

## ANALISI NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA DEL TERRENO INCLUSO CON COLONNE DI POLIURETANO

Michele Placido Antonio Gatto

Università di Parma

[micheleplacidoantonio.gatto@unipr.it](mailto:micheleplacidoantonio.gatto@unipr.it)

Lorella Montrasio

Università di Parma

[lorella.montrasio@unipr.it](mailto:lorella.montrasio@unipr.it)

Martina Ugolotti

Università di Parma

[martina.ugolotti@studenti.unipr.it](mailto:martina.ugolotti@studenti.unipr.it)

### Sommario

L'isolamento sismico geotecnico comprende gli interventi realizzati nel terreno per la riduzione del rischio sismico; in tale ambito, un metodo innovativo è quello basato sulle iniezioni di poliuretano, di notevole interesse per la protezione delle opere civili esistenti. La nota mostra i risultati numerici di una modellazione agli elementi finiti condotta per evidenziare l'effetto delle inclusioni di poliuretano sulla risposta sismica di terreni incoerenti a differenti stati di addensamento. La presenza di poliuretano viene considerata assegnando caratteristiche fisico-meccaniche omogeneizzate al volume superficiale in cui si ipotizza di realizzare le iniezioni. Per studiare la dipendenza della risposta superficiale dalla frequenza dell'input, si utilizzano ondine Ricker a tre diverse frequenze.

### 1. Introduzione

Il concetto di isolamento sismico geotecnico (Geotechnical seismic isolation, *GSI*) definito da Tsang (2008) comprende i metodi di riduzione del rischio sismico basati su interventi nel terreno; tali metodi rappresentano un'alternativa ai più comuni interventi di tipo strutturale. Concettualmente, il *GSI* è simile a una tecnica di base isolation, ma i dispositivi di isolamento sono sostituiti dalla modifica degli strati superficiali del terreno di fondazione. Per migliorare sismicamente il terreno, si può agire introducendo strati di altro materiale naturale o utilizzando materiali sintetici; in quest'ultimo caso, è diffuso lo studio dei geosintetici, delle geo-foam ma soprattutto della miscela gomma – terreno, largamente analizzata con lo scopo di riutilizzare la gomma degli pneumatici da riciclare. Tuttavia, gli interventi di *GSI* basati su questi materiali presentano il limite di applicabilità nella protezione degli edifici esistenti.

Dal 2014, il gruppo di Geotecnica dell'Università di Parma ha avviato un'attività di ricerca sul *GSI* basato sull'utilizzo di poliuretano, un polimero cellulare a bassa densità molto usato per il ground improvement tramite iniezione ad alta pressione. Il prodotto chimico si ottiene miscelando due componenti liquidi, il poliolo e l'isocianato; la miscelazione innesca una reazione fra i due componenti che, in presenza di acqua o di un agente espandente, dà luogo a un processo di espansione seguito dall'indurimento del materiale. Il materiale indurito ha elevata rigidezza e bassa densità (le celle di cui è costituito inglobano CO<sub>2</sub> durante il processo di espansione) e dunque bassa impedenza se confrontata con quella del terreno; grazie a questo aspetto, il materiale è un potenziale riduttore delle accelerazioni superficiali. In una fase iniziale, Montrasio e Gatto (2016) e Montrasio e Gatto (2017) hanno studiato il materiale dal punto di vista meccanico, conducendo prove edometriche e triassiali su campioni di

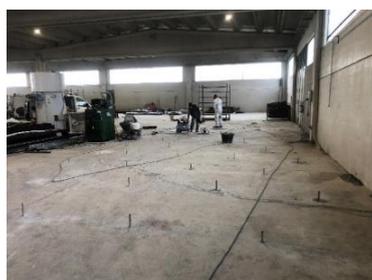
differente densità, evidenziando in edometro una limitata variazione dell'indice dei vuoti fino a uno sforzo verticale (dipendente dalla densità del materiale) oltre il quale il materiale collassa, mentre in TX una quasi totale indipendenza dello sforzo deviatorico dalla pressione di cella, fino a un valore limite oltre il quale il materiale riduce la propria resistenza (contrariamente a quello che accade comunemente per i terreni). Dal punto di vista sismico, si è studiato il comportamento sperimentale a scala di elemento di volume, realizzando un'apposita apparecchiatura per condurre prove di impatto (Gatto et al. 2020; Gatto et al. 2021a); i risultati delle prove condotte su campioni composti sabbia – poliuretano (materiale inserito sottoforma di lastra) hanno evidenziato la riduzione delle accelerazioni superficiali dovute alla propagazione di onde P, riduzione che aumenta quando la percentuale volumetrica di poliuretano è maggiore.

