

## Nonlinear Response of Bridge Piers Founded on Inclined Pile Groups

Michele Morici<sup>a</sup>, Sandro Carbonari<sup>b</sup>, Fabrizio Gara<sup>b</sup>, Francesca Dezi<sup>c</sup>, Graziano Leoni<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Scuola di Ateneo di Architettura e Design, Viale della Rimembranza, 63100 Ascoli Piceno.

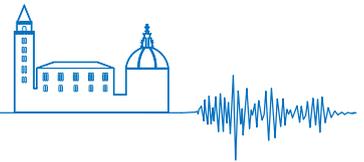
<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Via Brezze Bianche, 60131 Ancona.

<sup>c</sup> Dipartimento di Economia, Scienze e Diritto, Via Salita alla Rocca 44, 47890 San Marino, Repubblica di San Marino.

*Keywords: bridge piers, inclined pile groups, nonlinear seismic analyses, soil-foundation-structure interaction.*

### ABSTRACT

This paper presents first results of an on-going research focused on the effects of piles layout and inclination on the nonlinear seismic response of bridge piers. The analysis methodology, based on the substructure approach, is presented. The soil-foundation system is studied in the frequency domain according to a numerical model developed by the authors while the inertial interaction analysis of the superstructure is carried out in the time domain to capture the nonlinear structural behaviour. A suitable lumped parameter model is used to approximate the frequency dependent behaviour of the soil-foundation impedances in the time domain analyses. The procedure is applied to some bridge piers founded on medium stiff and soft clayed soil deposits. Groups of piles with different inclinations are considered, as well as piers with different fundamental periods and yielding bending moments of the base cross sections, to simulate systems with different elasto-plastic behaviour. Results of the analyses show the key role of the foundation rocking on the superstructure response and demonstrate that inclined pile foundations may have a significant impact on the superstructure response, reducing the pier head displacements and ductility demand.



# Risposta sismica non lineare di pile da ponte fondate su gruppi di pali inclinati

Michele Morici<sup>a</sup>, Sandro Carbonari<sup>b</sup>, Fabrizio Gara<sup>b</sup>, Francesca Dezi<sup>c</sup>, Graziano Leoni<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Scuola di Ateneo di Architettura e Design, Viale della Rimembranza, 63100 Ascoli Piceno.

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Via Breccie Bianche, 60131 Ancona.

<sup>c</sup> Dipartimento di Economia, Scienze e Diritto, Via Salita alla Rocca 44, 47890 San Marino, Repubblica di San Marino.

*Keywords: analisi sismiche non lineari, fondazioni su pali inclinati, interazione terreno-fondazione-struttura, pile da ponte.*

## ABSTRACT

Questo lavoro presenta i primi risultati di una ricerca orientata allo studio degli effetti della configurazione e dell'inclinazione dei pali sulla risposta sismica non lineare di pile da ponte. La metodologia di analisi, basata su un approccio alle sottostrutture, viene preventivamente presentata; il sistema terreno-fondazione è analizzato nel dominio delle frequenze adottando un modello numerico sviluppato dagli autori mentre l'analisi di interazione inerziale delle sovrastrutture è svolta nel dominio del tempo per coglierne il comportamento non lineare. La dipendenza dalla frequenza delle funzioni di impedenza del sistema terreno-fondazione è approssimata nel dominio del tempo, attraverso un opportuno modello a parametri concentrati. La procedura è applicata ad alcuni casi studio costituiti da pile da ponte singole fondate in depositi di terreno argilloso di modesta ed elevata rigidità. Sono considerate fondazioni costituite da pali aventi diversa inclinazione e pile caratterizzate da diversi periodi fondamentali e momenti flettenti di snervamento delle sezioni trasversali di base, al fine di simulare sistemi con diverso comportamento elastoplastico. I risultati delle analisi evidenziano il ruolo chiave rivestito dal rocking di fondazione sulla risposta strutturale e dimostrano che le fondazioni con pali inclinati possono contribuire a ridurre gli spostamenti massimi della testa della pila e la domanda di duttilità.

