

EVIDENZA SPERIMENTALE DELL'INTERAZIONE DINAMICA TERRENO- PALI-STRUTTURA IN ARGILLA SOFFICE DA PROVE IN CENTRIFUGA

Maria Iovino

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
maria.iovino@assegnista.uniparthenope.it

Emmanouil Rovithis

Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering EPPO-ITSAK, Salonicco (Grecia)
rovithis@itsak.gr

Raffaele Di Laora

Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"
raffaele.dilaora@unicampania.it

Luca de Sanctis

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
luca.desanctis@uniparthenope.it

Sommario

Nella nota vengono presentati i risultati sperimentali preliminari di due serie di prove in centrifuga condotte a 50g su modelli di pali, singoli e in gruppo, immersi in argilla e soggetti ad azioni dinamiche. Ciascuna serie di prove è consistita in due voli. Nel primo volo è stata monitorata la risposta del sistema fondazione-terreno, approfondendo in tal modo i meccanismi di interazione cinematica tra pali e terreno. Nel secondo volo, a ciascun modello di fondazione è stata collegata una massa oscillante, potendo così indagare il comportamento sismico del sistema terreno-fondazione-struttura. I dati sperimentali vengono presentati in termini di risposta del terreno lungo una verticale monitorata, accelerazione spettrale alle teste dei pali e rapporto tra le accelerazioni spettrali della struttura e della superficie del terreno. I risultati mostrano che in casi particolari i pali possono addirittura amplificare il moto di campo libero.

1. Introduzione

L'analisi sismica delle strutture fondate su pali viene convenzionalmente eseguita considerando la struttura fissa alla base e soggetta al moto del terreno in condizioni di campo libero, trascurando l'interazione tra terreno, pali e struttura che può invece influenzare sia il moto sismico alla base della struttura, sia le sue caratteristiche vibrazionali. Tuttavia, evidenze teoriche e sperimentali dimostrano che la presenza dei pali modifica (generalmente riduce) la domanda sismica alla base delle strutture (Kawamura, 1977; Otha et al., 1980; Gazetas 1984; Di Laora e de Sanctis, 2013; Rovithis et al., 2017) e che, in determinate condizioni, questa riduzione può essere particolarmente importante. Ad esempio, Di Laora e de Sanctis (2013) riportano notevoli riduzioni (fino al 50% - 70%) dell'accelerazione di progetto per strutture a periodo basso (rigide) fondate su pali di grande diametro immersi in terreni soffici. Un'interpretazione olistica dell'azione filtrante dei pali è stata suggerita di recente da Iovino et al. (2019), assumendo che i pali mediano il profilo non uniforme di spostamento imposto dal terreno circostante lungo una frazione della lunghezza attiva del palo detta lunghezza effettiva.

D'altra parte, l'effetto della deformabilità del terreno sulle caratteristiche vibrazionali di una struttura in termini di allungamento del periodo naturale e modifica dei meccanismi dissipativi (per isteresi e per radiazione), è noto già dai primi anni '70 (Parmelee, 1967; Veletsos e Meeck, 1974; Maravas et al., 2014; Zania, 2014) ed è supportato da evidenze sperimentali (Weissman e Prevost, 1988; Boulanger et al., 1999; Hussien et al., 2016). Nel complesso, gli effetti di interazione dinamica terreno-fondazione-struttura (SSI) possono essere benefici o dannosi a seconda della configurazione terreno-fondazione e delle caratteristiche dell'eccitazione sismica (Mylonakis e Gazetas, 2020). Il problema è stato riconosciuto anche dalle normative sismiche, specificando le condizioni per le quali gli effetti di SSI devono essere tenuti in conto. Secondo l'Eurocodice EN-1998-5:2004 (E), ignorando la modifica del moto sismico dovuta all'interazione cinematica pali-terreno, gli effetti di SSI possono essere trascurati, almeno per gli edifici comuni, perché benefici (riducendo le sollecitazioni nella sovrastruttura). La normativa FEMA 1050 (2015) suggerisce anche procedure semplici per tenere conto di questi effetti ma solo con riferimento alle fondazioni superficiali. Tuttavia, le stesse procedure non possono essere utilizzate per le fondazioni su pali. Se da un lato si potrebbe obiettare che una fondazione su pali è meno deformabile di una fondazione superficiale (a parità di dimensione in pianta) e quindi gli effetti di SSI sono meno rilevanti, dall'altro il meccanismo di dissipazione di energia per radiazione attivato dai pali è completamente diverso dal caso di fondazioni superficiali. Per approfondire questi aspetti, è stata condotta un'ampia campagna di prove in centrifuga nell'ambito del progetto COSMO finanziato dal programma di ricerca SERA (H2020-INFRAIA-2016-2017), finalizzata ad esplorare gli aspetti dell'interazione dinamica terreno-pali-struttura in argilla soffice. In questa nota viene presentata una parte dei dati sperimentali con riferimento alla risposta del sistema pali-terreno in assenza e in presenza di sovrastruttura. Questi vengono presentati in termini di risposta del terreno, accelerazioni spettrali alle teste dei pali e rapporto di accelerazioni spettrali alla testa della struttura e alla superficie del terreno.