Nell'ottica di estendere l'attività verso un'applicazione al finito, Gatto et al. (2021b) hanno condotto una modellazione numerica agli elementi finiti finalizzata a studiare la risposta sismica locale di un terreno incoerente a quattro diversi addensamenti, modificato per tenere conto della presenza di poliuretano; questo articolo mostra il prosieguo dell'attività, verificando l'effetto della frequenza dell'input sulla risposta sismica dei terreni inclusi con poliuretano.

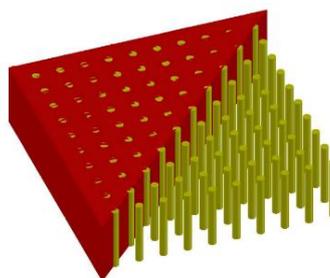
## 2. Le iniezioni di poliuretano per il ground improvement

Gli interventi di consolidamento dei terreni sono molto diffusi; tra questi, la tecnica di iniezione di poliuretano è spesso impiegata sotto le fondazioni di edifici esistenti. La tecnologia di iniezione di poliuretano in pressione a cui si fa riferimento è quella di Master Builders Solutions, basata sull'iniezione di poliuretani della famiglia MasterRoc MP 35X. La tecnica e il materiale specifico da utilizzare per l'intervento viene progettato sulla base di indagini effettuate preliminarmente su struttura, fondazioni e sul terreno sottostante. Le iniezioni sono realizzate puntualmente, con schemi di intervento dipendenti dalle tipologie di fondazioni. In ciascun punto di iniezione si inietta a differenti profondità (livelli di iniezione), con la possibilità di inserire per ciascun livello una quantità differente di materiale.

Nel caso di fondazioni a platea, sulla superficie vengono realizzate delle perforazioni dando luogo a una maglia a quinconce variabile da 0.5 a 1.5 m; in Figura 1a è mostrato un esempio. In ciascun punto della maglia, si iniettano 10-20 kg di poliuretano per livello di iniezione, per 1-3 livelli complessivi (il primo livello solitamente è quello immediatamente sottostante il piano di posa delle fondazioni, gli altri sono distanziati tra loro da 0.5 a 1.0 m di profondità).



(a)



(b)

Fig. 1. Iniezioni di poliuretano sotto platee di fondazione (a) Esempio applicativo realizzato da Bequadro S.r.l.; (b) Schematizzazione delle iniezioni di poliuretano come cilindri circondati da terreno

Il volume di poliuretano iniettato ( $V_{in}$ ) si espande esercitando una pressione di espansione dipendente dalla quantità di materiale iniettato; l'entità dell'espansione viene quantificata con un fattore  $CE$  pari al rapporto  $V_{fin}/V_{in}$ , essendo  $V_{fin}$  il volume occupato dal poliuretano indurito.  $CE$  è strettamente legato al confinamento del terreno, quest'ultimo a sua volta dipendente dalla tipologia di terreno e dalla profondità. In Figura 1b si mostra una semplificazione della configurazione terreno-poliuretano post espansione.

### 3. Il modello numerico

La modellazione numerica mostrata è stata condotta agli elementi finiti (FEM) mediante il software OpenSees (Mazzoni et al. 2006) e l'ausilio di GID per l'interfaccia grafica (Coll et al. 2018), implementati insieme nel software GID+OpenSees (Papanikolaou et al. 2017). L'obiettivo delle analisi è quello di evidenziare l'effetto di input di diversa frequenza sulla risposta sismica di terreni modificati per tenere conto della presenza del poliuretano. Il modello numerico, le tipologie di terreno e la procedura di omogenizzazione delle caratteristiche per lo strato di materiale composito sono quelle già descritte in Gatto et al. (2021b), di cui si riassumono brevemente le caratteristiche di seguito.