## 1 INTRODUCTION

I moderni codici normativi (EN1998-5, NTC2008) sconsigliano l'uso dei pali inclinati in zona sismica, nonostante la loro riconosciuta capacità di resistere a forze orizzontali maggiori rispetto ai pali verticali di pari lunghezza e diametro. Questo suggerimento è conseguenza delle pessime prestazioni dei pali inclinati, osservate nei terremoti passati (e.g. Priestley et al. 1991). Tuttavia, indagini sulle effettive cause di danno, condotte da molti ricercatori nelle ultime decadi (e.g. Poulos 2006, Ravazi et al. 2007), hanno evidenziato che i danni osservati possono essere imputati ad una inadeguata progettazione, piuttosto che ad una intrinseca inadeguatezza dei pali inclinati. In aggiunta, sono disponibili alcune evidenze che dimostrano una buona performance dei pali inclinati soggetti ad azioni sismiche (Lam and Martin 1986, Gazetas and Mylonakis 1988). Appare dunque evidente che il ruolo dei pali inclinati nella risposta sismica delle strutture e delle fondazioni stesse non è ancora ben chiaro. Nonostante siano stati recentemente fatti importanti progressi nella comprensione della

dinamica di fondazioni con pali inclinati (Sadek and Shahrour 2004, Giannakou et al. 2010, Padrón et al. 2010, Dezi et al. 2016), sono necessarie ulteriori analisi per chiarire gli effetti dei pali inclinati sulla risposta sismica della sovrastruttura.

Questo lavoro presenta alcuni risultati di una ricerca in corso, mirata allo studio degli effetti dei pali inclinati sulla risposta sismica non lineare di pile da ponte singole. Inizialmente viene presentata la metodologia di analisi, basata su un approccio alle sottostrutture, che sarà applicata all'analisi di alcuni casi studio. Il sistema terreno-fondazione è analizzato nel dominio della frequenza per mezzo di un modello numerico sviluppato dagli autori (Dezi et al. 2016). Le analisi di interazione inerziale delle pile da ponte sono eseguite nel dominio del tempo per includerne la risposta non lineare, adottando un modello a parametri concentrati per tener conto della dipendenza dalla frequenza delle funzioni di impedenza dinamica del sistema terreno-fondazione. La procedura è applicata a casi studio costituiti da pile da ponte fondate su gruppi di pali verticali ed inclinati.

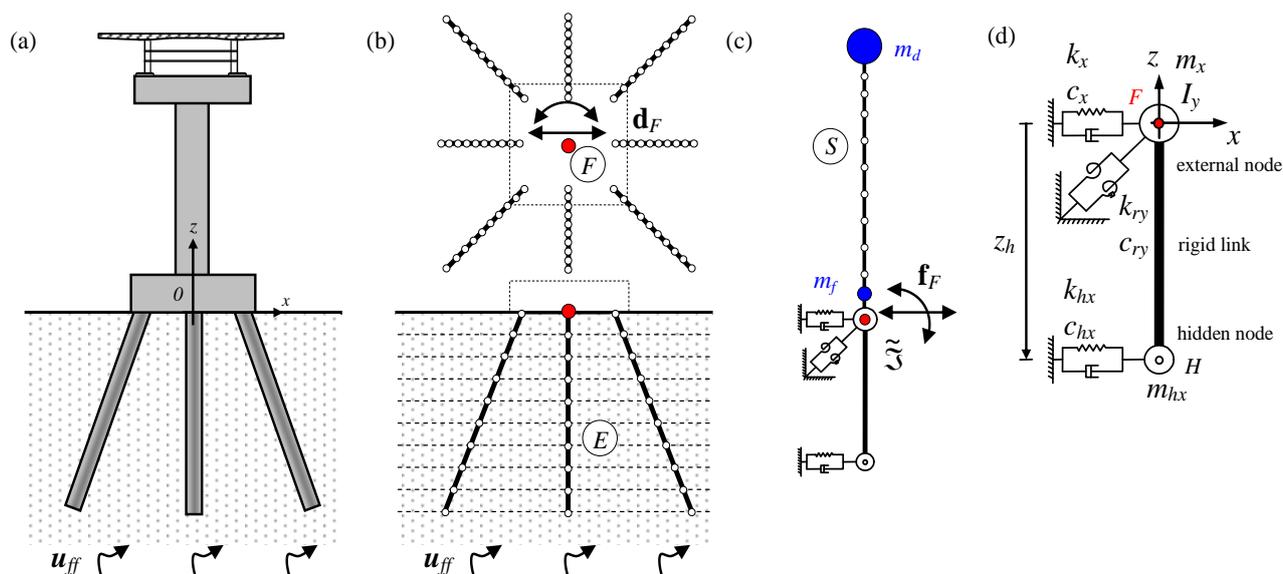


Figura 1. (a) Pila da ponte fondata su pali, (b) modello del sistema terreno-fondazione, (c) modello della sovrastruttura; (d) modello a parametri concentrati adottato.

