

## APPLICAZIONE DI TECNICHE NUMERICHE ALL'INTERAZIONE CINEMATICA PALO-TERRENO

Claudio Cappellaro, Marco Del Fabbro, Roberto Meriggi

Università degli Studi di Udine

[cappellaro.claudio@spes.uniud.it](mailto:cappellaro.claudio@spes.uniud.it), [marco.delfabbro@uniud.it](mailto:marco.delfabbro@uniud.it), [roberto.meriggi@uniud.it](mailto:roberto.meriggi@uniud.it)

### Sommario

Nella nota vengono presentati i risultati di modellazioni numeriche di interazione cinematica palo-terreno, eseguite sia su modelli teorici che per un esempio reale di terreni stratificati altamente deformabili. Nello studio sono stati utilizzati due diversi programmi commerciali per applicazioni di ingegneria geotecnica.

Nel primo caso è stata condotta una modellazione agli elementi finiti 2D e si sono effettuati dei confronti con altri studi di letteratura. Nel secondo caso è stato invece impiegato un codice alle differenze finite 3D, adottando nelle analisi lineari anche uno smorzamento numerico non convenzionale. Si sono pertanto sviluppate le procedure di validazione e calibrazione di questo tipo di modellazione per poter procedere in futuro con analisi più avanzate.

### 1. Introduzione

L'interazione cinematica fra pali di fondazione e terreno è uno dei fenomeni più complessi su cui si sta concentrando la ricerca nell'ambito dell'ingegneria geotecnica sismica. Esso vede l'elemento strutturale e il terreno circostante influenzarsi mutuamente, causando una modifica del campo di moto di free-field e il contemporaneo insorgere di sollecitazioni nel palo. Per valutare i momenti flettenti d'interazione cinematica, o quanto meno per evidenziare alcuni aspetti salienti di tale fenomeno, nel corso dei decenni sono state impiegate diverse tecniche tra cui: schemi semplificati (Di Laora et al., 2012a), modelli derivati dalla trave su suolo alla Winkler (Kavvadas e Gazetas, 1993; Mylonakis, 2001; Motta e Pisano, 2011), metodi pseudostatici (Dezi et al., 2010) e più avanzate analisi numeriche (Maiorano et al., 2007; Grassi e Massimino, 2009). I diversi studi sopra citati, accomunati dalla stessa schematizzazione del problema analizzato (Fig. 1), hanno messo in luce come gli effetti dell'interazione cinematica siano condizionati dalle proprietà del palo (snellezza, rigidità relativa palo-terreno, condizioni di vincolo) e del terreno (profilo stratigrafico), dal comportamento non lineare dei materiali e dalle caratteristiche dell'input sismico.

Dalle analisi è confermato che i momenti flettenti generati all'interfaccia fra strati di terreno con un elevato contrasto di rigidità e in testa al palo rappresentano un elemento di criticità. Per la loro stima sono dunque state sviluppate diverse equazioni (Dobry e O'Rourke, 1983; Mylonakis, 2001; Nikolaou et al., 2001; Dezi et al., 2010), di facile uso ma con un'applicabilità limitata dalle molte ipotesi che stanno alla base della loro derivazione (vedi Sica et al., 2011). Per tale ragione la modellazione numerica dell'interazione cinematica palo-terreno appare irrinunciabile. Nel campo della ricerca hanno riscosso grande successo le formulazioni BDWF (*Beam on*

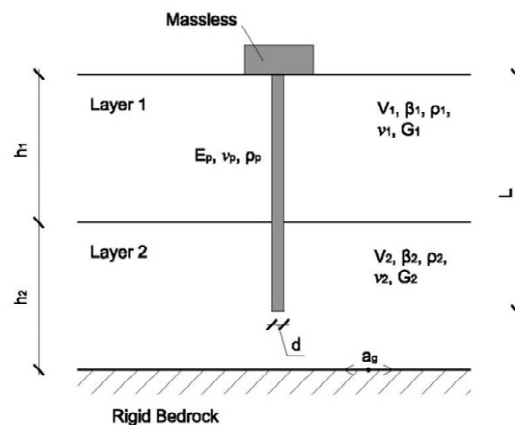


Fig. 1. Modello di riferimento per gli studi di interazione cinematica per palo in terreno a due strati.