Si considera una colonna di terreno di area di base  $1\text{m}^2$  e spessore 30 metri, discretizzata con elementi 3D StandardBrick a 9 nodi di dimensioni  $0.5 \times 0.5 \times 1$  (Figura 2a), nel rispetto della relazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969). In Figura 2a si schematizza la metodologia numerica, ampiamente descritta in Gatto et al. (2021b), utilizzata in questo lavoro per l'introduzione dell'input sismico (applicazione di una forza viscosa proporzionale alla storia temporale dell'input e vincoli master-slave per la simulazione numerica di uno scuotimento uniforme, approccio di Joyner e Chen (1975)) e per la modellazione del bedrock visco-elastico (carrelli ad asse verticale e smorzatore puntuale modellato con elemento ZeroLength di materiale viscoso). Il terreno in esame è di tipo incoerente e i casi analizzati prevedono 4 stati di addensamento differenti (Loose sand, L,  $D_R=15-35\%$ ; Medium sand, M,  $D_R=35-65\%$ ; Medium-Dense sand, MD,  $D_R=65-85\%$ ; Dense sand, D,  $D_R=85-100\%$ ).

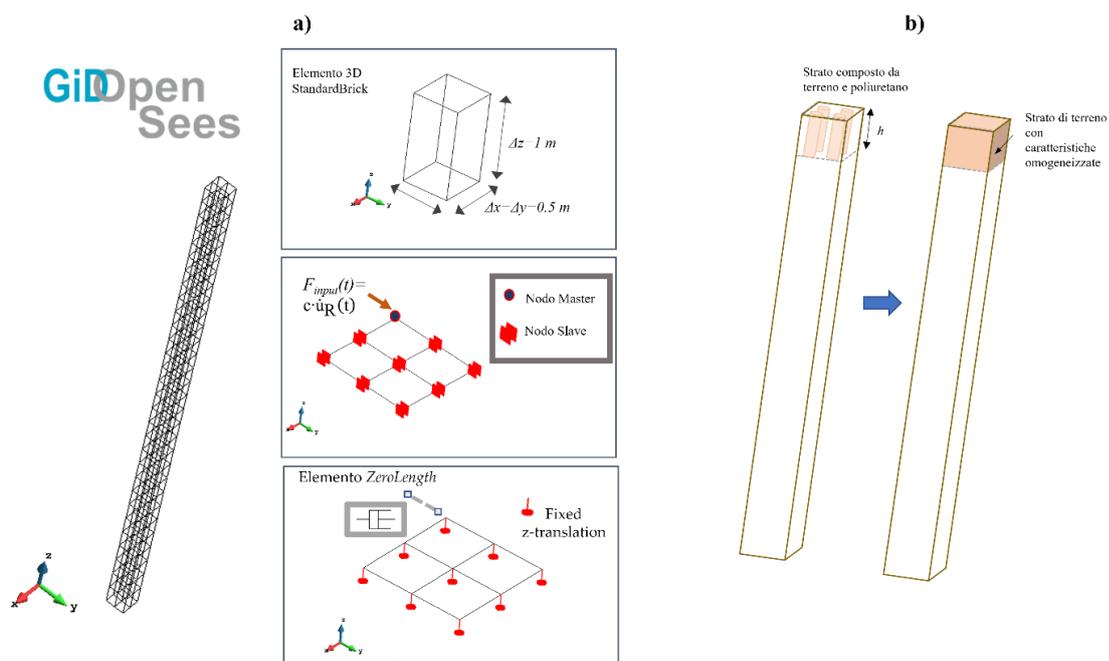


Fig. 2. Elementi salienti della modellazione numerica. a) Riepilogo dell'elemento finito e delle modalità di applicazione dell'input e modellazione del bedrock adottate; b) ipotesi semplificativa per la modellazione dello strato di materiale composito sabbia – poliuretano.

La tecnologia di consolidamento del terreno basata sull'iniezione di poliuretano in pressione, descritta in Sezione 2, dà luogo a una modifica del terreno di fondazione per lo spessore  $h$  dipendente dai livelli di iniezione considerati. In base a quanto il materiale iniettato (di massa  $m_{PUR}$ ) si espande (volume finale  $V_{fin}$ ), varierà sia la densità del poliuretano indurito ( $\rho_{PUR} = m_{PUR} / V_{fin}$ ) che la percentuale volumetrica di poliuretano presente nello strato modificato ( $\%PUR = n * V_{fin} / V_{SP}$ ,  $n$  numero di iniezioni,  $V_{SP}$  volume di terreno modificato). Come descritto in Gatto et al. (2021b), nel modello numerico si tiene conto della presenza di poliuretano misto a terreno in maniera semplificata, sostituendo lo strato di spessore  $h$ , composto sia da terreno che da poliuretano, con uno strato di terreno dello stesso spessore, avente caratteristiche omogeneizzate in base alla percentuale volumetrica  $\%PUR$  (Figura 2b).

