

SPERIMENTAZIONE SU PALI MEDIANTE TAVOLA VIBRANTE

M.G. Durante, L. Di Sarno, S. Sica, A.L. Simonelli
Università degli Studi del Sannio
mgdurante@unisannio.it

A. Chidichimo, R. Cairo, G. Dente
Università della Calabria
achidichimo@dds.unical.it

Sommario

La risposta dei pali di fondazione sotto azioni sismiche può essere efficacemente studiata mediante sperimentazione su tavola vibrante. In questa nota sono presentati i primi risultati di un'ampia attività sperimentale su tavola vibrante presso il laboratorio BLADE dell'Università di Bristol (UK) nell'ambito di un progetto europeo SERIES (*Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies*) che ha visto coinvolti, oltre gli Autori, numerosi altri ricercatori: A.C. Taylor, S. Bhattacharya, L. Dohoru and M. Dietz (Università di Bristol); G. Mylonakis and G. Anoyatis (Università di Patras); A. Modaressi and L. Todo Bom (Ecole Centrale Paris); A. Kaynia (Norwegian Geotechnical Institute). La sperimentazione è stata effettuata su un gruppo di pali immersi in un deposito stratificato, sollecitato con input di diversa natura (*white noise, sinedwells, accelerogrammi*). Il programma dei test comprende differenti configurazioni e condizioni di carico. Lo scopo dei test è di identificare: (1) la frequenza naturale del terreno, (2) le funzioni di impedenza dei pali (rigidezza e smorzamento), (3) i coefficienti di interazione cinematica in direzione orizzontale e verticale e (4) gli effetti dell'interazione terreno-palo-struttura sulla frequenza naturale e sullo smorzamento del sistema completo.

Introduzione

L'interazione terreno-struttura è di fondamentale importanza nella valutazione della risposta sismica di alcune tipologie di strutture, quali edifici alti, ponti, antenne e strutture a mensola. Per questo tipo di opere l'interazione con il terreno può causare: (i) un moto alla base significativamente differente dal moto del terreno in condizioni *free-field* e (ii) sollecitazioni di flessione, sforzo normale e taglio nei pali di fondazione, anche in assenza della sovrastruttura. Il momento cinematico (distinto da quello inerziale, generato dai carichi che agiscono in testa ai pali per effetto della risposta dinamica della sovrastruttura) può essere significativo specialmente per pali ammorsati in terreni soffici, con un elevato contrasto di rigidità tra strati successivi.

La sperimentazione in laboratorio su modelli di palo rappresenta, insieme alle *case-histories* e alle simulazioni numeriche, uno strumento essenziale per comprendere la risposta dei pali di fondazione (singoli e in gruppo). I risultati della campagna sperimentale svolta presso il BLADE dell'Università di Bristol (UK) sono utili anche per valutare l'affidabilità delle attuali formulazioni analitiche per prevedere il momento inerziale e cinematico dei pali, tenendo conto delle proprietà del terreno e del palo, dell'interazione tra i pali e delle caratteristiche di propagazione del moto sismico nel deposito.

Sperimentazione su tavola vibrante

Il comportamento dinamico dei pali immersi in sabbie è stato studiato con prove su tavola vibrante di dimensioni 3 m x 3 m e a 6 gradi di libertà, disponibile presso il laboratorio

BLADE. Nell'ambito del progetto SERIES TA4-PILESI, la sperimentazione fisica è stata condotta in due fasi: una fase preliminare svolta a Novembre 2010 e una fase definitiva a Giugno 2011. I test sono stati effettuati montando su tavola vibrante un particolare contenitore, chiamato *shear stack*, appositamente progettato per riprodurre le opportune condizioni al contorno ai bordi del deposito (Crewe et al, 1995).

Caratteristiche del modello

Il modello testato è costituito da 5 pali in alluminio con un diametro esterno pari a 22.23 mm, spessore pari a 0.71 mm e lunghezza di 750 mm, immersi in un terreno bistrato (Figura 1a). Le caratteristiche principali del palo sono: peso dell'unità di volume $\gamma=27 \text{ kN/m}^3$, modulo di Young $E_p=70 \text{ GPa}$, coefficiente di Poisson $\nu=0.3$ e rigidità flessionale $E_p I_p=1.95 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2$. I pali 3, 4, 5 si trovano ad una distanza relativa pari a 70 mm ($s/d=3$); i pali 1 e 2 si trovano, invece, ad una distanza pari a 140 mm. Lungo i pali 4 e 5 sono state disposte otto coppie di *strain gauges* a diverse altezze, per la valutazione del momento flettente e dello sforzo normale lungo il fusto del palo; il palo 1 è stato strumentato con 4 *strain gauges* in prossimità dell'interfaccia (Figura 1b). Sono stati montati diversi accelerometri per monitorare le accelerazioni della tavola vibrante, della *shear stack*, del terreno lungo una verticale di controllo (condizioni *free-field*), della testa dei pali e della massa dell'oscillatore (Figura 1c). Dei trasduttori di spostamento (LVDT) sono stati inoltre installati per monitorare lo spostamento della testa dei pali (in direzione orizzontale e verticale) e delle pareti della *shear stack* (Figura 1d). In totale, per la registrazione di tutti i segnali si sono utilizzati 63 canali.