*Dynamic Winkler Foundation*) in cui la maggiore difficoltà è legata alla stima della rigidità e dello smorzamento degli elementi di interazione palo-terreno, delle quali è difficile determinare un valore “esatto” (Anoyatis et al., 2013). Nel corso del presente lavoro si è pertanto condotta in primo luogo una modellazione 2D agli elementi finiti dell’interazione cinematica palo-terreno con il software QUAKE/W (GEO-SLOPE International, Ltd., 2012). Sono state svolte numerose analisi volte a riprodurre un caso studio di letteratura e a cogliere i principali aspetti, già evidenziati da altri Autori, utili a valutare l’applicabilità dello strumento in questo campo. Sono poi stati effettuati studi preliminari utilizzando il codice alle differenze finite FLAC<sup>3D</sup> (Itasca Consulting Group, Inc., 2012), per considerare la completa tridimensionalità del problema così da osservare alcuni fenomeni difficilmente riproducibili con analisi 2D, a scapito però di un elevato onere computazionale.

## 2. Analisi FEM 2D

### 2.1 Riproduzione di un caso studio di letteratura

La prima applicazione di QUAKE/W a fenomeni di interazione cinematica è rappresentata da un caso studio rilevante proposto al 4ICEGE (Fugro West Inc. & AMC Consulting Eng., 2007) riguardante un palo in calcestruzzo armato, facente parte della fondazione di un edificio a tre piani situato in Giappone, immerso in terreni stratificati sottoposti a scuotimento sismico durante il terremoto di Tokachi-Oki del settembre 2003. Questo esempio è stato preso come riferimento anche da altri studi dedicati alla valutazione dei momenti flettenti di interazione cinematica (Di Laora et al., 2012b; Sica et al., 2013). La stratigrafia del sito è ben documentata (Tab.1) e la strumentazione di monitoraggio presente in profondità e in superficie in prossimità del palo (rete KiK-net, [www.kyoshin.bosai.go.jp/](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/)) ha consentito di rilevare un’amplificazione nelle PGA da 0,05g a quasi 0,40g. Il palo è in c.a.p. ad alta resistenza, ha sezione circolare cava (diametro interno 0,3 m, diametro esterno 0,4 m), è incastrato alla testa ed è lungo 28,5 m, a partire da 1,5 m sotto al piano di campagna.

A seguito dell’applicazione dell’input sismico alla base dell’intero modello 2D, profondo 150 m, si è effettuata un’analisi lineare equivalente di free-field per la valutazione della risposta sismica locale; è stata così ottenuta la storia delle accelerazioni alle diverse profondità. Ai fini dello studio della risposta del sistema palo-terreno, si sono modellati nel dettaglio solo i primi 40 m del sito, applicando a tale profondità la storia delle accelerazioni precedentemente ricavata. Per la definizione delle proprietà dinamiche dei terreni si è fatto riferimento a quelle adottate dagli Autori (Fugro West Inc. & AMC Consulting Eng., 2007) del caso studio originale.

Tab 1. Stratigrafia del sito di Atsuma, history case dal 4ICEGE, 2007 (Fugro West Inc. & AMC Consulting Engineers).

Prof. [m]	Terreno	V <sub>s</sub> [m/s]	N <sub>60</sub>	ρ <sub>s</sub> stimata [t/m <sup>3</sup> ]
0-6	Torba	60	3	1,3
6-20	Argilla	90	4	1,5
20-30	Limo sabbioso	190	13	1,8
30-40	Ghiaia	320	>50	2,0
40-52	Siltite	210	-	2,2
52-76	Ghiaia	310	-	2,0
76-132	Ghiaia	430	-	2,0
132-153	Arenaria	520	-	2,3

Dei diversi risultati ottenuti, si propone (Fig. 2) il confronto fra lo spettro elastico di risposta registrato in superficie e quelli calcolati mediante analisi di free-field con QUAKE/W e con EERA, mentre in Fig. 3 viene rappresentato l’involuppo dei momenti flettenti lungo il fusto del palo. L’analisi elastica lineare a cui si fa riferimento in Fig. 3 rappresenta un controllo preliminare eseguito considerando, nel modello numerico analizzato con QUAKE/W, valori medi del modulo elastico e dello smorzamento stimati mediante l’analisi di free-field con EERA. Il massimo momento d’interazione cinematica, calcolato all’interfaccia fra limo sabbioso e argilla (profondità 20 m) con l’analisi lineare equivalente, è di 130 kNm, valore in accordo con quelli compresi fra 125-200 kNm valutati con diverse tecniche dagli organizzatori del 4ICEGE, come riportato da Sica et al. (2013).