Il modello costitutivo utilizzato sia per gli strati di puro terreno che per quelli di materiale composito è il Pressure Dependent Multi Yield (PDMY), sviluppato da Parra (1996) e Elgamal et al. (2003); si tratta di un modello costitutivo isteretico non lineare basato sul concetto di multiplasticità, adatto alla modellazione dei terreni incoerenti la cui risposta a taglio dipende dal confinamento. La non-linearità del terreno è introdotta con una legge sforzi-deformazioni ottaedriche di tipo iperbolico; questa sottintende una curva di decadimento del modulo di taglio. Il modello costitutivo considera, inoltre, una variazione esponenziale (con esponente  $d$ ) del modulo di taglio a piccole deformazioni  $G$  con la pressione di confinamento  $p'$ , di tipo  $G/G_{ref}=(p'/p'_{ref})^d$ , essendo  $G_{ref}$  il modulo di taglio alla pressione di riferimento  $p'_{ref}$ . Lo smorzamento viscoso del terreno viene introdotto con il metodo frequenza dipendente di Rayleigh (Chopra, 2011).

Per lo strato di materiale composito, i parametri di deformabilità richiesti dal modello costitutivo sono valutati con le seguenti espressioni, calibrate sui risultati di prove di colonna risonante condotte da Gatto et al. (2019) su campioni compositi:

$$G_{SP}=G_{ref}\exp[-\ln(G_{ref}/G_{PUR})\cdot\%PUR/100] \quad (1a)$$

$$d=0.33(1-10^{-4}\%PUR) \quad (1b)$$

dove  $G_{SP}$  e  $G_{PUR}$  sono rispettivamente il modulo di taglio a piccole deformazioni del materiale composito e del puro poliuretano alla pressione di riferimento, con  $G_{PUR}$  ricavato conoscendo la densità, con la relazione lineare proposta da Gatto et al. (2021b).

La percentuale volumetrica di poliuretano  $\%PUR$  dipende da quanto il materiale si espande, in relazione al confinamento offerto dal terreno; sebbene vi siano dei modelli teorici che permettono di simulare il processo di espansione (Svaldi et al. 2005), questo aspetto non viene approfondito in questo lavoro ma ci si limita a ipotizzare dei fattori di espansione (o coefficienti di espansione  $CE$ ), con cui valutare la densità del materiale indurito e la  $\%PUR$ . Si considera  $CE$  pari a 5, 8 e 10; 4 punti di iniezione (a distanza 75 cm); 2, 3 e 4 livelli di iniezione (spessore materiale composito  $h=2, 3$  e 4 metri), con l'iniezione di massa  $m_{PUR}$  di 15 kg per ciascun livello. Le densità di puro poliuretano sono  $\rho_{PUR}=240, 150$  e  $120 \text{ kg/m}^3$ .

Come in Gatto et al. (2021b), l'input scelto è la funzione o ondina di Ricker (1977), molto utilizzata nelle analisi numeriche di tipo dinamico, grazie alla facilità con cui è possibile scalare l'ampiezza e controllarne la frequenza di input (Loli et al., 2015). Lo spostamento ha equazione:

$$u_R=u_0(2u^*-1)e^{-u^*} \quad (2a)$$

$$u^*=\left[\frac{\pi(t-t_s)}{t_p}\right] \quad (2b)$$

Ove  $t_p$  è il periodo dominante dell'ondina,  $t_s$  l'istante temporale in cui si verifica il picco della funzione, di spostamento massimo  $u_0$ . La principale novità di questo lavoro rispetto a Gatto et al. (2021b) è l'analisi dell'effetto di input di diversa frequenza sulla risposta sismica del terreno modificato; nello specifico, si considerano i tre casi di  $t_p$  pari a 0.5, 1 e 2 secondi, corrispondenti rispettivamente a  $f_{input}$  di 2, 1 e 0.5 Hz, di cui si rappresenta la storia temporale dell'accelerazione (Figura 3a) e lo spettro di Fourier dello spostamento (Figura 3b), che evidenzia le frequenze di input.

#### 4. Risultati

In Figura 4 si mostra la riduzione percentuale delle accelerazioni massime superficiali dei terreni inclusi; tale riduzione è valutata come  $1-a_{max,SP}/a_{max,S}$ , essendo  $a_{max,S}$  l'accelerazione massima registrata superficialmente nel terreno puro e  $a_{max,SP}$  il massimo nello stesso tipo di terreno con lo strato superficiale modificato, a parità di input sismico.

