

PROVE DI CALIBRAZIONE DI UNA TAVOLA VIBRANTE CON CONTENITORE A PARETI FLESSIBILI

Giuseppe Di Filippo

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Messina
gdifilippo@unime.it

Orazio Casablanca

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Messina
ocasablanca@unime.it

Giovanni Biondi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Messina
gbiondi@unime.it

Ernesto Cascone

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Messina
ecasccone@unime.it

Sommario

Nel laboratorio EUROLAB-CERISI dell'Università degli Studi di Messina è stato allestito un nuovo simulatore sismico geotecnico di grandi dimensioni costituito da una tavola vibrante, collegata ad un attuatore servo idraulico, da un grande contenitore a pareti flessibili e da un sistema automatizzato per la deposizione del terreno. L'attuatore può eccitare la tavola, a basso attrito, con moti sismici reali e artificiali monodirezionali. Il contenitore a pareti flessibili è stato assemblato per replicare le condizioni di deformazione piana. Il sistema di deposizione è costituito da una tramoggia che può essere spostata avanti e indietro sopra il contenitore a pareti flessibili per la deposizione pluviale della sabbia. La velocità della tramoggia, la larghezza della sua apertura inferiore e l'altezza di caduta del terreno possono essere regolate per ottenere la densità relativa desiderata. La memoria fornisce i dettagli di questo nuovo apparato sperimentale e descrive i risultati delle prove statiche e dinamiche preliminari, volte a caratterizzare le prestazioni dell'intera apparecchiatura.

1. Introduzione

Le prove su modelli fisici costituiscono oggi un valido strumento per la comprensione del comportamento sismico dei sistemi geotecnici e dell'interazione dinamica terreno struttura. Infatti, la modellazione fisica consente di studiare la risposta di sistemi geotecnici complessi in condizioni controllate in laboratorio simulando condizioni di carico difficilmente controllabili nei sistemi reali. Tipicamente, le prove sismiche su modelli in scala vengono eseguite in condizioni di gravità normale, utilizzando tavole vibranti, o in un campo di gravità aumentata realizzato in centrifuga. Nei test su tavola vibrante di modelli a scala ridotta, i requisiti di similitudine in termini di sollecitazione e deformazione rispetto al prototipo non possono essere soddisfatti, quindi tipicamente vengono utilizzati per studiare semplici modelli di comportamento e per comprendere i meccanismi di collasso del sistema e di interazione dinamica terreno struttura.

Recentemente, sono stati costruiti dispositivi di grandi dimensioni per superare alcune limitazioni dei piccoli contenitori più convenzionali e consentire una migliore riproduzione delle reali condizioni che

caratterizzano il prototipo. Inoltre, in un grande contenitore di terreno gli effetti al contorno hanno un'influenza minore sulla risposta del modello.

I contenitori rigidi, ampiamente utilizzati negli anni '80, sono oggi superati in quanto non consentono al campione di terreno di deformarsi uniformemente, inibiscono lo sviluppo di grandi deformazioni di taglio e intrappolano l'energia attraverso la riflessione delle onde. Di conseguenza, l'uso di un contenitore a pareti flessibili per alloggiare il campione di terreno è diventata una pratica comune poiché consente al modello di terreno di deformarsi sotto carico sismico allo stesso modo della condizione prototipo (Gibson 1997; Prasad et al. 2004; Ueng et al. 2006; Biondi et al. 2003, 2015).

Questo contributo fornisce i dettagli preliminari di una nuova struttura sperimentale, allestita presso il laboratorio EUROLAB-CERISI dell'Università di Messina, evidenziando che le condizioni di deformazione piana sono effettivamente verificate durante la procedura di riempimento e concentrandosi sulle prestazioni del contenitore a pareti flessibili e sulla capacità del sistema di controllo servo-idraulico di riprodurre una prefissata storia temporale di spostamento.

