

ANALISI NUMERICHE SULL'INTERVENTO DI DISCONNESSIONE LATERALE PER FONDAZIONI SUPERFICIALI

Fausto Somma

*Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Fausto.somma@unina.it*

Alessandro Flora

*Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Flora@unina.it*

Sommario

La tecnica di disconnessione laterale consiste nel rimuovere il terreno disposto sui lati delle fondazioni superficiali caratterizzate da un notevole affondamento. In questo modo, l'unico contatto fondazione-terreno risulterà attraverso la base inferiore delle fondazioni. Il degrado del vincolo di incastro alla base, generato dalla disconnessione laterale, allunga il periodo fondamentale del sistema terreno-struttura. Questo, a seconda della pericolosità specifica di sito, può determinare una notevole riduzione delle azioni sismiche gravanti sulla struttura stessa. La memoria mostra i risultati preliminari di uno studio parametrico volto ad individuare i principali gruppi adimensionali che governano l'efficacia dell'intervento di disconnessione laterale nell'allungare il periodo fondamentale del sistema terreno-struttura.

1. Introduzione

L'isolamento sismico geotecnico è una idea affascinante che consiste nel trasporre nel terreno gli effetti dell'isolamento sismico tradizionale alla base di un edificio. Numerosi autori hanno cercato di trovare delle tecniche che potessero assolvere a tale compito. Yegian & Catan (2004), hanno dimostrato numericamente e sperimentalmente che l'inserimento di una superficie di scorrimento (i.e. un particolare geotessile), caratterizzata da un basso angolo di attrito e disposta immediatamente al di sotto delle fondazioni, sarebbe in grado di dissipare l'energia dei terremoti. Analogamente Kirtas *et al.* (2009) ha studiato numericamente l'effetto della creazione di barriere, da disporre nel terreno di fondazione, verticali e orizzontali, rigide o soffici, dimostrando che queste ultime riuscirebbero ad isolare sismicamente gli edifici di periodo basso. Brennan (2013) e Nappa (2016) hanno validato l'idea di isolare sismicamente un edificio inserendo barriere soffici nel terreno tramite svariate prove in centrifuga. Negli ultimi anni, sono state particolarmente studiate anche le miscele sabbia-gomma (*rubber-soil*), da disporre come terreno di fondazione di un edificio di nuova costruzione (Pitilakis, 2015). Queste ultime, a causa delle loro capacità smorzanti ed iper-elastiche riuscirebbero a ridurre le azioni sismiche che gravano sugli edifici al pari di un isolare classico in gomma.

Tutte le procedure delineate hanno come strategia comune l'incremento del periodo naturale di vibrazione e/o lo smorzamento del sistema terreno-struttura. Tuttavia le numerose incertezze e difficoltà legate alle procedure tecnologiche di installazione, nonché una certa diffidenza nell'operare solo ed esclusivamente attraverso la modifica del terreno di fondazione ha fatto sì che tali idee rimanessero solo ad un livello di ricerca scientifica.

Un modo tecnologicamente semplice ed intuitivo per allungare il periodo fondamentale del sistema terreno-struttura potrebbe essere la disconnessione laterale delle fondazioni superficiali dal terreno adiacente. Infatti, la creazione di un piccolo gap, lateralmente le fondazioni, modifica la rigidità orizzontale e rotazionale terreno-fondazione contribuendo quindi ad innalzare il periodo fondamentale del sistema terreno-struttura stesso. In taluni contesti di pericolosità sismica, e per fondazioni con un notevole affondamento (i.e. edifici in muratura), tale intervento può determinare una sensibile riduzione delle azioni sismiche e quindi un'ottima tecnica di miglioramento sismico a basso costo (Somma *et al.* 2021). I risultati di una prova in centrifuga (Somma *et al.* 2021) hanno potuto confermare la validità di

tale tecnica di miglioramento sismico. Utilizzando l'analisi dimensionale la memoria identifica, tramite analisi al FEM, i parametri che influenzano maggiormente l'allungamento di periodo prodotto dalla disconnessione laterale al fine di determinare in quali circostanze tale intervento può generare significativi benefici di carattere antisismico.