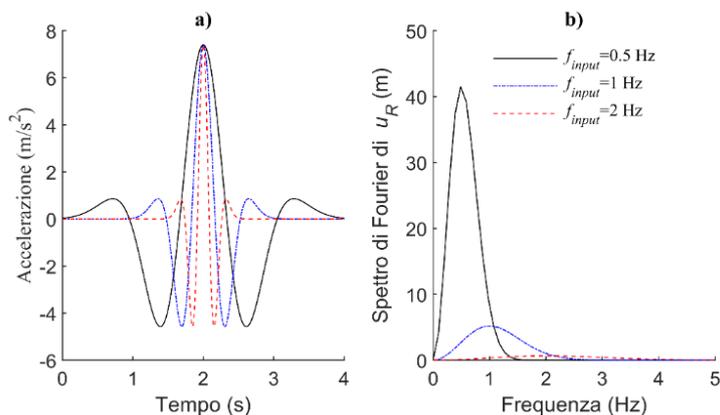


Fig. 3. Ondine di Ricker di diversa frequenza utilizzate come input nell'analisi numerica. a) Rappresentazione dell'accelerazione delle onde applicata al bedrock; b) Spettri di Fourier delle onde.

I risultati confermano quanto già evidenziato da Gatto et al. (2021b) in merito alla maggiore efficienza dell'intervento se realizzato nei terreni sciolti e nel caso di espansione del poliuretano iniettato di 10 volte ( $CE=10$ ); quest'ultima ipotesi appare realistica perché in un terreno sciolto, che esercita basso confinamento, ci si aspetta che il poliuretano iniettato si espanda di più. Si evidenzia, inoltre, che l'amplificazione stratigrafica è maggiore nei terreni con caratteristiche meccaniche e dinamiche più scadenti; su di essi, la riduzione delle accelerazioni superficiali ottenibile con l'intervento proposto risulta quindi essere vantaggiosa.

Le accelerazioni superficiali sono influenzate dalla frequenza di eccitazione, in relazione alla funzione di amplificazione del deposito (frequenza fondamentale  $f_1=1.5$  Hz per il terreno L, con l'intervento di  $h=4$  m e  $CE=10$   $f_1=1.56$  Hz); questo giustifica la maggiore amplificazione dell'input di frequenza 2 Hz nel terreno L composto, con  $h=4$  m, caso in cui la riduzione è minore. La riduzione dello stesso caso (terreno L,  $h=4$  m e  $CE=10$ ) per  $f_{input}=0.5$  Hz è maggiore in quanto la frequenza di eccitazione è più distante dalla frequenza fondamentale. Complessivamente, la riduzione media del terreno L con  $CE=10$  legata alla modifica degli strati superficiali è del 3%.

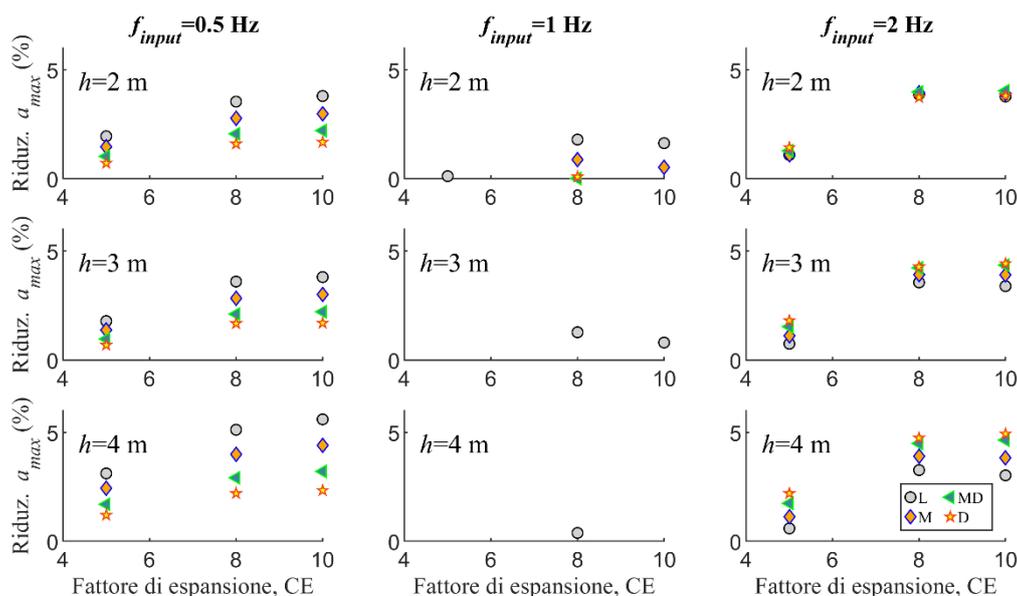


Fig. 4. Riduzione delle accelerazioni massime in terreni incoerenti a quattro diversi addensamenti, modificati con iniezioni di poliuretano di diversa altezza  $h$  e fattore di espansione  $CE$ , ottenute con analisi dinamiche aventi come input onde Ricker di frequenza 0.5, 1 e 2 Hz