I casi studio includono pile caratterizzate da diversi periodi fondamentali e da sezioni trasversali di base aventi diversi momenti di snervamento. I risultati delle applicazioni mostrano il ruolo rivestito dal rocking di fondazione ed in particolare dall'input rotazionale, che si aggiunge a quello traslazionale in conseguenza dell'accoppiamento roto-traslazionale che caratterizza al risposta cinematica delle fondazioni su pali. Gli effetti sulla struttura sono valutati in termini di spostamenti massimi in testa alla pila e di domanda di duttilità.

## 2 METODOLOGIA DI ANALISI

Si considera una singola pila da ponte fondata su un gruppo di pali inclinati di configurazione ed inclinazione generica. Tenendo conto in modo lineare equivalente delle non linearità del terreno, il problema di interazione terreno-struttura è studiato in accordo ad un approccio alle sottostrutture, dividendo il sistema terreno-fondazione-struttura (Figura 1a) nei sottosistemi terreno fondazione (Figura 1b) e sovrastruttura su opportuni vincoli cedevoli (Figura 1c). Questo approccio è classicamente adottato nel caso di sistemi a comportamento lineare ma può essere utilizzato per includere il comportamento non lineare della sovrastruttura (Sextos et al. 2003) nell'ipotesi di comportamento lineare del sistema terreno-fondazione, assumendo che le deformazioni prodotte dall'interazione inerziale siano trascurabili rispetto a quelle prodotte dalla propagazione delle onde sismiche nel terreno

(interazione cinematica).

### 2.1 Analisi del sistema terreno-fondazione: impedenze e moto di fondazione

L'analisi dinamica del sistema terreno-fondazione fornisce la matrice di impedenza dinamica della fondazione, dipendente dalla frequenza, che caratterizza i supporti cedevoli della sovrastruttura ed il moto di fondazione in assenza di struttura che differisce dal moto di terreno libero in conseguenza dell'effetto filtro esercitato dalla fondazione profonda.

In questo lavoro, le analisi dinamiche del sistema terreno-fondazione sono eseguite adottando il modello agli elementi finiti proposto da Dezi et al. (2016) (Figura 1b); il modello permette di studiare il problema di interazione terreno-palificata di fondazioni profonde caratterizzate da una generica configurazione e inclinazione dei pali, soggette alla propagazione di onde sismiche in depositi di terreno orizzontalmente stratificati. Il problema dinamico è risolto nel dominio delle frequenze modellando i pali con elementi finiti di tipo trave ed il terreno come un set di layer orizzontali indefiniti di spessore infinitesimo. La dinamica di ciascuno strato permette di cogliere l'interazione terreno-palificata e include lo smorzamento isteretico e geometrico del terreno. La presenza di una zattera rigida in testa ai pali è simulata considerando un vincolo interno rigido applicato ai nodi di sommità dei pali, avente come riferimento il nodo  $F$ . Nel dominio della frequenza, il problema discreto è governato dal seguente sistema di equazioni lineari

complesse:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{FF} & \mathbf{Z}_{FE} \\ \mathbf{Z}_{EF} & \mathbf{Z}_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_F \\ \mathbf{d}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{I}_{FF} & \mathcal{I}_{FE} \\ \mathcal{I}_{EF} & \mathcal{I}_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_F \\ \mathbf{u}_E \end{bmatrix}_{ff} \quad (1)$$

dove  $\mathbf{Z}$  è la matrice di rigidità dinamica del sistema terreno-fondazione, dipendente dalla frequenza, e  $\mathbf{d}$  è il vettore degli spostamenti nodali, partizionato per mettere in evidenza le componenti degli spostamenti dei nodi delle parti di palo infisse ( $E$ ) e della zattera di fondazione ( $F$ ) (Figura 1b). Il secondo membro dell'equazione (1) rappresenta il vettore delle forze nodali dovuto all'interazione terreno-palificata, ottenuto moltiplicando l'impedenza globale del terreno  $\mathcal{I}$  per il moto di terreno libero, descritto dal vettore  $\mathbf{u}_{ff}$ , valutato all'interno del deposito in corrispondenza dei nodi della mesh dei pali, attraverso specifiche analisi di risposta di sito.

