

MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE: IL CASO DI LOTUNG

Angelo Amorosi

Dipartimento di Ingegneria delle Acque e Chimica, Politecnico di Bari

a.amorosi@poliba.it

Daniela Boldini

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna

daniela.boldini@unibo.it

Gaetano Elia

School of Civil Engineering & Geosciences, Newcastle University

gaetano.elia@ncl.ac.uk

Felice Schiavone

Italferr Spa

ing.schiavone@gmail.com

Sommario

In questa nota è presa in esame la risposta sismica del sito sperimentale LSST (Large-Scale Seismic Test) a Lotung, Taiwan, durante il terremoto del Maggio del 1986. Le misure di accelerazione effettuate in corrispondenza del piano campagna ed in profondità sono confrontate con i risultati di analisi visco-elastiche lineari equivalenti ed analisi ad elementi finiti, nelle quali il comportamento del terreno è simulato attraverso un modello costitutivo visco-elastico lineare e successivamente con un modello ad incrudimento misto isotropo-cinematico. L'utilizzo di diversi metodi di analisi a livello crescente di complessità ha permesso di mettere in evidenza i limiti ed i benefici dell'approccio avanzato non lineare rispetto al modello tradizionale lineare-equivalente.

Introduzione

Le analisi di risposta sismica locale vengono tradizionalmente effettuate mediante schemi numerici monodimensionali nel dominio delle frequenze usando un approccio visco-elastico lineare equivalente. Sebbene questo approccio sia stato utilizzato con successo negli ultimi 30 anni di pratica ingegneristica, alcuni suoi limiti hanno spinto l'attività di ricerca verso l'uso di analisi nel dominio del tempo, che consentono di descrivere il problema della propagazione dell'onda sismica in maniera più realistica, tenendo conto dell'interazione fluido scheletro-solido e della natura fortemente dissipativa del comportamento meccanico del terreno.

Questi diversi approcci sono messi a confronto in questa nota prendendo come caso di studio l'evento sismico del Maggio 1986 registrato nel sito sperimentale di Lotung (Tabella 1).

Tabella 1. Caratteristiche dell'evento LSST7 (da Elgamal et al., 1995)

Data	Magnitudo (M_l)	Distanza epicentrale (km)	Accelerazione di picco (DHB)		
			E-W (g)	N-S (g)	V (g)
20 Maggio 1986	6.5	66.2	0.16	0.21	0.04

Il caso di studio: il sito LSST a Lotung

Il sito sperimentale di Lotung (LSST) è situato nel Nord-Est di Taiwan e, a partire dal 1985, è stato attrezzato con accelerometri triassiali superficiali e profondi, fino alla profondità di 47 m, per lo studio della risposta sismica locale (Figura 1). Nel seguito si è fatto riferimento alle misure effettuate lungo la colonna DHB, la cui risposta può considerarsi come rappresentativa di condizioni di “campo libero”.

Il sito è caratterizzato da un primo strato di sabbia-limosa e limo-sabbioso di circa 20 m, seguito da uno strato di 10 m più ghiaioso e quindi da un deposito di argilla limosa. La falda si trova ad 1 m dal piano campagna.

Una sintesi di alcune caratteristiche geotecniche è riportata in Figura 2. Il profilo della rigidezza a taglio a piccole deformazioni G_0 è stato dedotto a partire dai risultati di prove cross-hole (Borja *et al.*, 1999). Le curve di decadimento del modulo G e del fattore di smorzamento D utilizzate in questo studio sono state ottenute da Zeghal *et al.* (1995) e rielaborate da Borja *et al.* (2000) attraverso l'interpretazione di registrazioni sismiche verificatesi tra il 1985 ed il 1986. Poiché i dati disponibili si riferiscono solo ai primi 17 m di terreno, le curve relative alle profondità 11-17 m sono state adottate anche per le profondità 17-47 m.