## 5. Conclusioni

L'articolo ha mostrato un approfondimento dell'attività numerica condotta agli elementi finiti per evidenziare l'effetto delle inclusioni di poliuretano sulla risposta sismica di terreni sabbiosi. I risultati hanno mostrato che l'intervento risulta essere maggiormente efficiente nei terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti, che sono proprio quelli che necessitano un intervento sia di consolidamento che riduzione di amplificazione stratigrafica. Le accelerazioni superficiali sono maggiormente ridotte quando il poliuretano si espande di più, la sua densità è più bassa, pur mantenendo buone proprietà meccaniche. Le analisi condotte con ondine Ricker a diversa frequenza hanno inoltre evidenziato che il materiale composito riduce le accelerazioni in tutto l'intervallo di frequenza di eccitazione considerato.

## Bibliografia

- Chopra A.K. (2011). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA.
- Coll A., Ribó R., Pasenau, M., Escolano E., Perez J.S., Melendo A., Monros A., Gárate J. (2018). GiD v.14 Reference Manual. Available online: [www.gidhome.com](http://www.gidhome.com) (accessed 25 May 2020).
- Elgamal A., Yang Z., Parra E., Ragheb A. (2003). "Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils", *International Journal of Plasticity*, 19, 883–905.
- Gatto M.P.A., Montrasio L., Zavatto L. (2021a). "Experimental Analysis and Theoretical Modelling of Polyurethane Effects on 1D Wave Propagation through Sand-Polyurethane Specimens", *Journal of Earthquake Engineering*.
- Gatto M.P.A., Lentini V., Castelli F., Montrasio L., Grassi D. (2021b). "The use of polyurethane injection as a geotechnical seismic isolation method in large-scale applications: A numerical study", *Geosciences* 11:201.
- Gatto M.P.A.; Montrasio L., Berardengo M., Vanali M. (2020). "Experimental Analysis of the Effects of a Polyurethane Foam on Geotechnical Seismic Isolation", *Journal of Earthquake Engineering*. 2020, 1–22.
- Gatto M.P.A., Montrasio L., Tsinaris A., Pitilakis D., Anastasiadis A. (2019). "The dynamic behaviour of polyurethane foams in geotechnical conditions". Proc. of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy, 17–20 June 2019; pp. 2566–2573.
- Joyner W.B., Chen, A.T.F. (1975). "Calculation of nonlinear ground response in earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), 1315–1336.
- Loli M., Knappett J.A., Anastasopoulos I., Brown M.J. (2015). "Use of Ricker motions as an alternative to pushover testing" *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 15, 44–55.
- Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. (1969). Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 95, 859–857.
- Mazzoni S., McKenna F., Scott M.H., Fenves G.L. (2006). *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center: Berkeley, CA, USA.
- Montrasio L., Gatto M.P.A. (2016). "Experimental Analyses on Cellular Polymers for Geotechnical Applications", *Procedia Engineering* 158, 272–277, doi:10.1016/j.proeng.2016.08.441
- Papanikolaou V.K., Kartalis-Kaounis T., Protopapadakis V.K., Papadopoulos T. (2017). *GiD+OpenSees Interface: An Integrated Finite Element Analysis Platform*; Lab of R/C and Masonry Structures, Aristotle University of Thessaloniki: Thessaloniki, Greece.
- Parra E. (1996). *Numerical Modeling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil Systems*; Rensselaer Polytechnic Institute: Troy, NY, USA.
- Ricker N. (1977). *Transient Waves in Visco-Elastic Media*; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands.
- Svaldi A., Favaretti M., Paschetto A., Vinco G. (2005). "Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin". Proc. 6th International Conference on Ground Improvement Techniques; Congress proceedings, Coimbra, 18-19 July 2005: 577-584
- Tsang H.-H. (2008). "Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37, 283–303.