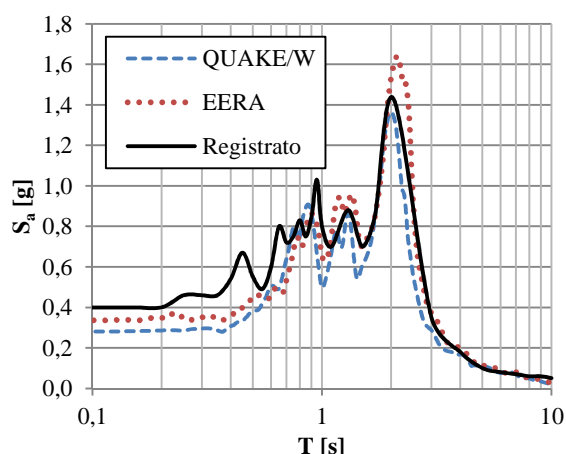


Fig 2. Confronto fra spettri di risposta elastici di free-field ottenuti con diverse procedure.

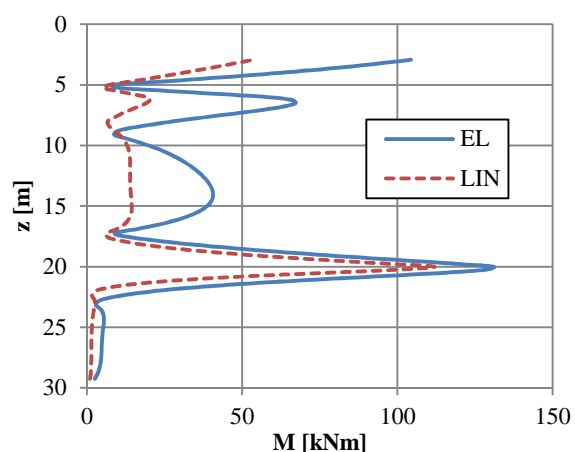


Fig 3. Involuppo dei momenti flettenti lungo il palo per analisi elastica lineare (LIN) e lineare equivalente (EL).

## 2.2 Confronto con altri studi sull'interazione cinematica

Con QUAKE/W si è modellato il sistema geotecnico riportato in Fig. 1: palo lungo 24 m incastrato in testa immerso in un terreno stratificato (spessore complessivo 30 m) su bedrock rigido. Nel corso delle analisi (Cappellaro, 2014) sono stati variati il numero degli strati di terreno (da uno a tre), il diametro del palo (da 0,5 a 1,5 m), le rigidità e lo spessore degli strati (fra 5 e 30 m), eseguendo complessivamente 25 fra analisi lineari e lineari equivalenti. Per palo in terreno a due strati si sono considerate velocità delle onde di taglio a basse deformazioni crescenti con la profondità, variandole fra 100 e 800 m/s, mentre per quello a tre strati si è considerata una successione delle  $V_s$ , dall'alto verso il basso, di 250, 100 e 400 m/s. Per le analisi lineari si è fatto riferimento a valori del modulo a basse deformazioni e a uno smorzamento convenzionale costante del 5%. Per le analisi lineari equivalenti, invece, sono state impiegate curve di decadimento del modulo e di smorzamento da letteratura (Vucetic e Dobry, 1991; Seed et al., 1986).