2. Prove in centrifuga

Il programma sperimentale è consistito in due serie prove in centrifuga eseguite a 50g su modelli fisici in scala ridotta di palo singolo e gruppi di pali (Figura 1) immersi in un caolino noto come Speswhite Kaolin Clay, il cui comportamento meccanico è stato ampiamente studiato allo Schofield Centre dell'Università di Cambridge, dove sono state condotte le prove (Lam, 2010; Lau, 2015). I modelli, equipaggiati con trasduttori di spostamento, trasduttori di pressioni interstiziali e accelerometri, sono stati preparati in contenitori del tipo Equivalent Shear Beam (Figura 2). I segnali (9 in totale), costituiti da treni di onde sinusoidali, sweep sinusoidali e terremoti reali, sono stati applicati ai modelli in volo tramite un attuatore servo-idraulico.

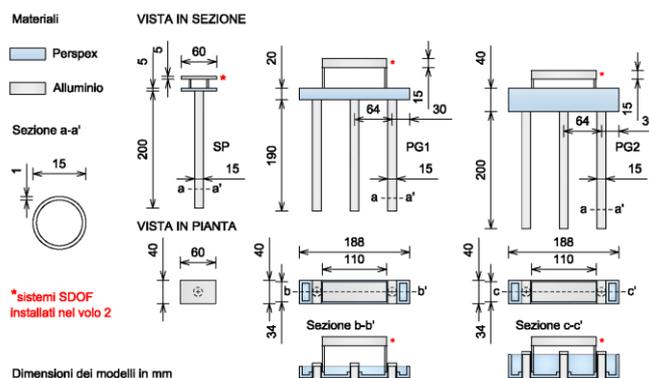


Fig 1. Modelli di fondazioni utilizzati nelle prove in centrifuga (scala del modello)

Nel primo dei due voli in cui è consistita ciascuna prova, è stata monitorata la risposta del sistema fondazione-terreno, approfondendo i meccanismi di interazione cinematica tra pali e terreno. Nel

secondo volo, a ciascun modello di fondazione è stato fissato un modello di oscillatore semplice (SDOF), consentendo di indagare il comportamento sismico del sistema terreno-fondazione-struttura. Per approfondimenti sulla preparazione del modello si rimanda all'articolo di Iovino et al. (2021).

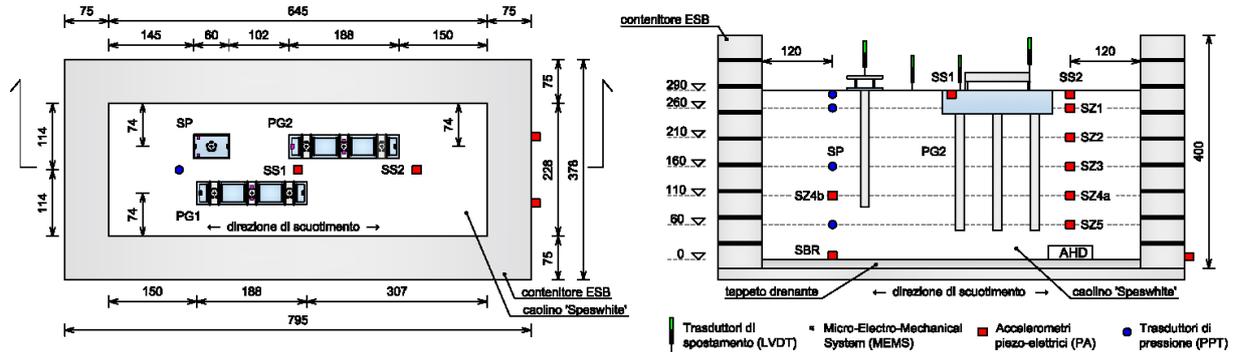


Fig 2. Modelli in centrifuga e posizione degli strumenti di misura (scala del modello)

3. Risultati

Vengono qui presentati alcuni risultati preliminari di una delle due serie di prove in centrifuga, con riferimento ai due terremoti (EQ1 e EQ2), riportati in Figura 3 insieme ai rispettivi spettri di Fourier delle ampiezze e spettri di risposta.