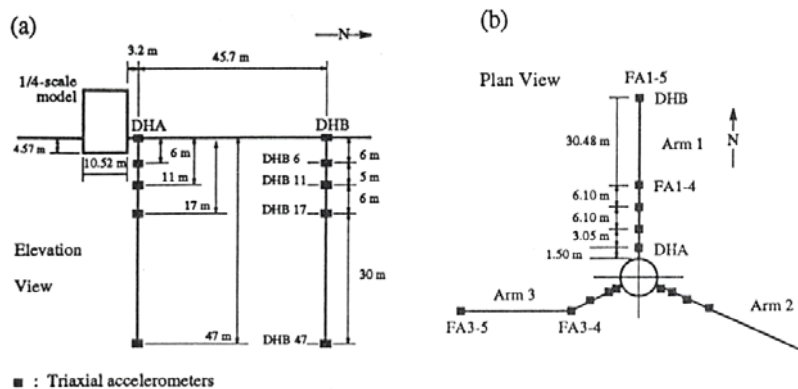


Figura 1. Strumentazione del sito sperimentale di Lotung: a) accelerometri in profondità; b) accelerometri in superficie (da Elgamal *et al.*, 1995).

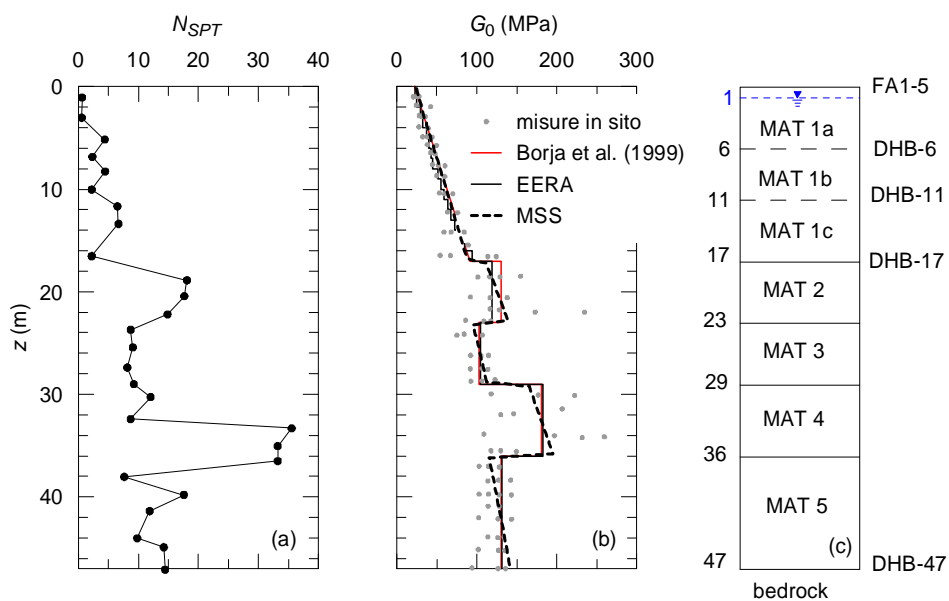


Figura 2. Caratteristiche geotecniche del sito LSST: a) risultati delle prove SPT; b) modulo elastico di taglio; c) profilo geotecnico ipotizzato.