In input sono stati assegnati due accelerogrammi (TMZ, Tolmezzo – Diga Ambiesta, 06/05/1976, e NUB, Nocera Umbra – Biscontini, 06/10/1997) reperiti rispettivamente nei database SISMA ed ESD. Gli accelerogrammi sono stati scalati a una PGA di riferimento di 0,35g o 0,15g, a seconda del caso, e successivamente deconvoluti con EERA per estrarre l'inside motion da impiegare come input nelle analisi con QUAKE/W. Così facendo si è tenuto conto dell'effetto del ricoprimento soffice del bedrock rigido. Per tutti i casi esaminati, la consistenza dei risultati numerici FEM ottenuti con QUAKE/W è stata testata, qualitativamente e quantitativamente, rispetto a quanto ottenuto da diversi Autori con altri metodi, tra cui equazioni semplificate, BDWF e altri programmi FEM. Vengono di seguito presentati e discussi alcuni tra i risultati ritenuti di maggior interesse.

Si osserva quindi come, nel caso di palo in terreno a due strati elastici spessi (spessore maggiore della lunghezza attiva del palo), i momenti

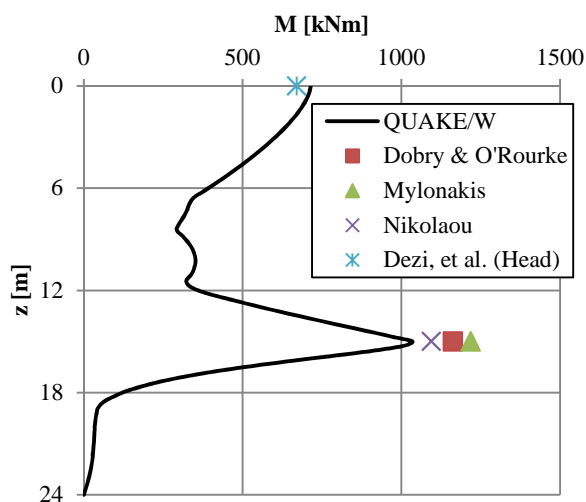


Fig 4. Involuppo dei momenti flettenti per palo in terreno a due strati,  $d=1,0m$ ,  $V_{s1}=100m/s$ ,  $V_{s2}=400m/s$ , accelerogramma TMZ,  $a_g=0,35g$ .

flettenti d'interfaccia e in testa calcolati con QUAKE/W (Fig. 4) siano in accordo con quelli valutati con le espressioni semplificate (Dobry & O'Rourke, 1983; Mylonakis, 2001; Nikolaou et al., 2001; Dezi et al., 2010). Il caso analizzato riproduce la situazione in cui le equazioni sono state calibrate e dunque costituiscono un valido termine di paragone. Per un palo in terreno a tre strati, al diminuire dello spessore dello strato intermedio (il più deformabile, in questo caso) si osserva un aumento dei momenti flettenti alle interfacce (Fig. 5). Il trend è consistente con quanto descritto da Aversa et al. (2013) per palo in un terreno con inclusione deformabile fra due strati più rigidi.

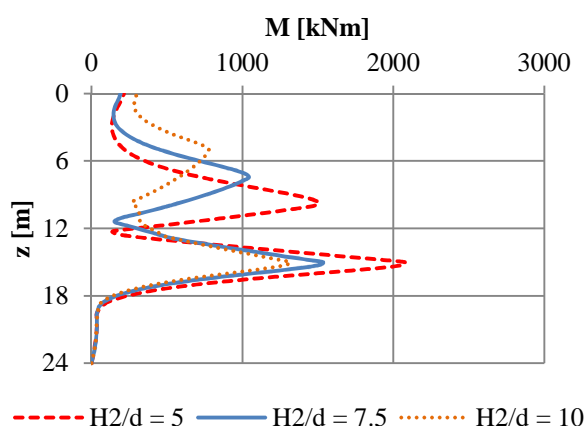


Fig 5. Momenti flettenti per palo in terreno a tre strati ( $H_2$ =spessore strato intermedio), accelerogramma TMZ con  $a_g=0,35g$ ,  $V_{s1}=250m/s$ ,  $V_{s2}=100m/s$ ,  $V_{s3}=400 m/s$ .