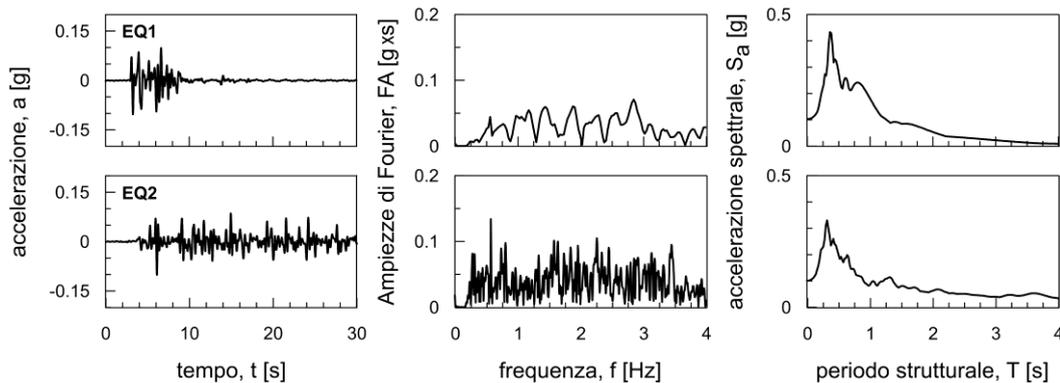


Fig 3. Caratteristiche dei terremoti applicati ai modelli di fondazione in centrifuga (scala del prototipo)

3.1 Risposta dinamica del terreno

Le Figure 4a e 4b mostrano le accelerazioni massime con la profondità registrate all'interno dello strato di caolino durante i terremoti EQ1 e EQ2, rispettivamente. Queste accelerazioni risultano abbastanza simili nei due voli, ad indicare che rigidità e resistenza del terreno non cambiano significativamente da un volo all'altro e che la presenza della sovrastruttura ha un effetto trascurabile sulle accelerazioni del terreno, anche vicino alla fondazione. Per entrambi i terremoti si osserva un'attenuazione delle accelerazioni verso la superficie del terreno, che potrebbe quindi aver raggiunto tensioni tangenziali prossime a quelle limite. In Figura 5 sono riportati gli spettri di risposta in accelerazione a diverse profondità, dai quali è possibile notare come le componenti ad alta frequenza del segnale vengono filtrate dal terreno, mentre le basse frequenze vengono ancora amplificate. Si riporta infine la risposta del terreno ad uno sweep sinusoidale di ampiezza massima 0.08g e frequenza variabile da 30 a 150 Hz, con lo scopo di determinare le frequenze naturali dello strato di terreno. I rapporti tra le ampiezze di Fourier in superficie e alla base del terreno (Figura 6) indicano una frequenza del banco di circa 0.2 Hz. Le differenze tra le ampiezze del primo picco registrate nei due voli riflettono invece l'influenza della sovrastruttura nella risposta dinamica del sistema.

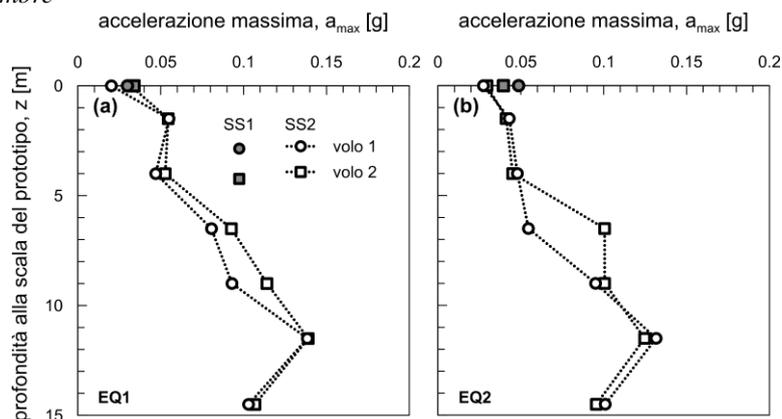


Fig 4. Profili di accelerazioni massime registrati durante i terremoti (a) EQ1 e (b) EQ2 (scala del prototipo)