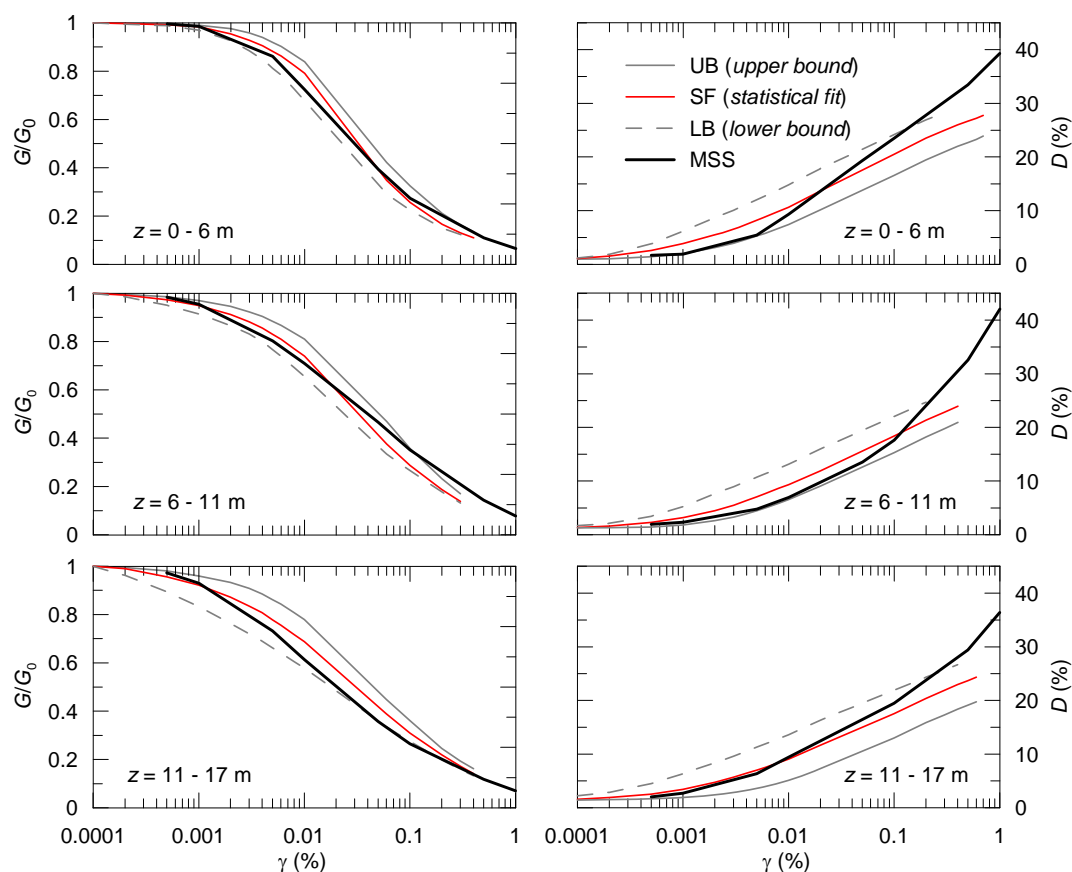


Figura 3. Curve $G/G_0 - \gamma$ e $D - \gamma$ adottate da Borja *et al.* (2000) ed in questa nota.

Modelli numerici

Le analisi di risposta sismica locale sono state condotte utilizzando il codice visco-elastico lineare-equivalente EERA (Bardet *et al.*, 2000) ed il codice ad elementi finiti SWANDYNE II (Chan, 1995), facendo riferimento alle componenti E-W e N-S del terremoto e ad una colonna di terreno di altezza pari a 47 m o 17 m.

Modello 1D visco-elastico lineare-equivalente

Nelle analisi EERA descritte nel seguito è stato usato il profilo di G_0 riportato in Figura 2(b), ottenuto schematizzando il profilo originario in tratti costanti dello spessore di 1 m. Per quanto riguarda le curve di decadimento di G e del fattore di smorzamento D , si è fatto riferimento alle curve rielaborate da Borja *et al.* (2000) ed indicate come SF (*statistical fit*) in Figura 3.

Modello 2D ad elementi finiti

Le analisi numeriche ad elementi finiti sono state condotte con il codice di calcolo SWANDYNE II adottando i seguenti parametri di Newmark: $\beta_1=0.600$ e $\beta_2=0.605$ per la fase solida e $\beta_1^*=0.600$ per la fase fluida. Il passo di calcolo è stato selezionato pari a 0.01 s.