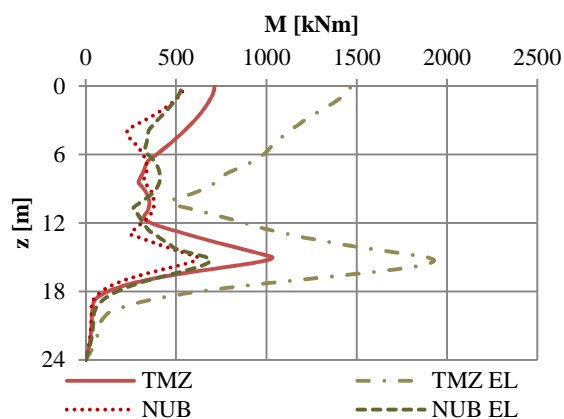


Fig 6. Momenti flettenti per palo in terreno a due strati con  $d=1,0m$ ,  $V_{s1}=100m/s$ ,  $V_{s2}=400m/s$ ,  $a_g=0,35g$  - confronto fra analisi lineari e lineari equivalenti.

Le condizioni di risonanza comportano un forte aggravio delle sollecitazioni nel passaggio da un'analisi lineare a un'analisi lineare equivalente e rappresentano pertanto un aspetto chiave del problema di interazione cinematica. La risonanza è stata valutata facendo riferimento al rapporto fra la frequenza fondamentale di sito,  $f_1$ , e la frequenza media dell'accelerogramma,  $f_m$  (Rathje et al., 1998). In Fig. 6 è possibile osservare come, per lo stesso sistema geotecnico già analizzato in Fig. 4, sottoposto a due diversi accelerogrammi scalati a 0,35g, in condizioni di risonanza (accelerogramma TMZ,  $f_m/f_1 = 1,20$ ) i momenti flettenti nel palo restituiti da un'analisi lineare equivalente sono molto più elevati di quelli valutati con un'analisi lineare, al contrario di ciò che accade lontano dalla risonanza (accelerogramma NUB,  $f_m/f_1 = 2,79$ ). Questa tendenza trova conferma nelle osservazioni riportate da numerosi Autori (Nikolaou et al., 2001; Motta e Pisano, 2011; Sica et al., 2013).

### 3. Analisi FDM 3D

Per le analisi numeriche dinamiche lineari dell'interazione cinematica palo-terreno alle differenze finite svolte con FLAC<sup>3D</sup>, ci si è avvalsi del "combined damping", uno degli algoritmi di smorzamento numerico implementati nel codice. Avendo inizialmente svolto le analisi con il classico smorzamento alla Rayleigh e appurato che i tempi di calcolo, per un semplice caso di terreno bistrato lineare, erano superiori alle decine di giorni, si è optato per una tecnica di smorzamento non convenzionale (il combined damping), che ha permesso di ridurre di almeno un ordine di grandezza i tempi computazionali. Per validare il processo, dapprima si sono condotti confronti 1D mediante analisi lineari di free-field eseguite con EERA su terreno modellato come shear beam. Si è riprodotto un terreno monostrato su bedrock rigido avente spessore  $h = 20 m$ ,  $V_s = 100 m/s$ ,  $G_s = 18 MPa$ ,  $\nu = 0,4$  e si è variato il fattore di smorzamento ( $\beta = 2, 5, 10, 20\%$ ). Alla base è stato assegnato l'accelerogramma TMZ-Tolmezzo.

I principali risultati (Fig. 7) mostrano come col combined damping si riescano a simulare in maniera accurata smorzamenti nell'ordine del 5%. L'andamento della storia delle accelerazioni in superficie è colto fedelmente, così come le frequenze di questo segnale, con differenze sensibili in corrispondenza della sola frequenza di picco. Procedendo verso smorzamenti più elevati compare invece rumore alle frequenze maggiori e il Rayleigh damping si comporta decisamente meglio.