2. Analisi numeriche

Le analisi numeriche, volte all'individuazione del periodo naturale di vibrazione con interazione terreno-struttura, sono condotte utilizzando il software Plaxis 2D. La Figura 1 mostra genericamente il modello al FEM utilizzato dove è possibile notare che i due modelli strutturali, con e senza disconnessione laterale, sono stati studiati contemporaneamente all'interno di ogni analisi. Il modello strutturale utilizzato è un edificio ad un piano ed una campata avente fondazioni superficiali discontinue (i.e. *SDOF*). Il vuoto generato dalla tecnica di disconnessione laterale è sostenuto dalla presenza di 4 piccole paratie, modellate come elementi plate con rigidezza EI molto elevata, che hanno l'unico compito di sostenere il terreno. La distanza relativa tra le due strutture e tra le strutture e i bordi del modello, superiore a due volte la larghezza delle fondazioni, assicura che non ci siano interferenze. I pilastri e la trave delle strutture sono modellati come elementi plate. In particolare la trave è caratterizzata da un valore di EA ed EI molto elevato al fine di generare l'effetto di *Telaio alla Grinter* mentre il valore di EI dei pilastri è scelto, fissata la massa strutturale, in maniera da generare il periodo strutturale desiderato a base fissa. Il terreno è modellato come visco-elastico omogeneo.

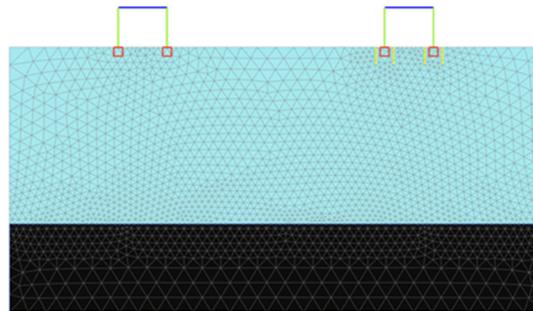


Fig 1. Esempio di modello numerico utilizzato per le analisi realizzate.

Essendo la profondità del bedrock uno dei parametri che influenza i coefficienti di rigidezza dinamica terreno-fondazione (Gazetas 1991), essa è stato modellato esplicitamente nel modello numerico. Non è presente la falda.

La procedura numerica utilizzata per conoscere allungamento di periodo generato dalla deformabilità del terreno sulle due strutture analizzate consta di più fasi:

1. In una fase statica, applicare una forza sul tetto delle due strutture.
2. In una fase dinamica, disattivare la forza statica, e leggere le oscillazioni libere generate.
3. Dalle oscillazioni libere, utilizzando la trasformata di Fourier, è possibile conoscere il periodo predominante della struttura e quindi conoscere l'allungamento di periodo rispetto al caso a base fissa $\frac{\overline{T}}{T_{fix}}$.
4. Infine è possibile valutare l'allungamento di periodo relativo tra i due sistemi, con e senza intervento, come: $\Delta = \frac{\overline{T}_{disc} - \overline{T}_{conn}}{\overline{T}_{conn}}$; tale valore può essere inteso come un'efficienza della tecnica suddetta.

Essendo le oscillazioni libere prodotte da una forza statica applicata all'interno della mesh, si è preferito utilizzare dei contorni viscosi perfettamente assorbenti (Lysmer e Kuhlemeyer, 1969). Essendo interessati solo all'allungamento di periodo prodotto dalla disconnessione laterale la struttura viene

modellata senza presenza di smorzamento interno. Per tale motivo, solo lo smorzamento radiativo sarà presente come meccanismo di dissipazione di energia.

Al fine di delineare i parametri adimensionali che maggiormente influenzano l'allungamento di periodo prodotto dalla disconnessione laterale è necessario, in prima istanza, individuare tutti le variabili indipendenti, q_i , che governano lo stesso, così come le loro dimensioni fisiche.

