

Problemi di interazione terreno struttura applicati ad edifici residenziali isolati alla base

Davide Forcellini

L'**isolamento alla base (BI)** è una tecnica ben nota con molte applicazioni in tutto il mondo. Questo studio mira a considerare le simulazioni numeriche 3D di un sistema di interazione terreno-struttura applicato ad un edificio ordinario isolato alla base. In particolare, il terreno è stato eseguito con materiali isteretici non lineari e modelli avanzati di plasticità, implementati in Opensees. L'approccio proposto consente di accoppiare la valutazione della tecnica di isolamento con valutazione della risposta non lineare del terreno. A questo proposito, il lavoro si propone di valutare i casi in cui BI diventa dannoso. In particolare, il modello della struttura permette di valutare le prestazioni strutturali, considerando le accelerazioni e spostamenti a varie altezze. Questo studio supera le semplificazioni comuni nella modellazione dei terreni di fondazione. A questo proposito, può essere considerato un tentativo di proporre nuove considerazioni di progettazione per gli ingegneri e consulenti.

INTRODUZIONE

L'isolamento alla base (BI) è una delle soluzioni più convincenti al fine di proteggere le strutture dagli effetti distruttivi dei terremoti. Questa tecnica permette di separare la struttura dalla terra concentrando intenzionalmente la dissipazione di energia sismica in un unico elemento con rigidità orizzontale controllata tra la fondazione e la struttura. Molte ricerche sono stati realizzati su questo problema, ma alcuni contributi sono stati concentrati sugli effetti dell'interazione terreno struttura (SSI). Approfondite ricerche sono state condotte in questi ultimi 30 anni per quanto riguarda gli effetti dell'interazione terreno-struttura (SSI) sulla risposta sismica di strutture di ingegneria civile. Anche se molti codici suggeriscono di trascurare SSI [1], [2] ci sono alcune ricerche cui SSI è dimostrato di essere non conservativa per sicurezza e riduzione dei costi. In tali casi, è fondamentale tener conto della SSI nelle procedure di progettazione al fine di prevedere i suoi effetti in modo più dettagliato possibile [3], [4]. La maggior parte delle pubblicazioni della SSI semplicemente introducono molle, smorzatori e masse artificiali nell'interfaccia tra la struttura e il terreno. Questo approccio è generalmente accettato poiché la modellazione SSI è un problema considerevole per simulazioni numeriche. Tuttavia, potrebbe essere non sufficientemente dettagliata al fine di modellare la complessità del problema. In particolare, la risposta del sistema è collegata direttamente con le caratteristiche dinamiche reciproche (frequenze naturali) e quindi con la massa strutturale e rigidità, suolo taglio velocità e livello di profondità [5]. Per questo motivo, deformabilità del terreno e dissipazione di energia nel terreno [6], [8], [9] possono modificare fortemente gli effetti benefici della BI. Questo studio mira a superare tutte le semplificazioni precedente considerando un 3D simulazioni numeriche di un sistema di terreno-struttura applicato a un edificio shear type isolato alla base. In particolare, il terreno è stato eseguito con materiali isteretici non lineari e modelli di plasticità avanzate. L'approccio proposto consente di guidare la valutazione della tecnica BI con valutazione della risposta non lineare del terreno. A questo proposito, il lavoro carta si propone di valutare i casi in cui BI diventa dannoso. In particolare, lo studio mostra come considerare la struttura fissa alla base non sia conservativo e sottovaluti gli effetti dinamici.