2. Descrizione dell'apparato

Lo schema del nuovo apparato di tavola vibrante con contenitore a pareti flessibili installato presso il laboratorio EUROLAB-CERISI dell'Università degli Studi di Messina è illustrato in Figura 1. Il contenitore a pareti flessibili (lunghezza $L=6$ m, larghezza $W=1.5$ m, altezza $H=2$ m) è costituito da 18 anelli rettangolari in alluminio a sezione cava, impilati alternativamente con profili costituiti da un monomero di etilene-propilene diene (EPDM) e fogli di polizene. Gli elementi in EPDM e le lastre in polizene consentono il contenitore di deformarsi sotto scuotimento orizzontale secondo una modalità shear beam, riproducendo il più fedelmente possibile una condizione di campo libero di un deposito di terreno.

Test statici (Bandini et al., 2019) hanno confermato che gli anelli e il loro sistema di supporto garantiscono un confinamento laterale del terreno tale da riprodurre condizioni di deformazione laterale impedita. In particolare, lo spostamento laterale misurato è risultato di oltre un ordine di grandezza inferiore allo spostamento necessario per raggiungere lo stato limite attivo in terreni granulari. In Figura 2 sono mostrati alcuni dettagli delle caratteristiche della tavola vibrante e del contenitore a pareti flessibili (Fig. 2a, b). Nello specifico, la Figura 2a mostra un dettaglio delle pareti terminali del contenitore, dove si distinguono le barre di alluminio e gli elementi in EPDM, mentre la Figura 2b mostra un dettaglio delle pareti laterali, con una serie di rulli a contatto con le barre di alluminio e sottili fogli di polizene verde tra le barre. La scatola laminare è fissata alla tavola e può essere spostata orizzontalmente mediante un attuatore servo-idraulico che opera in modalità di controllo dello spostamento con corsa di ± 255 mm e 32 tonnellate di carico utile. La potenza idraulica per l'attuatore è fornita da tre pompe idrauliche in grado di erogare 1200 litri/min ad una pressione di esercizio di 300 bar.

Il sistema di deposizione per la preparazione del campione di terreno all'interno della scatola laminare fa uso del metodo della pluviazione ed è costituito da una tramoggia (Fig. 2c), con un volume interno di $1,5$ m³, che può muoversi avanti e indietro sopra il contenitore. Il terreno cade da un'apertura rettangolare (variabile da 1 a 15 mm) posta sul fondo della tramoggia e la tramoggia può muoversi a velocità costante (fino a 10 cm/sec) e la sua posizione può essere variata consentendo di regolare l'altezza di caduta delle particelle di terreno nell'intervallo 30-3000 mm.

3. Prestazione della tavola vibrante durante test dinamici

Il sistema di controllo servo-idraulico che caratterizza l'attrezzatura funziona in modalità di controllo dello spostamento. Per migliorare la capacità del sistema di riprodurre accuratamente prefissate storie di accelerazione, che di solito sono segnali a banda larga, la strategia di controllo dello spostamento è stata migliorata con segnali di controllo feed forward aggiuntivi.