Tabella 1. Variabili fisiche che governano l'allungamento di periodo prodotto dalla deformabilità del terreno

Parametri		Descrizione della variabile
Variabile	Dimensione	
T_s	T	Periodo a base fissa della struttura
H_s	L	Altezza della prima forma modale per la struttura a base fissa
B	L	Larghezza della singola fondazione a striscia
W	L	Larghezza di base dell'edificio
D	L	Affondamento fondazioni
d	L	Contatto efficace fondazioni -terreno
m_s	ML ⁻¹	Massa partecipante della prima forma modale in cond. piane
ν_f	-	Coeff. Poisson fondazioni
p_t	ML ⁻³	Densità terreno
p_f	ML ⁻³	Densità fondazioni
ν_t	-	Coeff. Poisson terreno
V_t	LT ⁻¹	Velocità onde di taglio terreno
V_f	LT ⁻¹	Velocità onde di taglio fondazioni
H_b	L	Profondità del bedrock

Il periodo fondamentale della struttura, considerando l'interazione terreno-struttura (\tilde{T}), può quindi essere espresso in funzione delle variabili individuate. Il numero delle variabili individuato è 14, mentre il numero delle unità di misura indipendenti è 3. Per questo motivo sarebbe possibile individuare 14-3=11 gruppi adimensionali (Teorema di Buckingham). È possibile individuare i seguenti gruppi adimensionali, utilizzando come base dimensionale V_t, W, p_t . Si ricorda che tale scelta è arbitraria ed altre basi possono essere scelte per ottenere altri gruppi adimensionali significativi. L'allungamento di periodo, adimensionalizzato rispetto al periodo a base fissa, può, quindi, essere espresso in funzione dei seguenti parametri adimensionali:

$$\frac{\tilde{T}}{T_s} = f\left(\frac{T_s V_t}{W}, \frac{H_s}{W}, \frac{B}{W}, \frac{D}{W}, \frac{d}{W}, \frac{m_s}{p_t W^2}, \frac{p_f}{p_t}, \nu_f, \nu_t, \frac{V_f}{V_t}, \frac{H_b}{W}\right)$$

Manipolando tali gruppi adimensionali è possibile ottenere i seguenti gruppi adimensionali di più semplice comprensione:

$$\frac{\tilde{T}}{T_s} = f\left(\frac{H_s}{V_t T_s}, \frac{H_s}{W}, \frac{B}{W}, \frac{D}{B}, \frac{d}{D}, \frac{m_s}{p_t W H_s}, \frac{p_f}{p_t}, \nu_f, \nu_t, \frac{V_f}{V_t}, \frac{H_b}{B}\right)$$

$$\frac{\tilde{T}}{T_s} = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11})$$

È ovvio che un problema ingegneristico governato da 11 parametri adimensionali è ingestibile e per tale motivo alcuni di questi saranno trascurati nell'analisi di sensibilità. Per esempio è possibile trascurare le piccole variazioni del modulo di Poisson del terreno (~ 0.25-0.3) e del c.l.s. della fondazione (~ 0.2), in quanto queste ultime non incidono significativamente sull'interazione terreno-struttura. Assumendo fondazione infinitamente rigide è possibile trascurare il parametro Π_{10} poiché molto superiore all'unità in ogni scenario possibile. È possibile trascurare il parametro Π_{11} in quanto a meno di casi particolari di bedrock affiorante tale rapporto risulta sempre superiore a 10 così come è possibile trascurare le variazioni del parametro Π_7 poiché difficilmente esso assume valori che si discostano notevolmente dall'unità. È inoltre possibile notare che alcuni di questi parametri (i.e. Π_1 , Π_6) coincidono con quelli trovati da Veletsos (1974) e Bielak (1975) e prendono il nome, rispettivamente, di rigidezza relativa struttura-terreno e rapporto di masse relative struttura-terreno.

2.1 Esempio illustrativo e dimostrazione della similitudine fisica

Individuati i parametri adimensionali significativi è possibile realizzare delle analisi numeriche parametricamente simili al fine di dimostrare la bontà dei gruppi adimensionali trovati. In particolare, è stato fissato il seguente vettore di parametri adimensionali:

$$\pi = (0.15, 0.85, 0.15, 1, 1, 0.24, 1.10, 0.2, 0.25, 20, 20)$$

Sono quindi stati realizzati 8 modelli numerici diversi ma aventi gli stessi parametri adimensionali (Tabella 2).

Tabella 2. Modelli numerici realizzati aventi parametri adimensionali identici ma dimensioni fisiche diverse.