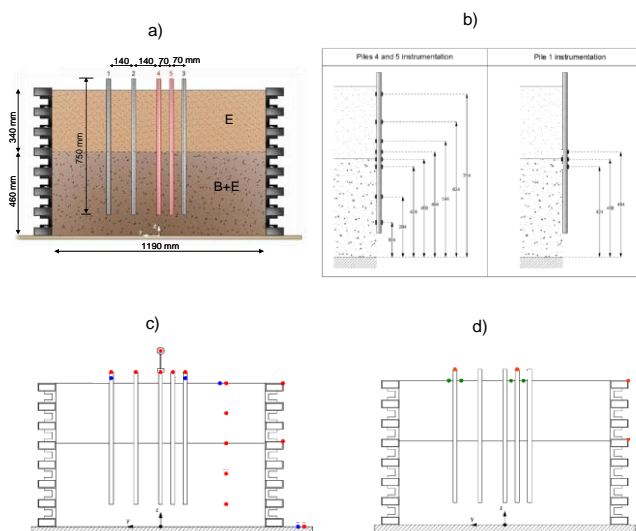


Figura 1. Schema modello: (a) configurazione sottosuolo, (b) posizione strain gauge, (c) posizione accelerometri e (d) posizione LVDT

La sovrastruttura è stata modellata come un sistema ad un grado di libertà (SDOF), variandone nel corso della sperimentazione la massa (da un minimo di 75 g ad un massimo di 1345 g), l'altezza (50 mm o 100 mm) e il materiale della colonna (acciaio o alluminio).

Caratteristiche del terreno

Il deposito in cui sono immersi i pali è costituito da due strati lo strato superiore è formato da sabbia *Leighton Buzzard* (LB) frazione E, con una densità pari a 1390 kg/m^3 , mentre lo strato inferiore è una miscela di LB frazione B e frazione E (85% e 15% rispettivamente) con una densità pari a 1780 kg/m^3 . L'altezza totale del banco è pari ad 800 mm, con l'interfaccia posta a 460 mm dalla base del deposito (Figura 1a).

In tabella 1 sono riportate le caratteristiche delle sabbie utilizzate nella sperimentazione. Come è possibile notare, il rapporto delle velocità delle onde di taglio è pari a 3.26 nella fase preliminare (Novembre 2010) e 1.64 nella seconda fase (Giugno 2011) della sperimentazione.

Tabella 1. Caratteristiche strati durante la sperimentazione

	Spessore H (mm)	Indice dei vuoti e	Densità relativa Dr (%)	Peso secco dell'unità di volume γ_d (kN/m ³)	Velocità delle onde di taglio Vs (m/s)		Vs ₂ /Vs ₁	
					Novembre 2010	Giugno 2011	Novembre 2010	Giugno 2011
Strato superiore (LB-E)	340	0.9	28	13.63	45	56	3.26	1.64
Strato inferiore (LB-E+B)	460	0.48	41	17.46	150	92		

Configurazioni del modello

Sono state considerate sette diverse configurazioni (Figura 2). La configurazione 1 (FHP) è caratterizzata dai pali liberi di ruotare in testa e dall'assenza di SDOF; le configurazioni 2, 3 e 4 sono caratterizzate dai pali liberi di ruotare in testa, ma con lo SDOF (FHP+SDOF) rispettivamente sui pali 1, 4 e 5; la configurazione 5 è caratterizzata da un vincolo tra i pali che ne impedisce la rotazione (SC); la configurazione 6 ha la stessa condizione di vincolo della configurazione 5 ma presenta uno SDOF in corrispondenza del palo 5 (SC+SDOF); infine la configurazione 7 presenta un vincolo tra tutti i pali, che ne impedisce la rotazione (LC).