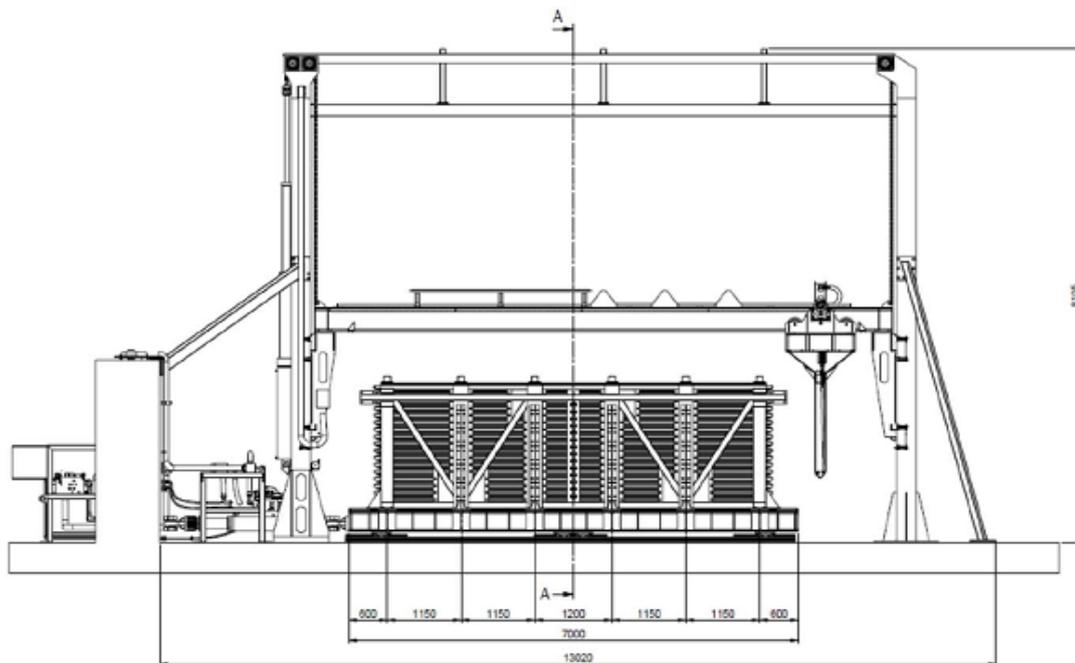


Figura 1. Attrezzatura dell'Università di Messina per prove su tavola vibrante di sistemi geotecnici.

In particolare, è stato implementato un sistema di controllo della tavola in cui viene applicata una funzione di trasferimento totale tra i segnali di comando e di feedback. Poiché potrebbero esserci interazioni dinamiche tra il campione e la tavola, il processo di messa a punto è stato condotto sotto carico, come suggerito da Luco et al. (2010). Al fine di verificare la capacità del processo implementato nel sistema di controllo, dai database sismici ITACA e PEER (Luzi 2017; Ancheta et al 2013) è stato selezionato un set di registrazioni accelerometriche caratterizzato da ampiezze del moto e contenuto energetico ed in frequenza variabili in un ampio intervallo; durante le prove, le corrispondenti storie di spostamenti sono utilizzati come segnali di comando del sistema servo-idraulico dell'attuatore. Per ogni registrazione selezionate la Tabella 2 elenca i valori della magnitudo di momento M_w dell'evento sismico, la distanza di Jooner & Boore R_{jb} della stazione di registrazione, l'accelerazione di picco a_{max} , il periodo medio T_m , l'intensità di Arias I_a e il numero di carico equivalente cicli N_{eq} valutati secondo la procedura di Biondi et al. (2012). Un accelerometro, operante in un range di frequenza di 0 - 3000 Hz, è stato utilizzato per registrare l'accelerazione della tavola.

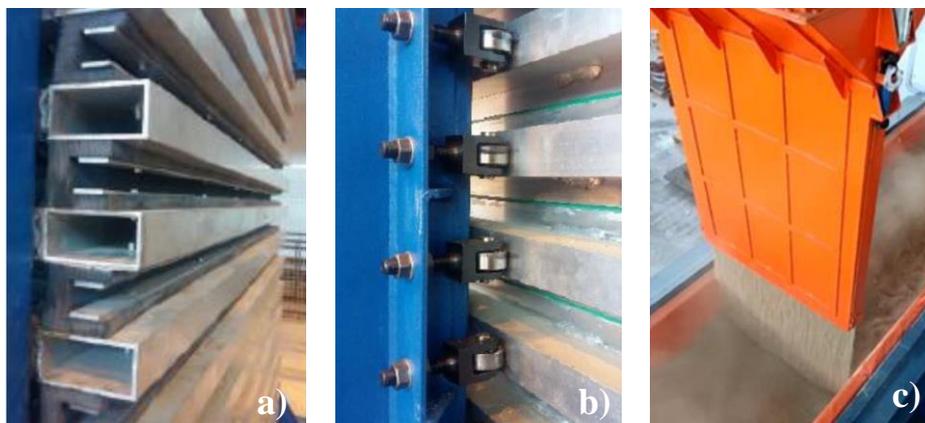


Figura 2. a) Sezioni in gomma alle pareti di testa del contenitore, b) rulli in acciaio e lastre di polizene (visibili tra anelli di alluminio) e c) la tramoggia durante la deposizione della sabbia.