Parametri		Modelli numerici realizzati							
Variabile	Unità	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
T_b	[s]	0.3	0.5	0.8	0.8	0.3	0.5	0.3	0.8
H_s	[m]	5.5	5.5	5.5	11	8.25	13.75	13.75	13.75
B	[m]	1	1	1	2	1.5	2.5	2.5	2.5
W	[m]	6.5	6.5	6.5	13	9.75	16.25	16.25	16.25
D	[m]	1	1	1	2	1.5	2.5	2.5	2.5
d	[m]	1	1	1	2	1.5	2.5	2.5	2.5
m_s	[kg]	16819	33639	61671	123343	25229	84097	42048	154179
ν_f	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
p_i	[kg/m ³]	1911	3822	7008	3504	1274	1529	764	2803
p_f	[kg/m ³]	2102	4204	7708	3854	1401	1681	840	3083
ν_i	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
V_i	[m/s]	122	73	44	91	183	183	305	114
V_f	[m/s]	2444	1466	916	1401	3666	3666	6111	2291
H_b	[m]	20	20	20	40	30	50	50	50

Essendo interessati alla variazione di periodo tra la struttura disconnessa e connessa con il terreno (efficienza della disconnessione laterale), la Tabella 3 riporta per ogni analisi tale valore. Essendo le variazioni di periodo tra struttura disconnessa e connessa praticamente identiche in tutte le analisi (e quindi anche le variazioni di periodo rispetto al caso a base fissa) è possibile affermare che i parametri adimensionali selezionati controllano il processo fisico analizzato. È importante sottolineare che le piccole discrepanze possono essere dovute ad aspetti di natura numerica quali la rigidezza assiale delle colonne che non è stata inserita nello spazio dei parametri adimensionali.

Tabella 3. Valori del periodo fondamentale del sistema terreno-struttura con indicazione dell'efficienza della disconnessione laterale

Analisi numerica [-]	\tilde{T}_{disc} [s]	\tilde{T}_{conn} [s]	$\Delta = \frac{\tilde{T}_{disc} - \tilde{T}_{conn}}{\tilde{T}_{conn}}$ [-]
I	0.54	0.39	0.38
II	0.9	0.65	0.38
III	1.44	1.04	0.38
IV	1.32	0.96	0.38
V	0.52	0.38	0.37
VI	0.87	0.64	0.36
VII	0.52	0.38	0.37
VIII	1.39	1.02	0.36

2.2 Analisi di sensibilità

Il precedente paragrafo ha dimostrato che le variazioni di periodo tra le due strutture, con e senza intervento di disconnessione laterale, sono le stesse finché i parametri adimensionali sono costanti. A questo punto è possibile operare variando singolarmente ogni parametro adimensionale, e lasciando fisso il valore degli altri al fine di individuare i parametri adimensionali più significativi (Figura 2). In particolare i grafici riportano le variazioni di periodo tra struttura connessa e disconnessa per due tipi di interventi di disconnessione laterale diversi. Il caso “ambi lato” è quello mostrato in Figura 1 dove la disconnessione avviene su entrambe i lati delle fondazioni (e quindi internamente ed esternamente la struttura stessa). Nel caso “solo esterna”, invece, la disconnessione è stata generata solo sul lato esterno della struttura lasciando inalterato il terreno compreso tra le due fondazioni adiacenti.