La matrice di impedenza a valori complessi del sistema terreno-fondazione, ottenuta condensando il sistema (1) sui gradi di libertà del nodo  $F$ , ed il moto di fondazione, risultano

$$\mathfrak{Z}(\omega) = (\mathbf{Z}_{FF} - \mathbf{Z}_{FE} \mathbf{Z}_{EE}^{-1} \mathbf{Z}_{EF}) \quad (2)$$

$$\mathbf{d}_F(\omega) = \mathfrak{Z}^{-1} [\mathbf{f}_F - \mathbf{Z}_{FE} \mathbf{Z}_{EE}^{-1} \mathbf{f}_E] \quad (3)$$

Considerando la risposta piana delle pile, la matrice (2) assume la forma

$$\mathfrak{Z}(\omega) = \begin{bmatrix} \mathfrak{Z}_x & 0 & \mathfrak{Z}_{x-ry} \\ 0 & \mathfrak{Z}_z & 0 \\ \mathfrak{Z}_{x-ry} & 0 & \mathfrak{Z}_{ry} \end{bmatrix} \quad (4)$$

dove i pedici  $x$ ,  $z$ , e  $ry$  sono utilizzati per indicare le componenti di rigidità dinamica relative rispettivamente ai gradi di libertà orizzontale, verticale e rotazionale della zattera di fondazione ( $F$ ), coerentemente con il sistema di riferimento riportato in Figura 1a. Il pedice  $x-ry$  si riferisce al termine di accoppiamento roto-traslazionale.

## 2.2 Analisi della sovrastruttura: modello a parametri concentrate e azione sismica

L'analisi di interazione inerziale della sovrastruttura su vincoli cedevoli e soggetta al moto di fondazione è svolta nel dominio del tempo per includere il comportamento non lineare delle pile. Per questo scopo, sono adottati modelli a parametri concentrati (Wolf 1988), aventi parametri indipendenti dalla frequenza, per approssimare la matrice di impedenza del sistema terreno-fondazione. In particolare, si adotta il modello riportato nella Figura 1d per cogliere la risposta dinamica dei sistemi di fondazione

(Carbonari et al. 2012, Dezi et al. 2012). Il modello è caratterizzato da 3 gradi di libertà e la sua matrice di impedenza, dipendente da 13 parametri, assume la forma

$$\tilde{\mathfrak{Z}}(\omega) = (\tilde{\mathbf{K}} - \omega^2 \tilde{\mathbf{M}} + i\omega \tilde{\mathbf{C}}) \quad (6)$$

I parametri sono calibrati con una procedura ai minimi quadrati per garantire il miglior fittaggio della matrice di impedenza del sistema terreno-fondazione nel range di frequenze 0÷10 Hz. La sovrastruttura è modellata sfruttando le potenzialità di software di calcolo dedicati all'analisi strutturale, implementando il modello a parametri concentrati alla base delle sovrastrutture.

Nei modelli a base cedevole, le azioni sismiche sono applicate considerando le storie temporali delle forze agenti al nodo  $F$ , calcolate attraverso la trasformata inversa di Fourier

$$\mathbf{f}_F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\mathfrak{Z}} \mathbf{d}_F e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

## 3 CASI STUDIO

In questa sezione si analizza la risposta sismica di pile da ponte singole estratte da un ponte multi-campata con impalcato a sezione composta acciaio-calcestruzzo (Figura 2a).

Le pile indagate hanno sezione trasversale quadrata di lato  $B$  ed altezza  $H_p$  e sono caratterizzate da diversi periodi fondamentali e momenti flettenti di snervamento delle sezioni di base.

I parametri geometrici e le masse  $m_d$  (Tabella 1) sono calibrate per ottenere sistemi caratterizzati da periodi fondamentali  $T_1$ , considerati a base fissa, pari a 0.6 e 1.2 s. Il calcestruzzo è di classe C35/45 con modulo di Young  $E_c = 27262 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> (ridotto all'80% per tener conto della fessurazione).

La fondazione è costituita da un gruppo 3x3 di pali in calcestruzzo aventi diametro  $d = 1$  m, spaziatura  $s = 3d$  e lunghezza  $L_z = 20$  m, misurata sulla proiezione sull'asse  $z$  (Figura 2c). Sono considerate diverse inclinazioni dei pali, così come riportato nella Figura 2a. Nelle applicazioni sono considerati due tipologie di depositi argillosi, rappresentative di una condizione di terreno mediamente rigido e soffice, ricadenti rispettivamente nelle categorie C e D dell'EN1998-1.