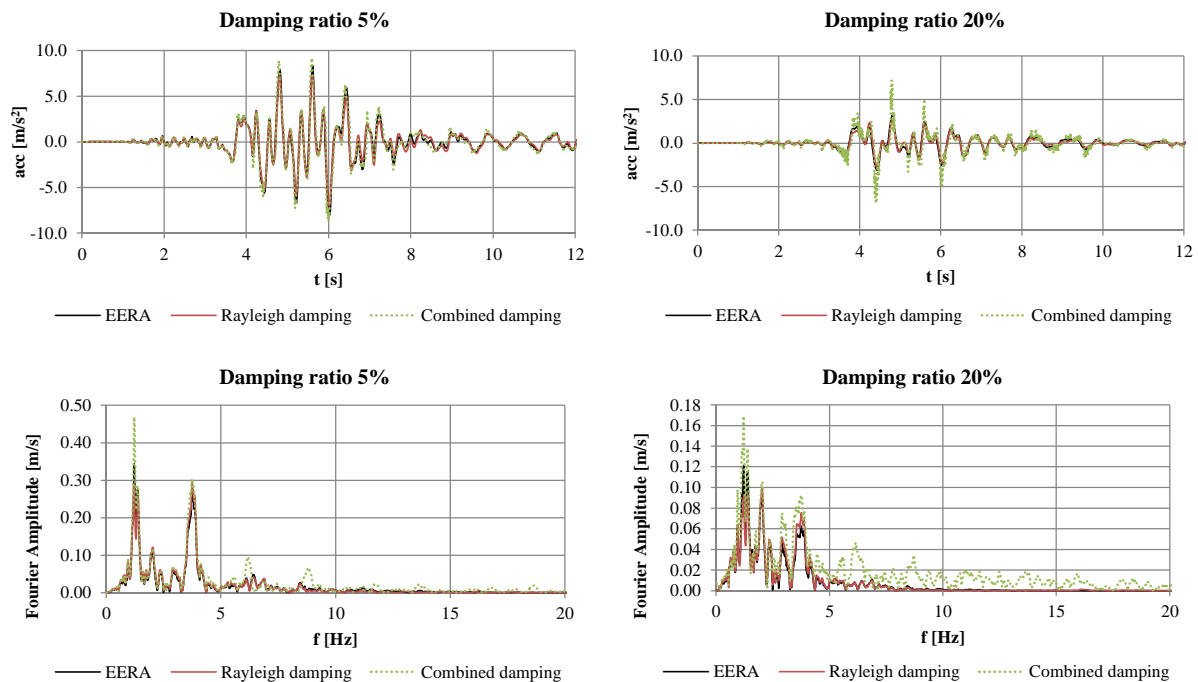


Fig 7. Confronto fra EERA e  $FLAC^{3D}$  per analisi di free-field con diversi algoritmi di smorzamento: storia delle accelerazioni in superficie e loro contenuto in frequenza da applicazione al bedrock dell'accelerogramma TMZ.

In seguito si è modellato con  $FLAC^{3D}$  un palo, come elemento beam, immerso in terreno a due strati a comportamento lineare, per verificare l'applicabilità del metodo anche a problemi di interazione cinematica. Come si può constatare dal diagramma dei momenti flettenti in Fig. 8, il confronto con le soluzioni semplificate e con i risultati di QUAKE/W è soddisfacente. Visto che i tempi di calcolo rimangono comunque considerevoli (un giorno per 1,5 secondi dell'accelerogramma TMZ in input), l'analisi di interazione cinematica è stata eseguita impiegando la sola bracketed duration della storia delle accelerazioni di input. Le analisi successive, attualmente in fase di realizzazione, prevedono la modellazione 3D del palo, mediante zone "soil like" con volume proprio, con comportamento lineare dei materiali, e l'eventuale introduzione di un legame costitutivo non lineare alla Mohr-Coulomb.

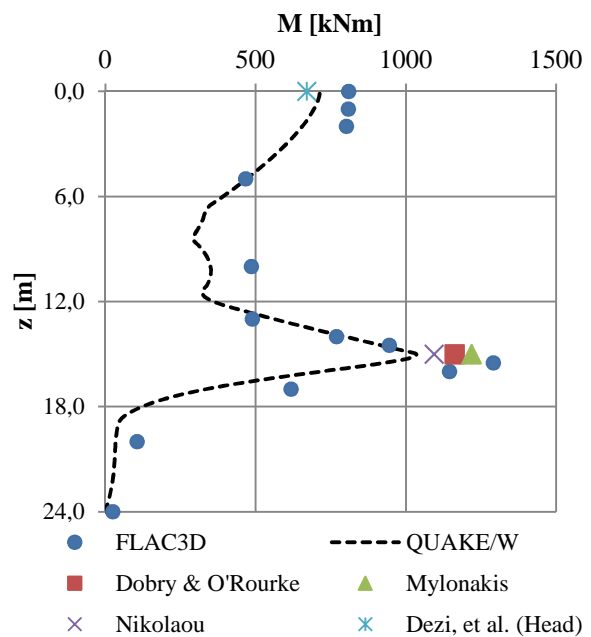


Fig 8. Inviluppo dei momenti flettenti lungo il palo: confronto fra metodi di calcolo.