CASO DI STUDIO

Il presente lavoro mira a riprodurre la risposta sismica di una struttura di cemento isolata alla base su diversi terreni deformabili. Il terreno è stato eseguito con materiali isteretici non lineari e modelli di plasticità avanzate. Questo approccio consente di riprodurre la risposta isteretica ed elasto-plastica a taglio del terreno (tra cui deformazioni permanenti), le impedenze della fondazione e lo smorzamento del terreno applicando l'interfaccia computazionale open source OpenSeesPL [10], implementata all'interno del codice di FE OpenSees [11]. In particolare, questa piattaforma è in grado di catturare gli effetti di amplificazione e conseguente accumulo di deformazione nel terreno. Allo stesso tempo, il modello della struttura permette di valutare le prestazioni strutturali, considerando le accelerazioni e spostamenti a varie altezze. OpenSeesPL consiste in un software agli elementi finiti capace di studiare la risposta del suolo saturo come materiale bifase seguendo la formulazione u-p (dove u è lo spostamento dello scheletro del suolo e p è la pressione interstiziale). Questa interfaccia, è stata originariamente calibrata per l'analisi di pali di fondazione. Qui è stato modificato al fine di considerare la presenza di struttura del sistema – Fondazione. Basato su studi precedenti [12] [13], il terreno è stato considerato un materiale coesivo omogeneo attraverso uno strato con una profondità di 20 m, che consiste in una mesh 3D di FE (68,4 x 74,4 m x 20,5 m) composto da 2992 brickUP lineare isoparametriche 8-nodi elementi con 4025 nodi. In orizzontale la mesh è stata discretizzata in sei strati, dal centro verso l'esterno, mentre verticalmente in quattro strati di spessore 0,5 m per il primo e 6,7 m per gli altri. I limiti di base del modello sono stati fissati a 20,5 m di profondità dalla superficie del terreno (Figura 1). OpenSees è in grado di simulare la propagazione di onde reali attraverso l'utilizzo dei periodic boudaries [14], assunto cioè condizioni di simmetria nel dominio di terreno. In particolare, i gradi di libertà dei nodi del limite destro e sinistro sono stati legati insieme sia longitudinalmente e verticalmente usando il penalty method. A questo proposito, i limiti di base e laterali sono stati modellati per essere impermeabili, tale da rappresentare una piccola parte di un dominio di suolo presumibilmente infinito (o almeno molto grande) consentendo l'energia sismica di essere rimossa dal sito stesso. I confini si trovano più lontano possibile dalla struttura per ridurre qualsiasi effetto sulla risposta. Per maggiori dettagli, vedi [6] e [12]. Le connessioni tra la struttura ed il terreno sono costruite con elementi specifici, chiamati "equaldof", che sono in grado di imporre gli stessi spostamenti tra la struttura e il suolo. Il comportamento meccanico del terreno è stato modellato con un materiale implementato all'interno del codice denominato PressureIndependentMultiyield. Esso è costituito da un materiale non lineare isteretico, utilizzando un approccio multi-superficie cinematica plasticità alla Von Mises insieme a una regola di flusso associato [16] e permette di controllare l'accumulo delle tensioni di taglio ciclico, [17]. La curva di sollecitazione-deformazione non lineare è rappresentata da un rapporto iperbolico, che è definito dal modulo di taglio e le costanti di rigidezza a taglio. Per maggiori dettagli, vedere [17] e [18]. Questa formulazione costitutiva è in grado di catturare la risposta sia monotona sia isteretica elasto-plastica dei terreni il cui comportamento a taglio è insensibile alla tensione di confinamento. Secondo questa formulazione, la plasticità è esibita solo nella componente deviatorica di sforzo-deformazione, mentre la risposta volumetrica è elastica lineare. Lo studio consiste nella riproduzione di un edificio a quattro piani (piano altezza: 3,4 m, altezza totale: 13,6 m) in cemento armato, scelto in rappresentanza di edifici reali (Figura 1). Ogni colonna è stata discretizzata in sedici elementi elasticBeamColumn. Altezza totale dell'edificio è 14,1 m. I primi 0,5 m erano considerati parte della fondazione e collegati al suolo come spiegato di seguito. Lo studio può essere suddiviso in due passaggi. Primo (paragrafi 3-5), sono state effettuate delle analisi agli autovalori per valutare gli effetti reciproci di deformabilità struttura isolata e terreno sulle caratteristiche dinamiche del sistema (suolo e struttura). Il secondo passo (paragrafo 6) consiste nell'esecuzione di analisi dinamiche al fine di studiare il comportamento

strutturale. La mesh è stata calibrata su un precedente studio [6]. Per tutte le analisi si è utilizzato il metodo di integrazione di Newmark con $\gamma = 0,6$ e $\beta = 0,3$. Lo smorzamento viscoso è stato considerato un 2% sulle frequenze 1 e 6 Hz.