In tutte le analisi è stato adottato un reticolo di calcolo della larghezza di 5 m con elementi isoparametrici ad 8 nodi solidi e a 4 nodi fluidi. La base del reticolo è assunta come rigida, mentre i nodi sui due contorni laterali sono caratterizzati dagli stessi spostamenti (condizione al contorno del tipo *tied nodes*). Nelle analisi sono stati assunti contorni impermeabili lungo i lati verticali ed alla base del reticolo di discretizzazione ed un contorno drenante a piano campagna. La permeabilità è stata posta pari a 10^{-8} m/s per tutti gli strati, in modo da

riprodurre condizioni essenzialmente non drenate durante il sisma.

Il terreno è stato schematizzato inizialmente come un mezzo visco-elastico lineare per poter effettuare delle analisi di confronto con EERA. A questo scopo, i profili di G e D adottati in SWANDYNE II sono quelli risultanti dall'analisi nel dominio delle frequenze (Figura 4(a) e (b)). I parametri di Rayleigh sono stati determinati con la procedura di calibrazione proposta da Amorosi *et al.* (2010) e sono rappresentati per le due componenti del sisma E-W e N-S in Figura 4(c) e (d).

In seguito è stata introdotta la plasticità adottando il legame costitutivo ad incrudimento misto isotropo-cinematico MSS (Kavvas e Amorosi, 2000) in grado di modellare il comportamento non-lineare ed irreversibile del terreno a partire da piccoli livelli di deformazione. Una tipica risposta del modello MSS durante una prova triassiale ciclica non drenata è illustrata in Figura 5. Prove di taglio ciclico non drenate sono state condotte con MSS per riprodurre le curve di decadimento di G e del fattore di smorzamento D in funzione della deformazione di taglio γ (per ogni valore di γ i corrispondenti valori di G e D sono stati stimati dopo 500 cicli di carico). I risultati sono riportati per tre degli strati di terreno considerati in Figura 3 e mostrano un accordo ragionevole con le curve SF proposte da Borja *et al.* (2000), ad eccezione dei valori del fattore di smorzamento che appaiono sovrastimati per deformazioni di taglio superiori allo 0.1%. Per rendere stabile la soluzione numerica è stato comunque adottato un fattore di smorzamento aggiuntivo viscoso pari all'1%.