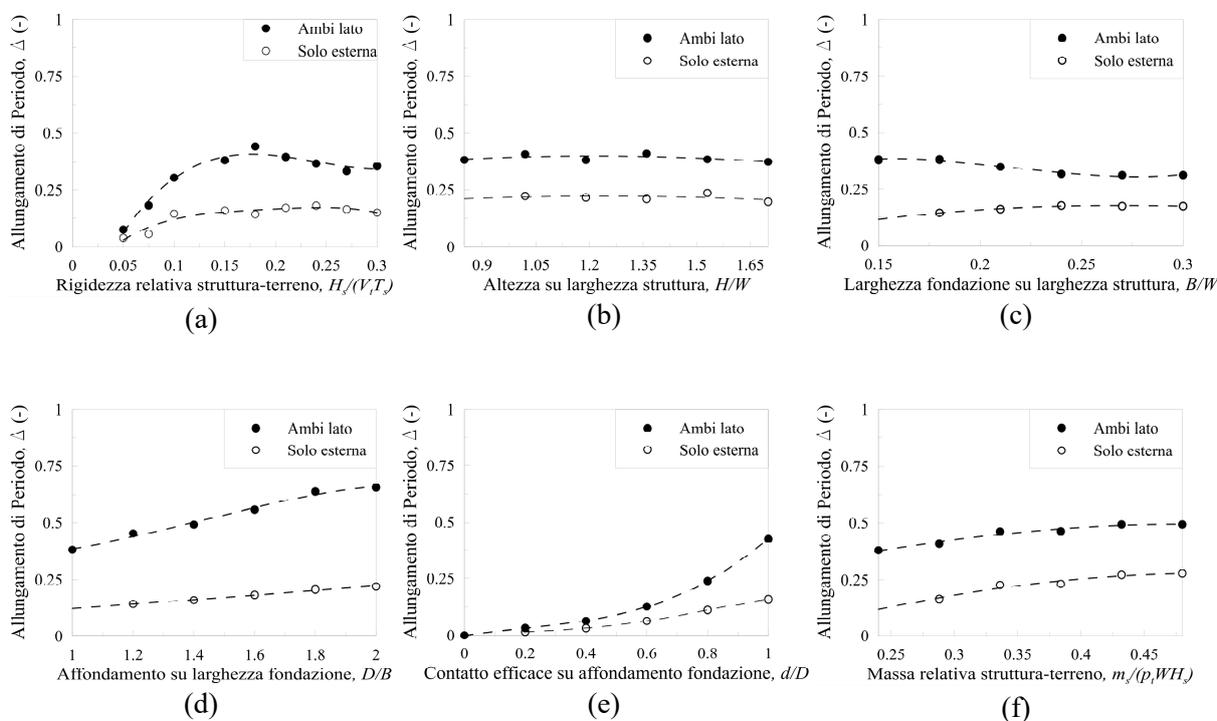


Fig 2. Analisi di sensibilità ottenuta variando i parametri adimensionali dal 20% al 100% del loro valore di riferimento.

I grafici mostrano che la disconnessione generata solo sul lato esterno della struttura, sebbene sia di più

facile applicazione tecnologica, risulta essere meno efficace di quella su ambo i lati delle fondazioni. Per tutti i parametri adimensionali, è possibile affermare che l'efficienza si dimezza qualora si decidesse di operare solo sul lato esterno delle fondazioni.

Le analisi condotte mostrano, inoltre, che alcuni parametri adimensionali sembrano influire in maniera relativamente ridotta sulle variazioni di periodo tra la struttura connessa e disconnessa. In particolare per i parametri Π_2, Π_3 il trend di variazione di periodo sembra quasi essere indipendente dalla variazione del parametro adimensionale considerato (i.e. tangente orizzontale). Per quanto riguarda il parametro Π_6 , e cioè il rapporto tra la massa della struttura e la massa di terreno partecipante coinvolta, si può osservare un leggero aumento delle variazioni di periodo al crescere dello stesso. Questo potrebbe indicare una maggiore efficienza della tecnica per strutture particolarmente massive.

Nel range ingegneristicamente significativo di 0.05-0.2 (NIST, 2012), la modifica della rigidità relativa struttura-terreno (Figura 1a) sembra influenzare notevolmente l'allungamento di periodo tra le due strutture specie. In particolare, quanto più la struttura risulta essere rigida rispetto al terreno, tanto più la disconnessione sarà efficace. Questo è un risultato interessante poiché ci permette di escludere l'applicabilità di tale intervento in contesti dove il terreno di fondazione risulta essere particolarmente rigido rispetto la struttura. Questo accade poiché l'elevata rigidità al di sotto delle fondazioni inibisce le rotazioni globali della struttura in maniera più significativa di quanto faccia il terreno laterali e per questo motivo le due strutture tendono ad avere circa lo stesso periodo con e senza intervento. La disconnessione laterale, quindi, potrebbe dare maggiori benefici, in termini di allungamento di periodo, per strutture rigide su terreni deformabili.