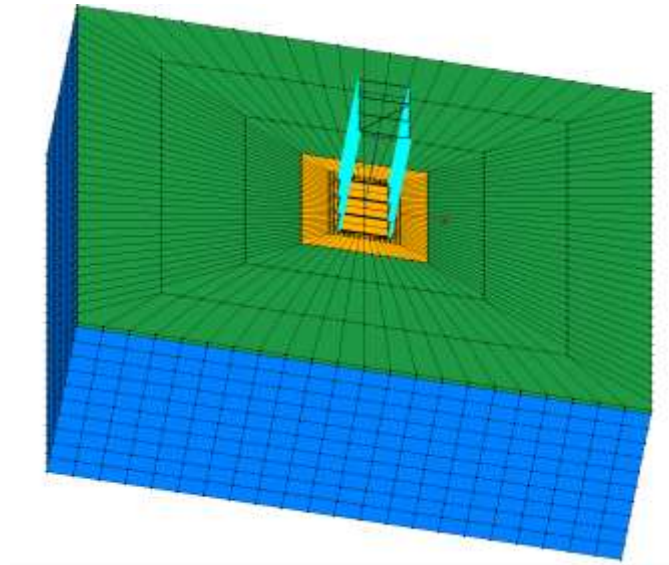


Figura 1 – Mesh 3D adottata nello studio.

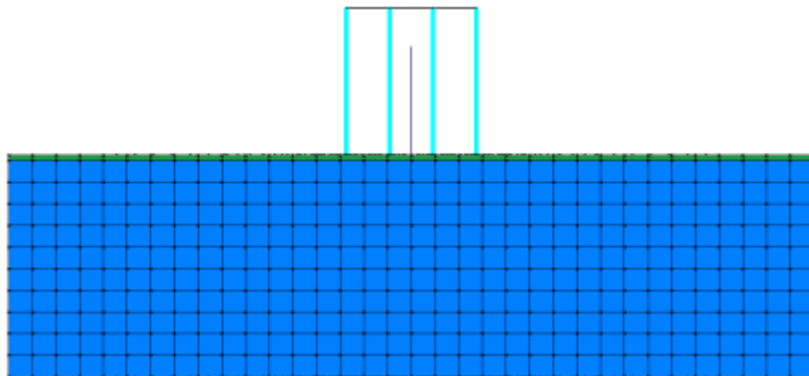


Figura 2 – Mesh adottata nello studio – Vista verticale.