#### **4. Conclusioni**

Sono stati presentati i risultati di modellazioni numeriche dell'interazione cinematica palo-terreno effettuate impiegando i codici di calcolo QUAKE/W e FLAC<sup>3D</sup>. Le modellazioni hanno riguardato analisi di free-field per diverse stratigrafie e input sismici. Sulla base dei primi riscontri è stato approfondito il confronto sulle modellazioni 2D e 3D per pali immersi in terreni stratificati. Con QUAKE/W sono stati effettuati numerosi confronti con altri studi presenti in letteratura, ottenendo un generale accordo con gli altri Autori citati. Si è avuta così una risposta positiva sull'adeguatezza del software per il suo utilizzo in applicazioni nell'ambito dell'interazione cinematica palo-terreno. Con FLAC<sup>3D</sup> si sono sviluppati degli studi preliminari in cui il maggior onere computazionale è stato notevolmente ridotto impiegando uno degli algoritmi di smorzamento (combined damping) implementati nel codice. Sono quindi stati svolti dei controlli eseguendo sia analisi di free-field che di interazione cinematica palo-terreno (con palo modellato con elementi beam), riscontrando come effettivamente i risultati ottenuti incoraggino l'uso del combined damping per condurre analisi elastiche entro il range di smorzamenti di interesse pratico. In base a questi primi test positivi, in futuro verranno svolte tramite questo strumento anche modellazioni più complesse.

#### **Bibliografia**

- Anoyatis G. et al. (2013). Kinematic response of single piles for different boundary conditions: analytical solutions and normalization schemes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 183-195.
- Aversa S., de Sanctis L., Furiano M., Maiorano R.M.S. (2013). "Estensione delle formule semplificate degli effetti di interazione cinematica al caso del mezzo a più strati", IARG 2013, Perugia.
- Cappellaro C. (2014). Numerical Modelling of Seismic Soil-Pile Interaction, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Udine.
- Dezi F., Carbonari S., Leoni G. (2010). Kinematic bending moments in pile foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 119-132.
- Di Laora R., Mandolini A., Mylonakis G. (2012a). "Selection Criteria for Pile Diameter in Seismic Areas", Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Taormina, 1300-1311.
- Di Laora R., Mandolini A., Mylonakis G. (2012b). Insight on kinematic bending of flexible piles in layered soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 309-322.
- Fugro West Inc., AMC Consulting Engineers (2007). "Pile in soft clay subjected to long duration seismic shaking". Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012). Dynamics Modelling with QUAKE/W. User's Manual, v. 2012.
- Grassi F., Massimino M.R. (2009). "Evaluation of kinematic bending moments in a pile foundation using the finite element approach". ERES 2009, Cyprus.
- Itasca Consulting Group Inc. (2012). FLAC<sup>3D</sup> User's Manual, Version 5.0. Minneapolis.
- Kavvasdas M., Gazetas G. (1993). Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil. *Géotechnique*, 43, 207-222.
- Maiorano R. M. S., Aversa S., Wu G. (2007). "Effects of soil non-linearity on bending moments in piles due to seismic kinematic interaction", Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki.
- Motta E., Pisano M. (2011). "Interazione cinematica non lineare di un palo singolo in terreni stratificati". ANIDIS 2011, Bari.
- Mylonakis G. (2001). Simplified model for seismic pile bending at soil layer interfaces. *Soils and Foundations*, 41, 47-58.
- Rathje E.M., Abrahamson N.A., Bray J.D. (1998). Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 150-159.
- Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K. (1986). "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 112, 1016-1032.
- Sica S., Simonelli A. L., Mylonakis G. (2011). Transient kinematic pile bending in two-layer soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 31, 891-905.
- Sica S., Simonelli A. L., Mylonakis G. (2013). Strain effects on kinematic pile bending in layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, 231-242.
- Vucetic M., Dobry R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotechnical Engineering*, 114, 133-149.