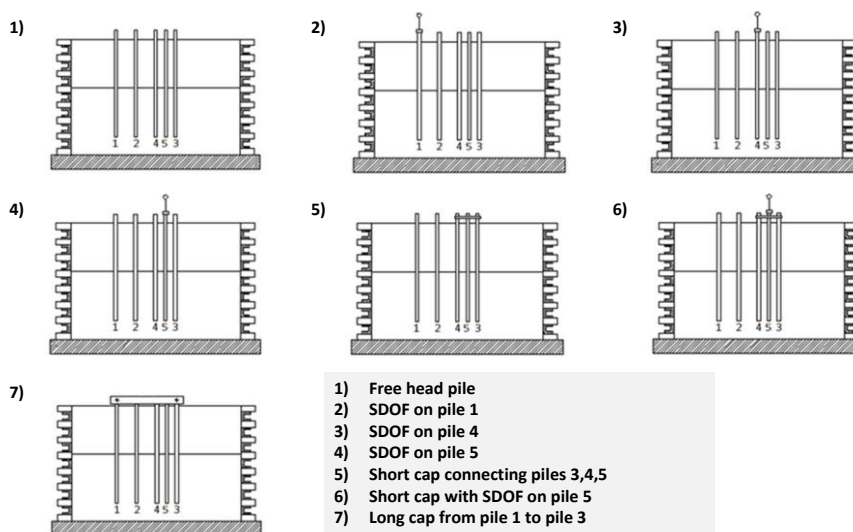


Figura 2. Diverse configurazioni del modello

Iter sperimentale

Gli input utilizzati durante la campagna sperimentale sono di diverso tipo: (i) *white noise*, (ii) input armonici (*sinedwells*) e (iii) accelerogrammi. Il *white noise* è un segnale random con un range di frequenza 1-100 Hz con un'ampiezza massima registrata su tavola compresa tra 0.010g e 0.053g. Da questo tipo di test è possibile individuare la frequenza di risonanza. Le armoniche utilizzate sono delle sinusoidi, con differenti valori di frequenza e ampiezza: da 5 Hz a 50 Hz per le frequenze e da 0.01g a 0.18g per le accelerazioni massime su tavola vibrante. Gli accelerogrammi utilizzati provengono da database Italiani, e sono relativi ai terremoti del Friuli 1976 (Tolmezzo), dell'Irpinia 1980 (Sturno) e dell'Umbria-Marche 1997 (Norcia). Prima di essere inviati alla tavola vibrante, i segnali originali sono stati scalati in

frequenza con fattori pari a 5 e 12.

Risultati sperimentali tipici

Effetto della PGA

Considerando la configurazione di pali liberi in testa (FHP), nella Figura 3a sono riportati i profili delle accelerazioni massime nel terreno, misurate in corrispondenza della verticale di controllo predisposta nel deposito (condizioni *free-field*).

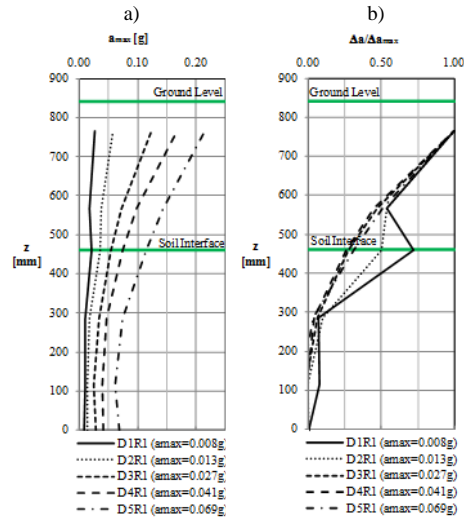


Figura 3. Profilo delle massime accelerazioni per diversi test

La Figura 3 mostra i risultati relativi all'applicazione di diversi input armonici, caratterizzati da accelerazione crescente su tavola (da 0.008g a 0.0069g) e da frequenza di 30 Hz. Come è possibile notare dalla Figura 3a la risposta *free-field* aumenta all'aumentare dell'input, e le forme dei profili sono simili. Tale similitudine è ancora più evidente nella Figura 3b, dove sono state tracciate delle curve adimensionali ottenute dal rapporto di Δa_{max} (calcolato come differenza tra $a_{max}(z)$ e il valore del minimo a_{max} lungo il profilo) e il massimo valore di Δa_{max} al variare della profondità. Dal diagramma adimensionale di Figura 3b emerge che l'effetto dell'interfaccia è più significativo per gli input con più bassa accelerazione su tavola.