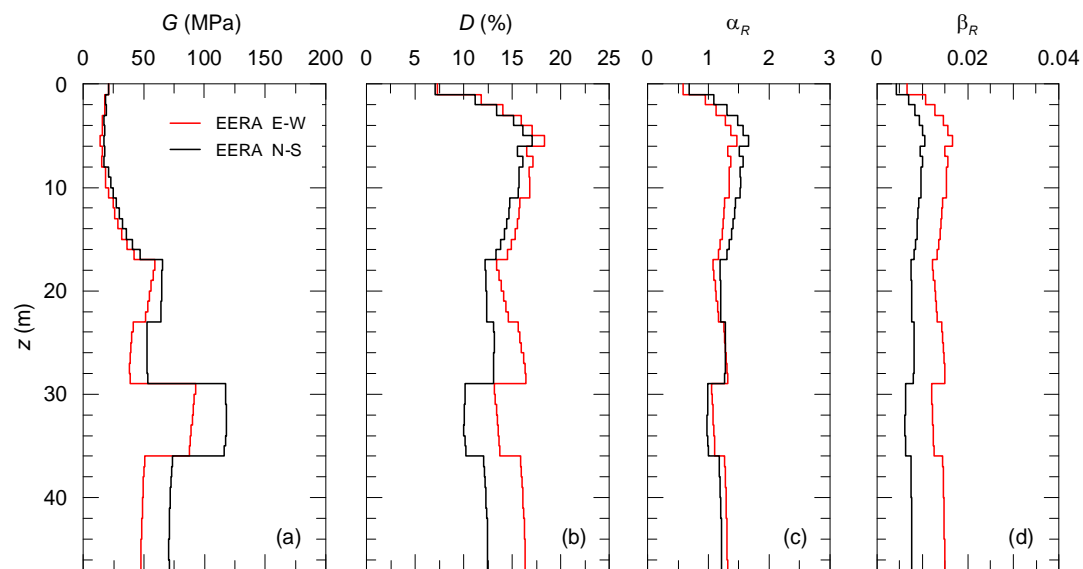


Figura 4. Profili dei parametri utilizzati nelle analisi visco-elastiche ad elementi finiti sulla base dei risultati di EERA.

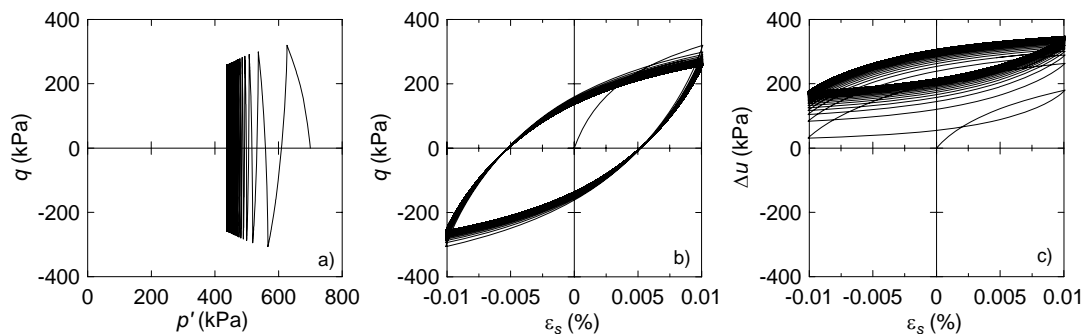


Figura 5. Risultati della simulazione di una prova di compressione triassiale ciclica non drenata con MSS.

Risultati e discussione

La Figura 6 riassume i risultati delle analisi visco-elastiche effettuate con EERA e SWANDYNE II in termini di spettri di risposta al piano campagna ed alla profondità di 11 m. L'accordo fra le analisi numeriche è ottimo per entrambe le componenti di accelerazione applicate alla base del modello, a conferma della bontà di calibrazione dei parametri visco-elastici effettuata per le analisi ad elementi finiti. Il confronto con le misure in sito, sia con riferimento all'accelerazione di picco sia in termini di frequenze, è particolarmente buono per la componente E-W, soprattutto a $z=11$ m, mentre per la componente N-S risulta meno soddisfacente.

I risultati delle analisi ad elementi finiti ottenute con il modello MSS sono invece rappresentati in Figura 7 solo in corrispondenza al piano campagna. Dal confronto con le registrazioni in sito si può osservare come la risposta numerica sia affetta da un eccessivo smorzamento, anche se nel caso dell'analisi relativa alla componente N-S è migliore l'accordo in termini di frequenze. Per entrambe le componenti il segnale sismico arriva già fortemente smorzato dagli strati più profondi, per i quali i dati utili alla caratterizzazione dinamica dei terreni sono assenti.