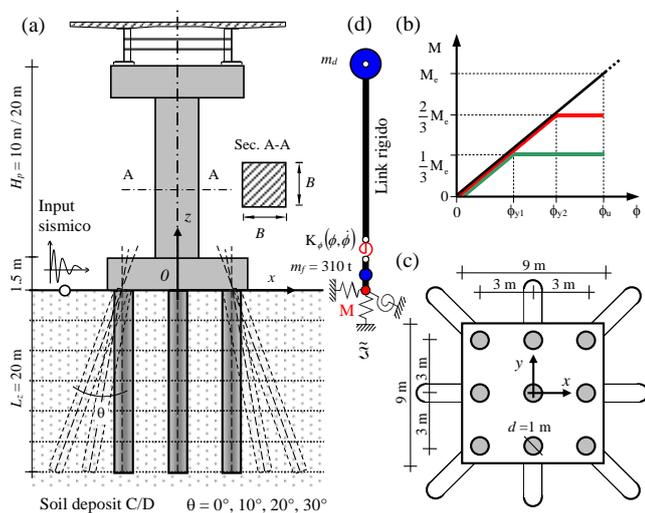


Figura 2. (a) Vista della pila in elevazione; (b) Diagramma momento-rotazione alla corda delle cerniere plastiche; (c) layout della fondazione; (d) modello strutturale.

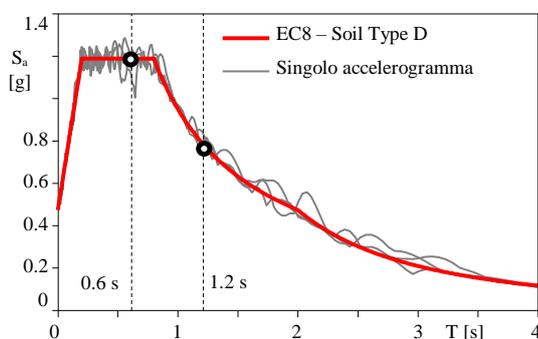


Figura 3. Spettro elastico in pseudo-accelerazione per il deposito D.

I depositi di terreno C e D hanno velocità delle onde di taglio  $V_s$  rispettivamente uguali a 240.5 m/s e 71.7 m/s, e densità  $\rho$  pari a 1.56 t/m<sup>3</sup> and 1.39 t/m<sup>3</sup>. Entrambi i terreni sono caratterizzati da un coefficiente di Poisson  $\nu = 0.4$  e da un fattore di smorzamento  $\xi = 0.05$ .

Le pile sono modellate come corpi rigidi; la deformabilità dovuta al comportamento elasto-plastico è concentrata alla base (Figura 2d) dove è posizionata una opportuna molla rotazionale elasto-plastica. Ciascun caso studio della Tabella 1 è analizzato considerando sia il comportamento lineare che non lineare della pila e assumendo una fondazione caratterizzata da pali verticali ed inclinati, per entrambe le tipologie di terreno. La rigidità elastica  $k$  delle molle rotazionali è calibrata, con riferimento ai sistemi a base fissa, per ottenere i periodi fondamentali

precedentemente selezionati. Le analisi non lineari sono eseguite considerando un modello elasto-plastico per le cerniere alla base delle pile, caratterizzate da momenti flettenti di snervamento  $M_{y1}$  e  $M_{y2}$  (Figura 2b), rispettivamente pari a 1/3 e 2/3 del massimo momento flettente  $M_u$  agente sui sistemi elastici a base fissa per l'azione sismica di progetto.

L'azione sismica è definita in superficie di ciascun deposito attraverso un set di 3 accelerogrammi artificiali, ciascuno dei quali risulta singolarmente spettro-compatibile con lo spettro elastico di riferimento per i terreni di tipo C e D (EN1998-1). La Figura 3 mostra per il terreno D lo spettro di risposta in pseudo-accelerazione per i tre accelerogrammi. Tenuto conto che lo spettro elastico differisce per le due tipologie di terreno, sono stati definiti diversi valori di  $M_e$  (e conseguentemente di  $M_{y1}$  e  $M_{y2}$ ) per ciascun caso studio della Tabella 1. I valori della costante elastica  $k$  della molla flessionale ed i momenti  $M_e$ ,  $M_{y1}$  e  $M_{y2}$  sono riportati in Tabella 1.