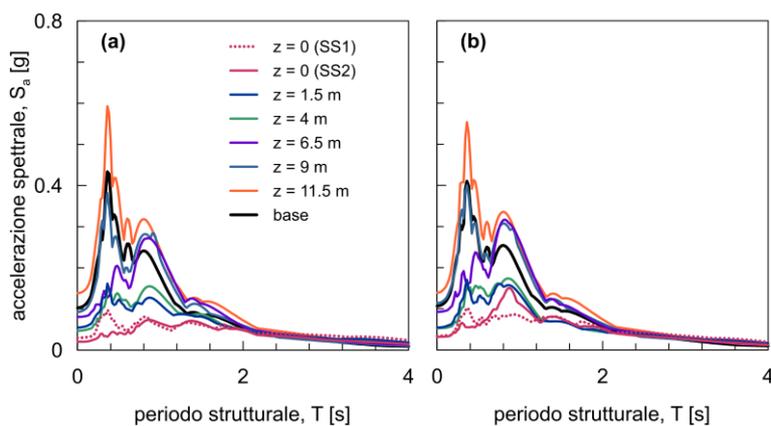


Fig 5. Spettri di risposta a diverse profondità per i terremoti (a) EQ1 e (b) EQ2 (scala del prototipo)

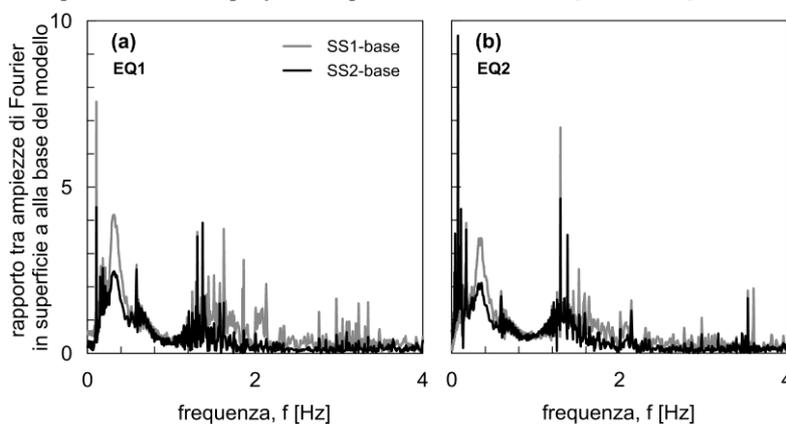


Fig 6. Funzione di amplificazione del terreno durante (a) EQ1 e (b) EQ2 (scala del prototipo)

3.2 Effetti di interazione cinematica sulla risposta alla testa del palo

Gli effetti di interazione cinematica palo(i)-terreno sono stati quindi esplorati con riferimento alle accelerazioni registrate alle teste dei pali durante il primo volo. In Figura 7 si riportano gli spettri di risposta alle teste dei pali, singoli e in gruppo, durante EQ1 ed EQ2, insieme allo spettro di risposta sulla superficie del terreno. Contrariamente all'idea che i pali riducono le ampiezze delle componenti ad alta frequenza del moto di campo libero, gli spettri di risposta mostrano una tendenza inversa. In questo caso particolare di terreno molto soffice, l'ampiezza del moto imposto alla base di una struttura fondata su pali può essere amplificata rispetto all'ampiezza del moto alla superficie del terreno, evidenziando un possibile effetto dannoso delle fondazioni su pali. Questa osservazione, per certi versi inaspettata, può essere spiegata tramite l'interpretazione dell'azione filtrante dei pali data da Iovino et al. (2019), secondo la quale i pali mediano gli spostamenti non uniformi del moto in regime di campo libero all'interno di una frazione della lunghezza attiva del palo. Se gli spostamenti non uniformi del terreno vengono deamplificati man mano che ci si avvicina alla superficie (Figura 4) allora l'azione

mediatrice dei pali può determinare ampiezze maggiori. Tuttavia, sono necessari ulteriori approfondimenti in questo caso, tenendo conto anche del contributo della componente rotazionale del moto alla testa dei pali.