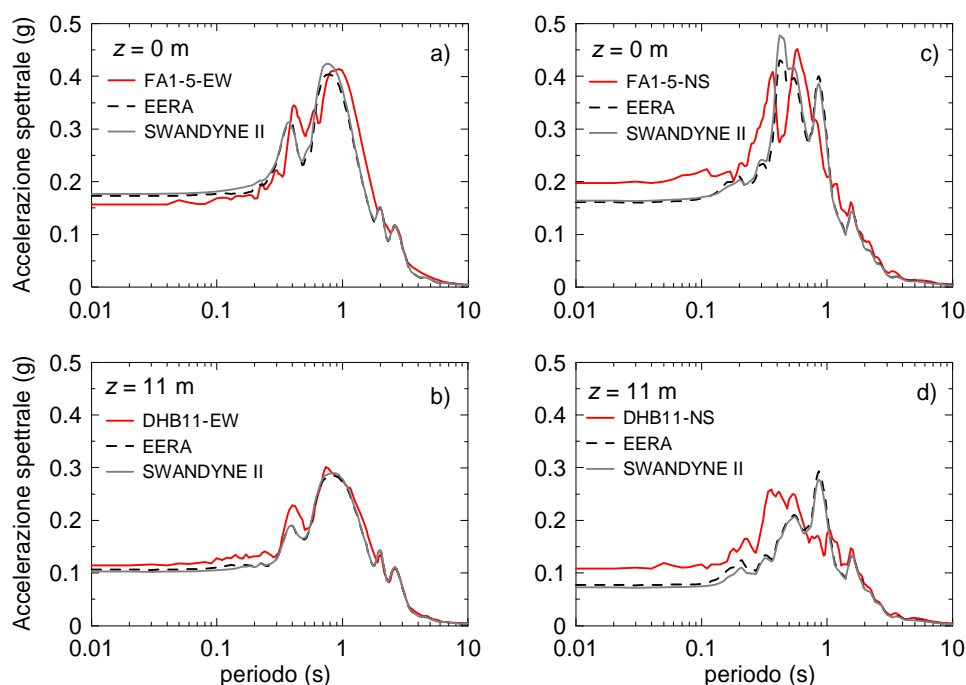


Figura 6. Spettri di risposta ottenuti dalle analisi EERA e dalle analisi visco-elastiche lineari ad elementi finiti e confronto con le registrazioni effettuate alle diverse profondità (accelerogramma applicato a $z=47$ m).

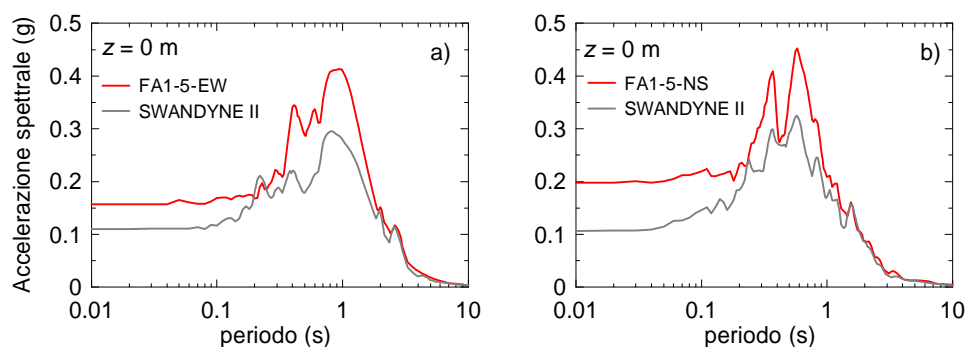


Figura 7. Spettri di risposta ottenuti dalle analisi elasto-plastiche ad elementi finiti e confronto con le registrazioni al piano campagna (accelerogramma applicato a $z=47$ m).

Per mettere in evidenza l'influenza di questo aspetto, le analisi sono state ripetute utilizzando un modello numerico di altezza pari a 17 m ed applicando alla base della colonna l'accelerogramma ottenuto dalle corrispondenti analisi EERA alla stessa profondità. I risultati, riassunti in Figura 8, mettono in luce come, a fronte di un maggior accordo fra misure in sito e simulazioni numeriche, il problema dell'eccessivo smorzamento sia risolto solo in parte per la componente N-S.

Le analisi elasto-plastiche ad elementi finiti, sebbene caratterizzate da maggiori incertezze riguardo la scelta dei parametri meccanici e numerici, consentono però di poter considerare aspetti fondamentali del comportamento del terreno durante il sisma, quali la generazione di deformazioni permanenti e lo sviluppo di sovrappressioni interstiziali, come messo in evidenza dalla Figura 9.