#### 4 RISULTATI DELLE APPLICAZIONI

Per brevità, i fenomeni che governano la risposta dinamica delle pile sono prima discussi qualitativamente presentando i risultati di poche analisi e concentrando l'attenzione sul ruolo chiave rivestito dal moto rotazionale della fondazione. Successivamente, sono mostrati i risultati dell'intero set di analisi con riferimento al valore medio (ottenuto dalle analisi con i tre accelerogrammi) dello spostamento relativo massimo (rispetto alla fondazione) dell'impalcato (sommità delle pile).

La Figura 4 mostra le storie temporali di spostamento e rotazione della zattera di fondazione ( $F$ ) (ovvero il moto di fondazione) registrato nel caso del deposito D per uno degli accelerogrammi selezionati. Si può notare che a spostamenti positivi della zattera sono associate rotazioni positive, nel caso di pali verticali, e rotazioni negative, nel caso di pali inclinati; in aggiunta, le rotazioni in fondazione crescono al crescere dell'inclinazione dei pali.

Table 1. Parametri delle sovrastrutture.

Case study	$T$ (s)	$H_p$ (m)	$B$ (m)	$m_d$ (t)	$k$ (kNm/rad)	$M_e$ (kNm) Deposit C	$M_e$ (kNm) Deposit D
T06H10	0.6	10	1.5	314.6	3.46E+04	4.39E+04	5.16E+04
T06H20	0.6	20	2.5	303.5	3.33E+04	8.47E+04	9.95E+04
T12H10	1.2	10	1.1	314.6	9.99E+03	2.20E+04	3.44E+04
T12H20	1.2	20	1.8	303.5	8.96E+03	4.24E+04	6.63E+04

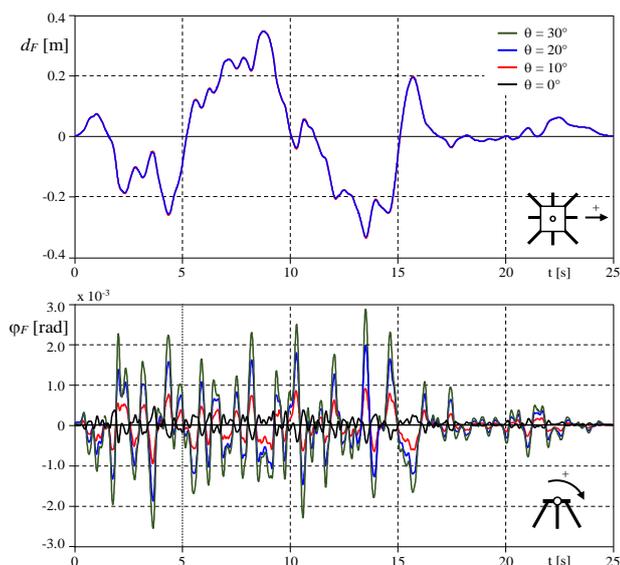


Figura 4. Componente traslazionale e rotazionale del moto di fondazione per uno degli accelerogrammi selezionati per il terreno D.

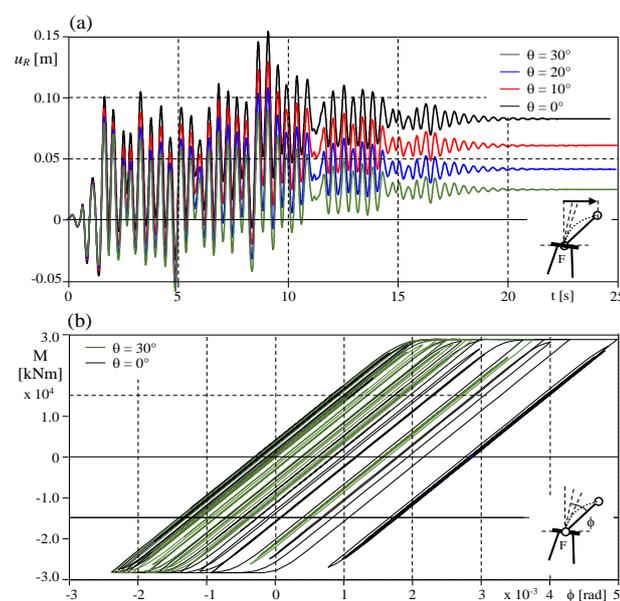


Figura 5. (a) Storie temporali degli spostamenti relative dell'impalcato per i ponti T06H20; (b) diagramma  $M-\phi$  per la pila T06H20