Le accelerazioni misurate sono state quindi confrontate con i segnali selezionati (target) in termini di errore relativo ε (equazione 1) sull'accelerazione di picco (ε_A) e sullo spostamento di picco (ε_D) e in termini di errore quadratico medio relativo ε (equazione 2) sullo spostamento (ε_{SD}), sullo spettro di accelerazione (ε_{SA}) e sullo spettro di Fourier (ε_F).

$$\varepsilon = \frac{x_{\text{ref}} - x_m}{x_{\text{ref}}} \quad \text{eq. (1)}$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{\text{ref},i} - x_{m,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{\text{ref},i})^2}} \quad \text{eq. (2)}$$

Nell'equazione (1) x_{ref} rappresenta il picco della variabile target considerata mentre x_m il picco della variabile misurata alla tavola; analogamente, nell'equazione (2) $x_{\text{ref},i}$ e $x_{m,i}$ sono rispettivamente il dato puntuale della variabile target (N valori) e il corrispondente dato valutato utilizzando la variabile misurata. Gli errori valutati per tutte le prove effettuate sono riportati in Tabella 3.

Escludendo alcuni casi, l'errore relativo sull'accelerazione di picco è generalmente inferiore al 15%, l'errore relativo sugli spettri di spostamento e di accelerazione è generalmente inferiore al 30%, mentre l'errore relativo sugli spettri di ampiezza di Fourier è generalmente inferiore al 50% ed è influenzato dalle differenze tra il movimento misurato e quello target alle alte frequenze; in generale l'errore sullo spostamento di picco è invece sempre inferiore al 3%.

Per avere una panoramica delle prestazioni del sistema di controllo servo-idraulico in termini di fedeltà nella riproduzione del segnale, per ciascun test sono stati confrontati le variabili di target con quelle misurate. La Figura 3 presenta un confronto tra il target e i dati misurati relativi al record #3 (Figg. 3a-c), #2 (Figg. 3d-f) e #8 (Figg. 3g-i). Nello specifico, le figure mostrano i risultati relativi alle storie di spostamento (Figg. 3a, 3d, 3g), accelerazione (Figg. 3b, 3e, 3h) e agli spettri di Fourier in ampiezza (Figg. 3c, 3f, 3i). Le storie temporali di spostamento target rappresentano quelle imposte come input alla tavola vibrante, mentre quelle misurate sono state registrate dall'attuatore. Le Figure 3a, 3d e 3g evidenziano che le storie di spostamento sono state riprodotte in modo soddisfacente. Si può osservare che le storie di accelerazione misurate riproducono opportunamente gli input reali del target ma esibiscono anche fenomeni di amplificazione, più evidenti per i record #2 e #8 (Figg. 3e e 3h). Gli spettri di Fourier in ampiezza (Figg. 3c, 3f, 3i) mostrano che i fenomeni di amplificazione possono essere osservati principalmente nella gamma delle alte frequenze, lontano dalla frequenza principale dei segnali selezionati.

Tabella 2. Caratteristiche delle registrazioni accelerometriche utilizzate nelle prove dinamiche.

#	Evento	M_w	R_{jb}	a_{max}	I_a	T_m	N_{eq}	f_P
			(km)	(g)	(cm/s)	(s)		(Hz)
1	Irpinia	6.90	17.98	0.10	28.53	0.62	11.39	0.44
2	Kobe	6.90	0.92	0.31	81.73	0.38	5.90	0.73
3	Loma Prieta	6.93	9.64	0.49	169.00	0.27	7.59	2.69
4	Northridge-01	6.69	15.11	0.16	20.40	0.26	8.02	2.05
5	San Fernando	6.61	21.50	0.21	34.21	0.24	9.02	3.76
6	Sicily	5.60	24.58	0.11	5.52	0.15	5.33	1.59
7	Umbria Marche 3rd Shock	5.60	6.20	0.18	11.41	0.18	4.74	3.42
8	Friuli 1st Shock	6.40	10.22	0.32	120.55	0.37	9.70	1.49