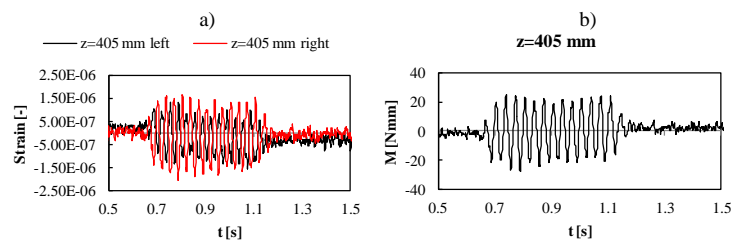


Figura 4. Time histories delle deformazioni ai due lati del palo (a) e del momento flettente (b) per il palo 4 alla quota $z=405$ mm

Con riferimento al palo 4, nella Figura 4 sono riportati gli andamenti delle *time histories* delle deformazioni (Figura 4a) e dei momenti flettenti (Figura 4b), calcolati utilizzando la seguente equazione:

$$M = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cdot E_p I_p \cdot \left(\frac{2}{D} \right)$$

dove ε_1 e ε_2 sono le deformazioni misurate ai lati del palo.

A partire dalle *time histories* del momento flettente, considerandone i valori massimi assoluti, sono stati ricavati gli involupei dei momenti cinematici dei pali 4 e 5 (Figura 5) nella configurazione FHP, considerando gli stessi input a cui si riferiscono i risultati di Figura 3. Come è possibile osservare dalla Figura 5, il momento flettente aumenta all'aumentare dell'input, con il massimo posizionato nei pressi dell'interfaccia: questo effetto è dovuto esclusivamente all'interazione cinematica.

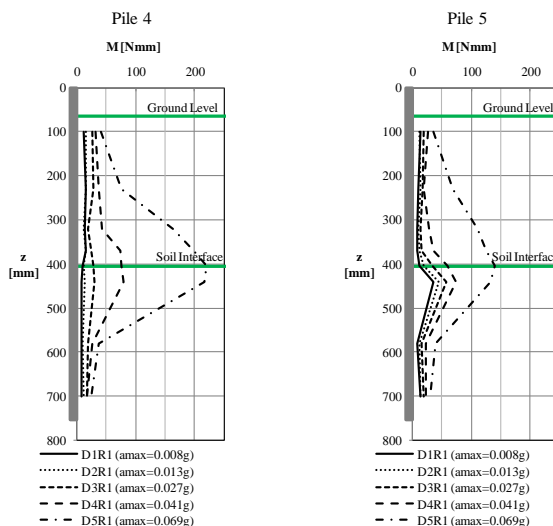


Figura 5. Involuppo dei momenti flettenti lungo i pali 4 e 5 per i diversi test

Effetto della configurazione

Per valutare l'effetto delle differenti configurazioni del gruppo di pali sulla risposta del sistema nel suo complesso, si riportano i confronti tra tre configurazioni differenti: pali liberi in testa (FHP), pali liberi in testa con SDOF avente una massa $m=200$ g sul palo 5 (FHP+SDOF) e vincolo in testa ai pali 3, 4 e 5 con SDOF avente massa $m=200$ g (SC+SDOF). I tre test selezionati hanno le stesse caratteristiche in termini di input, vale a dire una sinusoida a frequenza 7.5 Hz e ampiezza massima su tavola pari a 0.125g.

In Figura 6a si nota che l'effetto della configurazione non modifica la risposta del terreno nella verticale di controllo (*free-field*). Tuttavia si osserva una minore amplificazione per le configurazioni con lo SDOF, da attribuire però alla variazione delle caratteristiche del deposito per effetto dei numerosi test interposti tra quelli prescelti in Figura 3 e 5 (i test confrontati non sono stati eseguiti in successione).

Usando la stessa procedura illustrata in precedenza, nelle Figure 6b e 6c si riportano gli involuipi dei momenti flettenti generati nei pali 4 e 5. Nella condizione di pali liberi in testa (FHP), nei due pali considerati si hanno momenti flettenti pressoché nulli in prossimità della testa e della base - come atteso - e scarsi effetti da interazione cinematica in prossimità dell'interfaccia.

Per la configurazione FHP+SDOF, la presenza dell'oscillatore sul palo 5 fa aumentare notevolmente il momento in testa al palo 5, non modificando la risposta in testa al palo 4 (che in questa configurazione è sconnesso dal palo 5). Nella configurazione in esame, si notano momenti flettenti più importanti in corrispondenza dell'interfaccia, sia per il palo caricato (palo 5) che per quello non caricato (palo 4).

È opportuno notare che per la configurazione SC+SDOF, la presenza della connessione tra i tre pali (4, 5 e 3), causa una redistribuzione del momento in testa ai pali.