Mentre le rotazioni nel caso di pali verticali si sviluppano solo a causa delle forze assiali nei pali necessarie all'equilibrio dei momenti flettenti cinematici in testa, le rotazioni nel caso dei pali inclinati sono anche dovute direttamente agli spostamenti orizzontali del terreno che producono sollevamenti e abbassamenti dei pali. Nel caso di pali inclinati quindi, la componente rotazionale del moto di fondazione produce forze di inerzia opposte in segno rispetto a quelle prodotte dagli spostamenti orizzontali; questo in generale riduce le forze inerziali sulla sovrastruttura che subisce

spostamenti minori, come si può osservare dalla Figura 5a che mostra, per uno degli accelerogrammi selezionati, le storie temporali dello spostamento relativo dell'impalcato per i casi studio T06H20 nel caso di deposito di terreno C.

La Figura 5b mostra i diagrammi momento-rotazione alla corda delle cerniere plastiche alla base delle pile T06H20 (modelli non lineari con capacità  $M_{y1}$ ) fondate su pali verticali e inclinati di  $30^\circ$  nel deposito C; coerentemente con gli spostamenti, si osserva una riduzione della domanda di duttilità delle cerniere plastiche alla base delle pile.

La Figura 6 mostra i valori medi dello spostamento relativo massimo (in termini assoluti) dell'impalcato ottenuto dal set di accelerogrammi per tutti i casi studio. I contributi allo spostamento dovuti al rocking di fondazione, all'inflessione elastica della pila e alla rotazione plastica della cerniera di base sono mostrati separatamente. Per i sistemi non lineari caratterizzati da diversi momenti di snervamento delle sezioni di base delle pile, si osserva, al crescere dell'inclinazione dei pali, una generale riduzione del contributo di spostamento dovuto alla deformazione plastica (i.e. una riduzione della domanda di duttilità delle cerniere plastiche) e un incremento del contributo dovuto al rocking di fondazione. Questo fenomeno è così marcato per il deposito D che un significativo numero di sistemi non lineari fondati su pali con elevate inclinazioni ( $20^\circ$  e  $30^\circ$ ) si comportano elasticamente. Gli effetti del rocking della fondazione sembrano trascurabili per le pile snelle nei depositi C e molto pronunciati per le strutture rigide nei terreni soffici; questa osservazione è coerente con le considerazioni generali di letteratura relative alla significatività degli effetti dell'interazione terreno-struttura sulla risposta dinamica delle strutture.

## 5 CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati mostrati alcuni primi risultati di una ricerca in corso indirizzata allo studio degli effetti dell'interazione terreno-struttura nella risposta sismica non lineare di pile da ponte. Nel dettaglio, sono analizzate pile fondate su gruppi di pali verticali ed inclinati in depositi argillosi di media rigidità e soffici, caratterizzate da diversi periodi di vibrazione, altezza e comportamento elasto-plastico.

