recorded between 7 February 1971 and 9 December 1994, and description of damage following the Northridge 17 January 1994 earthquake". Report no. CE 99-02, Dept. of Civil Eng., University of Southern California, Los Angeles, California, 1999.
- [15] S. Iai and T. Sugano. "Soil-Structure Interaction Studies through Shaking Table Tests" Theme Lecture for the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1999.
- [16] K. Konagai and R. Ahsan. "Simulation of Nonlinear Soil-Structure Interaction on a Shaking Table" J. of Earthquake Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 31-51, 2002.
- [17] A.M. Chandler and H. Sikaroudi. "Structure-Foundation Interaction in the Earthquake Response of Torsionally Asymmetric Buildings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 11, 1-16, 1992.
- [18] M. Çelebi, and A.N. Gündüz. "Efficient Modal Analysis of Asymmetric Multi-Storey Buildings Including Soil-Structure Interaction", Proc. 4th International Colloquium on Computation of Shell and Spatial Structures, Crete, Greece, 5-7 June, 2000.
- [19] K.S. Sivakumaran. "Seismic Analysis of Mono-Symmetric Multistorey Buildings Including Foundation Interaction", Journal of Computer and Structures, 36, 99-107, 1990.
- [20] K.S. Sivakumaran and T. Balendra. "Seismic Response of Multistorey Buildings Including Foundation Interaction and P-Δ effects", Engineering Structures, 9, 277-284, 1987.
- [21] K.S. Sivakumaran, M.S. Lin and P. Karasudhi. "Seismic Analysis of Asymmetric Building-Foundation Systems", Journal of Computers and Structures, 43, 1091-1103, 1992.
- [22] A.S. Veletsos and Y.T. Wei. "Lateral and Rocking Vibrations of Footings", Journal of Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, 97 (SM 9), 1127-1248, 1971.
- [23] W.H. Wu and A. Smith. "Efficient Modal Analysis for Structures with Soil-Structure Interaction", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 283-299, 1995.
- [24] G. Gazetas and G. Mylonakis. "Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues" Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III ASCE, eds. P. Dakoulas, M. K. Yegian, and R. D. Holtz, Vol. II, pp. 1119-1174, 1998.
- [25] P. C. Jennings and J. Bielak. "Dynamics of building-soil interaction" Bull. Seism. Soc. Am. 63(1), 9-48, 1973.
- [26] J. M. Roesset. "A review of soil-structure interaction, Soil-structure interaction: The status of current analysis methods and research", ed. J. J. Johnson, Report Nos. NUREG/CR-1780 and UCRL-53011, US Nuclear Regulatory Commission and Lawrence Livermore Laboratory, 1980.
- [27] A. S. Veletsos and J. W. Meek. "Dynamic behavior of building-foundation systems" Earthq. Engrg. Struct. Dyna. 3(2), 121-138, 1974.
- [28] A. S. Veletsos and V. V. Nair. "Seismic interaction of structures on hysteretic foundations" J. Struct. Engrg. ASCE 101(1), 109-129, 1975.
- [29] R. W. Clough and J. Penzien. "Dynamics of structures". New York: Wiley, 1975.