Come era ovvio immaginare, un ulteriore parametro adimensionale significativo è il rapporto D/B delle fondazioni. È chiaro che questo parametro rappresenta il nocciolo della comprensione della disconnessione laterale. Valori molto elevati di tale rapporto indicano fondazioni con un notevole affondamento per il quale la rimozione del terreno adiacente può incidere significativamente. Per valori inferiori all'unità gli allungamenti di periodo relativo si riducono notevolmente e la tecnica di disconnessione laterale perde di efficacia nonché di senso.

Particolarmente importante è anche il contatto efficace laterale del terreno rispetto all'affondamento totale della fondazione. Infatti se per la struttura connessa il contatto efficace tra la fondazione ed il terreno risulta essere particolarmente basso le variazioni di periodo relativo si affievoliscono fino ad arrivare al punto limite di contatto efficace nullo e variazioni di periodo inesistenti. In generale, il contatto efficace rispetto all'affondamento non è mai pari all'unità (perfetto contatto) ma tende a ridursi del 10-20% (Gazetas, 1991).

Conclusioni

La memoria ha mostrato sinteticamente i risultati di uno studio parametrico condotto utilizzando gruppi adimensionali significativi. La finalità dello studio parametrico era di comprendere l'importanza di alcuni gruppi adimensionali sull'efficacia della tecnica di disconnessione laterale. L'incremento della rigidità relativa struttura-terreno, così come, in maniera meno rilevante, il rapporto di masse relativa struttura-terreno influenza positivamente l'efficacia della tecnica di disconnessione laterale. Il rapporto D/B gioca un ruolo fondamentale nell'efficacia di tale tecnica. Specie per edifici esistenti in muratura, per cui le tradizionali tecniche di costruzione delle fondazioni prevedevano di ispessire le murature portanti e di affondarle per svariati metri nel terreno (i.e vedasi edifici storici nel centro urbano Romano), tale rapporto può essere sensibilmente alto e la disconnessione laterale può rappresentare una economica ed alternativa tecnica di miglioramento sismico. Inoltre l'intervento, non modificando in nessun modo la struttura, non modificherebbe l'integrità e la rilevanza storica degli edifici in muratura.

Bibliografia

- Bielak J., (1975). "Dynamic behaviour of structures with embedded foundations". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(3), 259–274.
- Brennan A.J., Klar A., Madabhushi S.P.G. (2013). "Mitigation of seismic accelerations by soft caissons". *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 4, 1-17
- Gazetas, G. (1991). "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations". *J Geotech Eng, ASCE*. 117(9), 1363–81.
- Kirtas, E., Rovithis, E., Pitilakis, K. (2009). "Subsoil interventions effect on structural seismic response. Part I: validation of numerical simulations". *J Signal Eng*, 13(2), 155–169.
- Lysmer J., Kuhlemeyer R.L (1969). Finite Dynamic Model for Infinite Media. Reprint (University of California). Department of Civil Engineering, University of California, Institute of Transportation and Traffic Engineering, Soil Mechanics Laboratory, 1969.
- Nappa, V., Bilotta, E., Flora, A., Madabhushi, G. (2016). "Centrifuge modelling of the seismic performance of soft buried barriers". *Bull Earthq Eng*, 14, 2881–2901.
- NIST. (2012). Soil-structure interaction for building structures. National Institute of Standards and Technology Report No. NIST GCR 12-917-21. Gaithersburg, MD.
- Pitilakis K., Karapetrou S., Tsagdi K. (2015). "Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber–sand mixtures". *Soil Dynam Earthq Eng*. 79, 237–52.
- Somma F., Bilotta E., Flora A., Viggiani G.M. (2021). "Centrifuge modelling of shallow foundations lateral disconnection to reduce seismic vulnerability". Manuscript submitted to *ASCE* for publication, 2021.
- Somma F., Flora A., Bilotta E. Viggiani G.M. (2021). Numerical analysis on shallow foundations lateral disconnection. 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Athens, Greece, 27–30 June 2021.
- Veletsos A., Meek J. (1974). "Dynamic behaviour of building-foundation systems". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(2), 121–138.
- Yegian M.K., Catan M. (2004). "Soil isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner", *J Geotech Geoenviron Eng*, 130, 1131–1139.