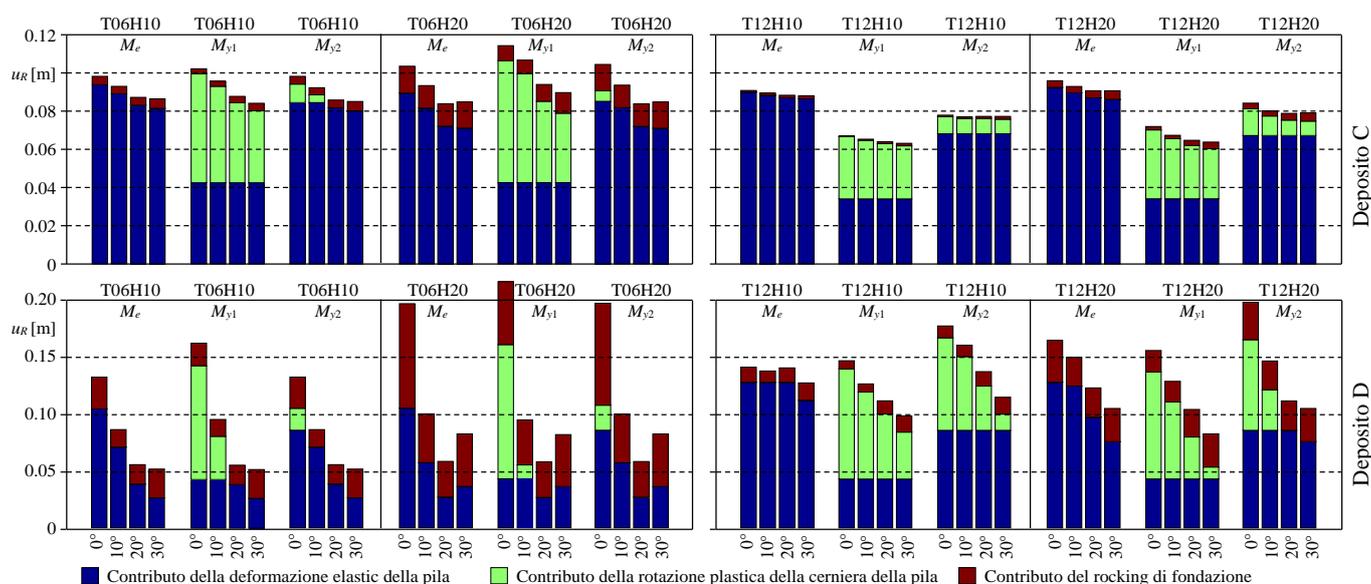


Figura 6. Spostamento relativo dell'impalcato per tutti i casi studio.

I risultati evidenziano che per le fondazioni di pali inclinati, il moto rotazionale dovuto all'interazione cinematica è opposto in segno a quello che si sviluppa nel caso di pali verticali. Le forze di inerzia agenti sulle masse strutturali dovute alle accelerazioni rotazionali della fondazione riducono quelle prodotte dalle componenti di traslazione. Conseguentemente, le pile fondate su pali inclinati mostrano, rispetto a quelle fondate su pali verticali, una riduzione degli spostamenti e della domanda di duttilità, specialmente per le strutture rigide in terreni soffici.

## REFERENCES

- EN 1998-1. 2003. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- EN 1998-5. 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- NTC2008. 2008. Technical rules for constructions (in Italian).
- Priestley, N., Singh, J., Youd, T., Rollins, K., Costa Rica Earthquake of April 22, 1991 Reconnaissance Report, Earthquake Engineering Research Institute Pub. 91-02 59-91.
- Poulos, H., 2006. Raked piles-virtues and drawbacks, *J. Geotech Geoenviron Eng.* **132**(6), 795-803.
- Ravazi, S.A., Fahker, A., Mirghaderi, S.R., 2007. An insight into the bad reputation of batter piles in seismic performance of wharfs, in: *4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, June 25-28.
- Gazetas, G., Mylonakis, G., 1988. Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues,

- Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, ASCE, Geotechnical Special Publication II, 1119-1174.
- Lam, I., Martin, G.R., 1986. Seismic design of highway bridge foundations, vol. II Design procedures and guidelines, Report No. FHWA/RD-86/102, Federal highway Administration, Virginia.
- Sadek, M., Shahrour, I., 2004. Three-dimensional finite element analysis of the seismic behaviour of inclined micropiles, *Soil Dyn Earthquake Eng.*, **24**(6), 473-485.
- Giannakou, A., Gerolymos, N., Gazetas, G., Tazoh, T., Anastasopoulos, I., 2010. Seismic Behavior of Batter Piles: Elastic Response, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**, 1187-1199.
- Padrón, L.A., Aznárez, J.J., Maeso, O., Santana, A., 2010. Dynamic stiffness of deep foundations with inclined piles, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **39**(12), 1343-1367.
- Dezi, F., Carbonari, S., Morici, M., 2016. A numerical model for the dynamic analysis of inclined pile groups, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **45** (1) (2016) 45-68.
- Sextos, A.G., Pitilakis, K.D., Kappos, A.J., 2003. Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil-structure interaction phenomena, Part 2: Parametric study, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **32** (4), 629-52.
- Wolf, J.P., 1988. Soil-structure interaction analysis in time domain. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J..
- Carbonari, S., Dezi, F., Leoni, G., 2012. Non-linear seismic behaviour of wall-frame dual systems accounting for soil-structure interactions, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **41** (12), 1651-1672.
- Dezi, F., Carbonari, S., Tombari, A., Leoni, G., 2012. Soil-structure interaction in the seismic response of an isolated three span motorway overcrossing founded on piles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*: **41**, 151