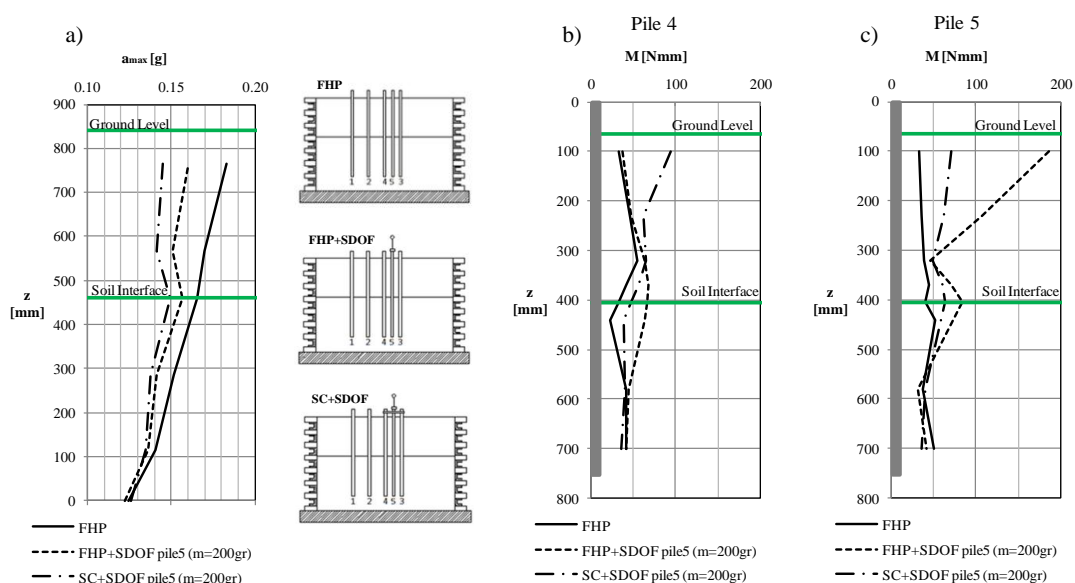


Figura 6. Profilo delle massime accelerazioni (a) e dell'involuppo dei momenti flettenti lungo il palo 4 (b) e il palo 5 (c) per diverse configurazioni di prova

Conclusioni

Nell'ambito del progetto europeo SERIES, TA4-PILESI, è stata effettuata un'ampia sperimentazione su tavola vibrante di un gruppo di pali, sottoposti a differenti condizioni di vincolo e input. In questa nota sono stati illustrati alcuni risultati relativi alla fase preliminare della sperimentazione (Novembre 2010). Dall'interpretazione dei dati sperimentali è risultato che la risposta del terreno in condizioni *free-field* risulta coerente con l'input applicato sulla tavola. I risultati in termini di momenti flettenti cinematici ed inerziali sono grossomodo in linea con quanto atteso dalle trattazioni teoriche. Si notano effetti significativi dell'interazione cinematica in prossimità dell'interfaccia tra i due strati del deposito. Tali effetti sono più evidenti al crescere dell'intensità dell'input sismico applicato alla tavola.

Ringraziamenti

L'attività di ricerca che ha prodotto questi risultati è stata finanziata dall'Unione Europea nell'ambito nel Settimo programma (FP7/2007-2013), convenzione n. 227887, SERIES. Si ringrazia anche il DPC per aver finanziato il progetto ReLUIIS (Task MT2), Linea di ricerca coordinata dal prof. Lancellotta.

Bibliografia

Crewe A.J., Lings, M.L., Taylor, C.A., Yeung, A.K. & Andrighetto. 1995. Development of a large flexible shear stack for testing dry sand and simple direct foundations on a shaking table' European seismic design practice, Elnashai (ed), Balkema, Rotterdam

Simonelli, A.L., Di Sarno, L., Durante, M.G., Sica, S., Bhattacharya, S., Dietz, M., Dihoru, L., Taylor, C.A., Cairo, R., Chidichimo, A., Dente, G., Anoyatis, G., Mylonakis, G., Modaressi, A., Todo Bom, L.A. and Kaynia, A.M. (2012). Performance of soil-pile-structure systems under seismic waves. *II Int. Conf. on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Taormina, I

Simonelli, A.L., Di Sarno, L., Durante, M.G., Sica, S., Bhattacharya, S., Dietz, M., Dihoru, L., Taylor, C.A., Cairo, R., Chidichimo, A., Dente, G., Anoyatis, G., Mylonakis, G., Modaressi, A., Todo Bom, L.A. and Kaynia, A.M. (2012). Experimental investigation of soil-pile-structure seismic interaction. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon 2012