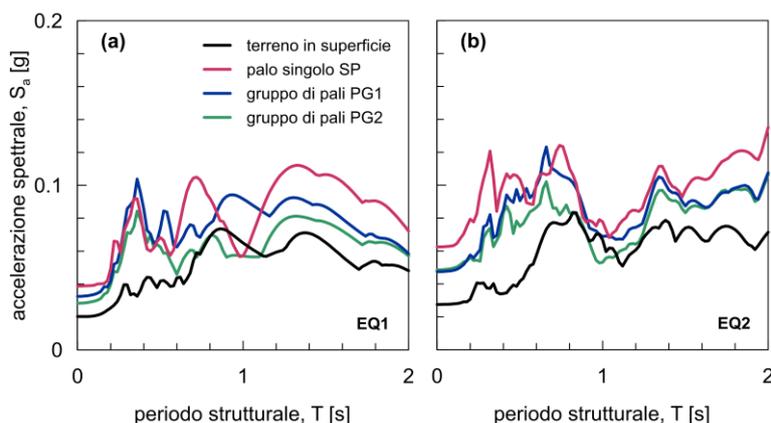


Fig 7. Spettri di risposta alle teste dei pali durante (a) EQ1 e (b) EQ2 (scala del prototipo)

3.3 Periodo del sistema terreno-fondazione-struttura

Si è già accennato al fatto che la deformabilità del terreno può influenzare considerevolmente le caratteristiche vibrazionali di una struttura in termini di allungamento del periodo naturale rispetto al caso di base fissa. Per indagare questo aspetto, sono stati calcolati i rapporti spettrali alla testa della struttura e alla superficie del terreno per ciascun sistema (Figura 8). Il periodo in corrispondenza del quale questo rapporto è massimo corrisponde al periodo naturale del sistema SSI (T_{SSI}). Si premette che il periodo a base fissa dell'oscillatore determinato sperimentalmente è pari a $T_{FIXED} = 0.2$ s. I valori sperimentali di T_{SSI} e i rapporti T_{SSI}/T_{FIXED} per ciascun sistema sono riassunti in Tabella 1. Dagli elevati valori di T_{SSI}/T_{FIXED} si evince che l'effetto di un terreno così soffice sulle caratteristiche dinamiche della struttura è rilevante. Nel caso di palo singolo, $T_{SSI}/T_{FIXED} > 2$. Nel caso dei gruppi di pali, l'effetto della deformabilità del terreno è meno pronunciato ma ancora importante, con $T_{SSI}/T_{FIXED} > 1.5$. Degno di nota è anche il fatto che T_{SSI} è quasi lo stesso per i due gruppi di pali, indicando un effetto trascurabile della profondità dell'elemento di collegamento su T_{SSI} .

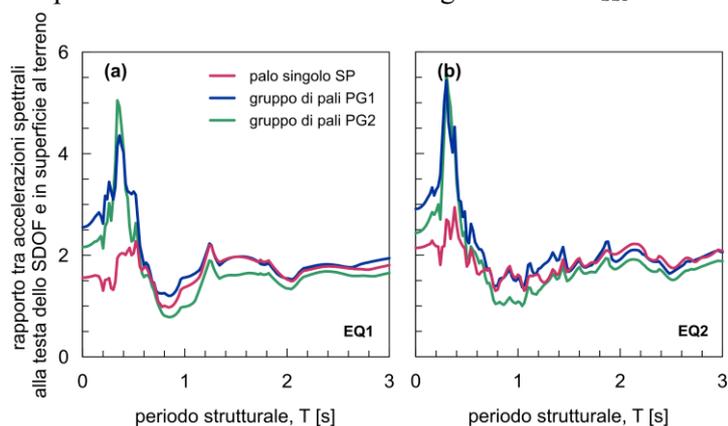


Fig 8. Rapporti spettrali testa struttura - superficie del terreno durante (a) EQ1 e (b) EQ2 (scala del prototipo)

Tab 1. Periodi T_{SSI} e rapporti T_{SSI}/T_{FIXED} da elaborazione dei dati in centrifuga