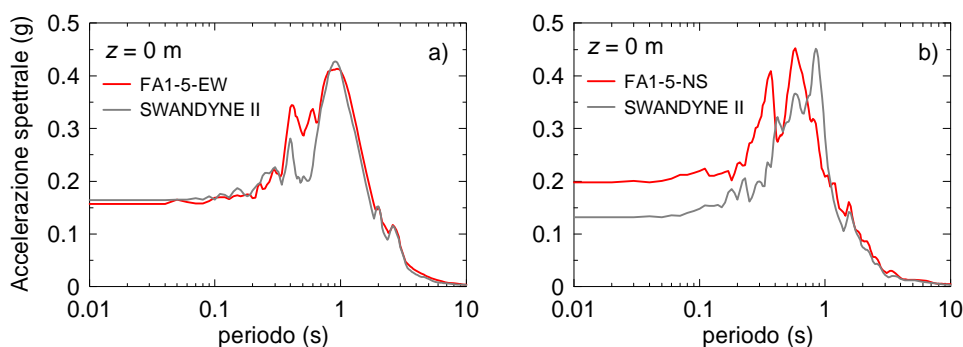


Figura 8. Spettri di risposta ottenuti dalle analisi EERA e dalle analisi elasto-plastiche ad elementi finiti e confronto con le registrazioni al piano campagna (accelerogramma applicato a $z=17$ m).

Le misure in sito si riferiscono in questo caso ad un altro evento sismico (LSST16), caratterizzato però da valori dell'accelerazione di picco, distanza epicentrale e magnitudo simili.

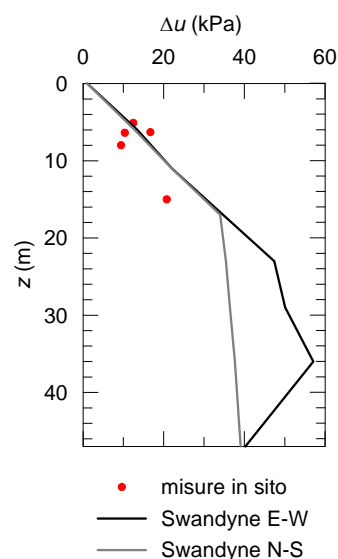


Figura 9. Incrementi di pressione interstiziale calcolati nelle analisi di Figura 7 e confronto con le misure in sito.

Bibliografia

- Amorosi A., Boldini D. & Elia G. (2010). Parametric study on seismic ground response by finite element modelling. *Computers & Geotechnics*, 37(4), 515-528.
- Bardet J.P., Ichii K. & Lin C.H. (2000). *EERA - A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soils deposits*. User Manual.
- Borja R.I., Chao H.Y., Montáns F.J. & Lin C.H. (1999). Nonlinear ground response at Lotung LSST site. *J. Geotech. and Geoenv. Engng.*, 125(3), 187-197.
- Borja R.I., Lin C.H., Sama K.M. & Masada G.M. (2000). Modelling non-linear ground response of non-liquefiable soils. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 29, 63-83.
- Chan A.H.C. (1995). *User Manual for DIANA-SWANDYNE II*. School of Engineering, University of Birmingham, UK.
- Elgamal A.W., Zeghal M., Tang H.T. & Stepp J.C. (1995). Lotung downhole array. I: Evaluation of site dynamic properties. *J. Geotech. Engng.*, 121(4), 350-362.
- Kavvas M. & Amorosi A. (2000). A constitutive model for structured soils. *Géotechnique*, 50(3), 263-274.
- Zeghal M., Elgamal A.W., Tang H.T. & Stepp J.C. (1995). Lotung downhole array. II: Evaluation of soil nonlinear properties. *J. Geotech. Engng.*, 121(4), 363-378.