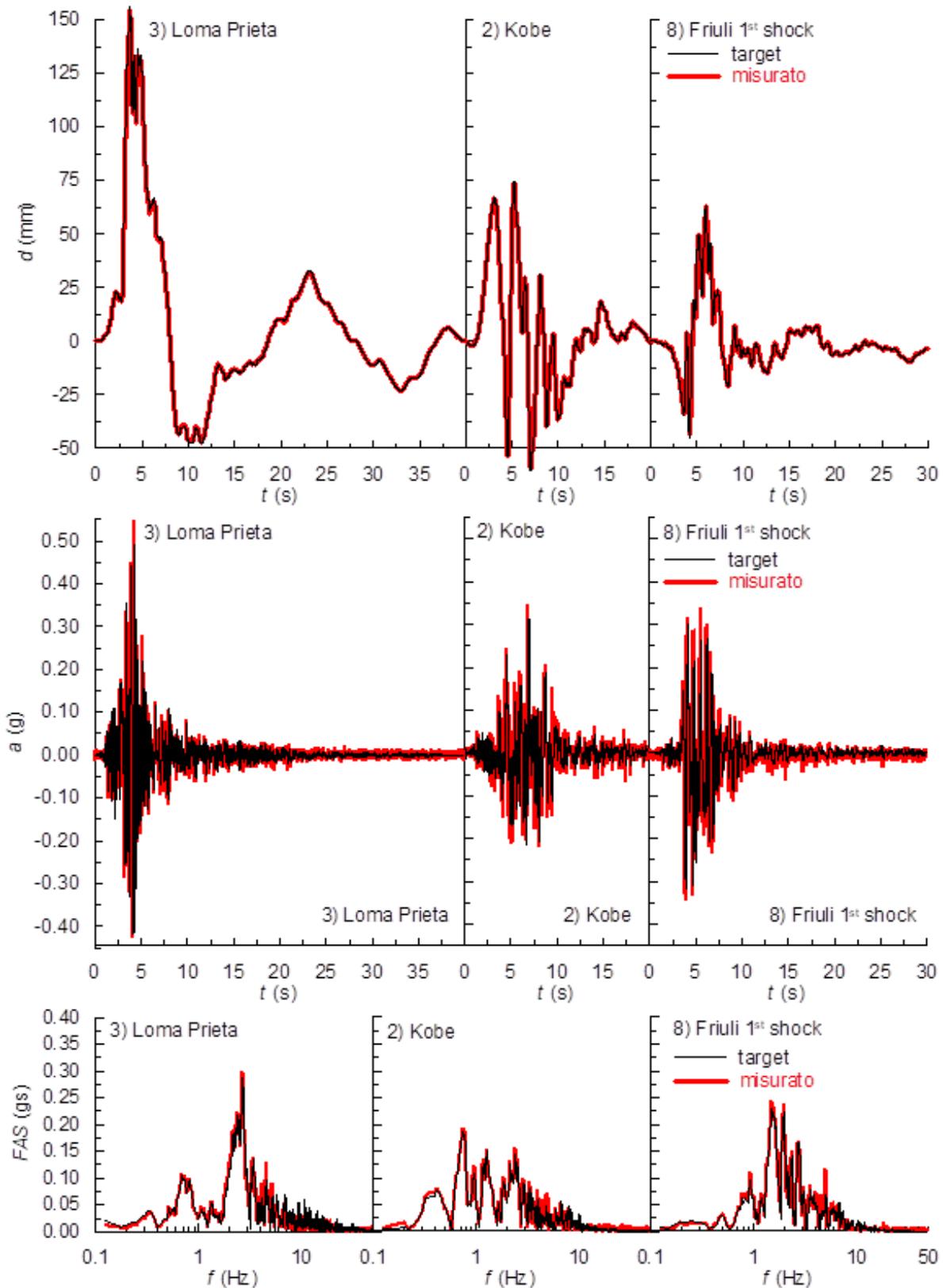


Figura 3. Confronto tra le variabili di target e quelle misurate per il caso dei record di Loma Prieta (a-c), Kobe (d-f) e Friuli 1st Shock (g-i): (a,d,g) cronologie di spostamento, (b,e,h) cronologie di accelerazione, (c,f,i) Spettri di ampiezza di Fourier.