Terremoto	Sistema SSI	T_{SSI} [s]	T_{SSI}/T_{FIXED}
EQ1	Palo singolo + SDOF	0.46	2.3
	Gruppo PG1 + SDOF	0.36	1.8
	Gruppo PG2 + SDOF	0.34	1.7
EQ2	Palo singolo + SDOF	0.38	1.9
	Gruppo di pali PG1 + SDOF	0.30	1.5
	Gruppo di pali PG2 + SDOF	0.30	1.5

4. Conclusioni

In questa nota sono stati messi in luce alcuni aspetti critici dell'interazione terreno-pali-struttura attraverso prove in centrifuga eseguite a 50g su modelli di pali, singoli e in gruppo, immersi in argilla soffice e soggetti ad azioni dinamiche. Le analisi preliminari dei dati sperimentali hanno rivelato: (1) una riduzione dell'accelerazione massima dalla base alla superficie del terreno, attribuita al raggiungimento della resistenza al taglio dovuta a un'ampiezza del moto molto elevate in relazione alla scarsa resistenza del caolino, condizione che limita la trasmissione della propagazione delle onde; (2) un'amplificazione del moto alle teste dei pali rispetto a quello del terreno, dando prova che il moto alla base della sovrastruttura può essere amplificato dai pali; (3) che i periodi naturali dei sistemi terreno-fondazione-struttura possono essere notevolmente più elevati di quello della struttura a base fissa, indicando un effetto importante della deformabilità del terreno. L'effetto dello spessore dell'elemento di collegamento dei pali sul periodo della struttura è risultato invece trascurabile.

Bibliografia

- Boulanger R. W., Curras C. J., Kutter B. L., Wilson D. W., Abghari A. (1999). "Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(9), 750-759.
- Di Laora R., de Sanctis L. (2013). "Piles-induced filtering effect on the foundation input motion". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 52-63.
- Gazetas G.(1984). "Seismic response of end-bearing single piles". *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(2), 82-93, 1984.
- Hussien M. N., Tobita T., Iai S., Karray M. (2016). Soil-pile-structure kinematic and inertial interaction observed in geotechnical centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earth-quake Engineering*, 89, 75-84.
- Iovino M., Di Laora R., Rovithis E., de Sanctis L. (2019). "The Beneficial Role of Piles on the Seismic Loading of Structures". *Earthquake Spectra*, 35(3), 1141-1162.
- Iovino M., Rovithis E., Di Laora R., D'Alterio C. (2021). "Aspects of seismic soil-pile-structure interaction in soft clay by centrifuge testing". In Proc. 8th ECCOMAS, COMPDYN.
- Kawamura S., Umemura S. H., Osawa Y. (1977). "Earthquake motion measurement of a pile supported building on reclaimed ground". Proc. 2th WCEE, India.
- Lam S. S. Y. (2010). Ground movements due to excavation in clay: physical and analytical models. PhD dissertation, University of Cambridge, UK.
- Lau B. H. (2015). Cyclic behaviour of monopile foundations for offshore wind turbines in clay. PhD dissertation, University of Cambridge, UK.
- Maravas A., Mylonakis G., Karabalis D. L. (2014). "Simplified discrete systems for dynamic analysis of structures on footings and piles". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61, 29-39, 2014.
- Mylonakis G., Gazetas G. (2020). "Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?". *Journal of earthquake engineering*, 4(3), 277-301, 2020.
- Ohta T., Uchiyama S., Niwa M., Ueno K. (1980). "Earthquake response characteristics of structure with pile foundation on soft subsoil layer and its simulation analysis". Proc. 7th WCEE, Vol. 3. Istanbul, Turkey.
- Parmelee R. A.(1967). "Building-foundation interaction effects". *Journal Engineering Mech. Div., ASCE*, 93(EM2), 131-162.
- Rovithis E., Di Laora R., Iovino M., de Sanctis L. (2017). "Reduction of seismic loading on structures induced by piles in inhomogeneous soil". In Proc. 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN (pp. 1143-1154).
- Veletsos A. S., Meek J. W. (1974). "Dynamic behaviour of building-foundation systems". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(2), 121-138.
- Weissman K., Prevost J. H. (1988). "A Study of Radiation Damping and Soil-structure Interaction Effects in the Centrifuge". National Center for Earthquake Engineering Research.
- Zania V. (2014). "Natural vibration frequency and damping of slender structures founded on monopiles". *Soil dynamics and Earthquake engineering*, 59, 8-20.