Tabella 3. Errori delle grandezze misurate rispetto a quelle di target

N.	Evento	ϵ_A	ϵ_D	ϵ_{SD}	ϵ_{SA}	ϵ_F
1	Irpinia	19%	1.1%	14%	13%	38%
2	Kobe	11%	1.1%	9%	9%	30%
3	Loma Prieta	12%	1.3%	13%	7%	24%
4	Northridge-01	33%	0.4%	22%	19%	43%
5	San Fernando	15%	0.7%	28%	19%	42%
6	Sicily	9%	0.2%	17%	21%	55%
7	Umbria Marche 3rd Shock	28%	2.9%	19%	39%	58%
8	Friuli 1st Shock	12%	0.3%	12%	11%	23%

4. Conclusioni

In questo lavoro viene fornita una descrizione delle nuove apparecchiature per la modellazione fisica dinamica dei sistemi geotecnici disponibili presso il Laboratorio EUROLAB CERISI dell'Università degli Studi di Messina, fornendo dettagli sulla geometria e le caratteristiche meccaniche della tavola vibrante, del contenitore a pareti deformabili e del sistema di deposizione del suolo. I test statici descritti in un precedente lavoro (Bandini et al., 2019) hanno dimostrato che le condizioni di deformazione piana sono verificate con buona accuratezza. I test dinamici hanno dimostrato la capacità della tavola vibrante di riprodurre l'input di accelerazione desiderato.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito delle attività di ricerca previste dal progetto "Sistema multisensoriale a basso costo finalizzato alla diagnosi per la tutela e conservazione del patrimonio storico/culturale," (progetto n. 08ct2790090212, acronimo "HCH LowCost GeoEngineering Check") finanziato dal "Fondo Europeo di Sviluppo Regionale" nell'ambito del PO-FESR Sicilia 2014/2020, misura 1.1.5.

Bibliografia

- Gibson, A.D. (1997). Physical scale modelling of geotechnical structures at one-g. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Prasad S.K., Towhata I., Chandradhara G.P., Nanjundaswamy P. (2004). Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering. *Curr Sci* 87(10):1398–1404.
- Ueng T.S., Wang M.H., Chen M.H., Chen C.H., Peng L.H. (2006). A Large Biaxial Shear Box for Shaking Table Test on Saturated Sand, *Geotechnical Testing Journal*, 29(1): 1-8.
- Biondi G., Massimino M.R., Maugeri M., Taylor C. (2003). Influence of input motion characteristics on dynamic soil-structure interaction by shaking table tests. *WIT Transactions on the Built Environment*, (72), 2003: 225-234.
- Biondi G., Massimino M. R., Maugeri M. (2015). Experimental study in the shaking table of the input motion characteristics in the dynamic SSI of a SDOF model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(6),1835-1869.
- Biondi G., Cascone E., Di Filippo G. (2012). Affidabilità di alcune correlazioni empiriche per la stima del numero di cicli di carico equivalente, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 46 (2), 9-39.
- Luco J.E., Ozelik O., Conte J.P. (2010). Acceleration tracking performance of the UCSD-NEEDS Shake Table. *Journal of Structural Engineering*, 136 (5): 481-490.
- Luzi L., Pacor F., Puglia R. (2017). Italian accelerometric archive v 2.2. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, 10.13127/ITACA.2.2.
- Bandini, V., Cascone, E., Biondi, G., Di Filippo, G., Ingegneri, S., Aliberti, D. (2019). The shaking table with laminar box of the University of Messina, *Proceedings 7th ICEGE*, Rome.
- Ancheta T.D., Darragh R.B., Stewart J.P., Seyhan E., Silva W.J., Chiou B.S.J., Wooddell K.E., Graves R.W., Kottke A.R., Boore D.M., Kishida T., Donahue J.L. (2013). PEER 2013/03 – PEER NGAWest2 Database.