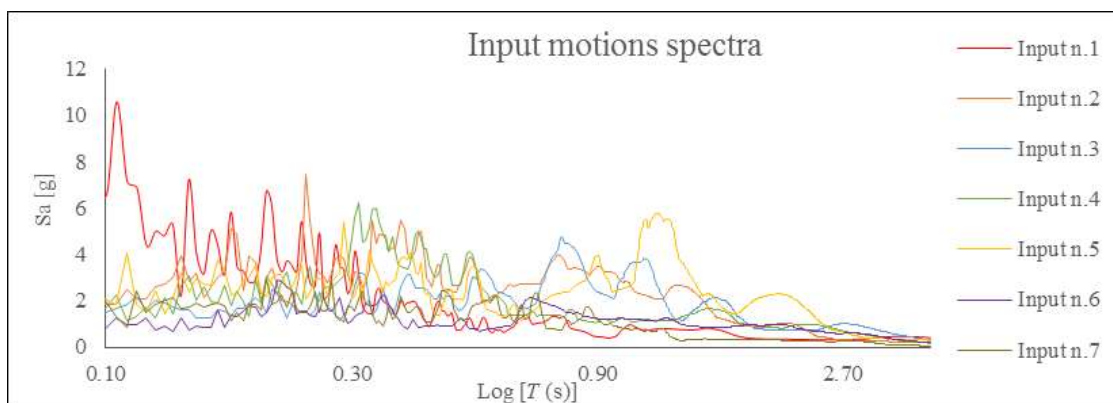


Figura 3 – *Input motions considerati*

INPUT MOTION	STAZIONE	PGA [g]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Duration [s]
n.1 Landers (1992)	Lucerne Valley	0.72	147.45	265.14	25.00
n.2 Northridge (1994)	Rinaldi Receiving	0.89	185.08	60.07	12.50
n.3 Northridge (1994)	Sylmar Converter	0.70	135.82	58.20	17.50
n.4 Northridge (1994)	Sylmar Hospital	0.87	139.54	50.37	15.00
n.5 Hyogo-Ken (1995)	Takatori	0.47	155.44	44.95	20.00
n.6 Erzincan (1992)	Erzincan	0.44	125.80	53.30	12.50
n.7 El Centro (1940)	Caltech IIA001	0.35	38.47	82.44	17.50

Tabella 1 – *Input motions considerati (caratteristiche)*

ISOLAMENTO ALLA BASE

Questo paragrafo descrive in dettaglio l'implementazione dell'isolamento alla base, senza prendere in considerazione gli effetti della deformabilità del terreno. Il terreno rigido (velocità di taglio pari a 1600 m/s, suolo A) è stato utilizzato per riprodurre condizioni rigide, condizioni per le quali solitamente si progettano gli interventi di isolamento alla base. Nello studio si è considerato l'isolatore in direzione longitudinale. Gli isolatori sono stati modellati molto rigidi nelle altre direzioni (verticale e trasversale). Il tipo di dispositivi di isolamento studiato consiste di parecchi cuscinetto di gomma piombo (LRB) denominato LRN (D700B750Z550) e selezionato da ALGA (tabella 6, [1]). Essi sono stati modellati applicando il cosiddetto elemento elastomericBearing, [24]. Questo elemento ha bisogno la calibrazione dei 3 parametri: la rigidità elastica iniziale (denominato K), la resistenza allo snervamento (denominato F_y) e il rapporto di rigidità post-

rendimento (alfa). In questo lavoro, si è considerate un modello di isolamento alla base lineare. (Fig. 7). Al fine di calibrare la tecnica di isolamento, un'analisi di autovalore è stata effettuata con tutti i terreni considerati.

	D [mm]	H [mm]	G [MPa]	Te [mm]	Smax [mm]	Keff [kN/mm]	Fy [kN]
BI-L	700	384	0.9	210	440	2.46	439

Tabella 2 – Caratteristiche isolatore considerato

ANALISI MODALI (SISTEMA NON ISOLATO)

In questo paragrafo, l'effetto del suolo con diverse deformabilità viene analizzato. In particolare, il terreno rigido (velocità di taglio pari a 1600 m/s, chiamato soil A) è stato utilizzato per riprodurre le condizioni di base rigide (SSI trascurata). Al fine di verificare questa ipotesi, gli input in termini di accelerazione alla base della mesh sono stati confrontati con le accelerazioni nella parte superiore degli strati, che si propaga alla base della struttura. Come mostrato in [6] e [13], questi output sono stati trovati identici. Quindi, si è variata la rigidezza del terreno per tener conto degli effetti di SSI. In particolare, i suoli sono stati scelti al fine di essere rappresentativi delle tipologie definite dall'Eurocodice (EC8, 3.1.2 tabella 3.1). Tabella 3 elenca le proprietà del terreno adottate nello studio. La configurazione originale (senza isolamento) è stata considerata. La figura 4 mostra le forme modali in caso di terreno A. La tabella 4 mostra l'allungamento del periodo a causa degli effetti della deformabilità del terreno

PARAMETERS	TERRENO A	TERRENO B	TERRENO C	TERRENO D
Densità [kN/m ³]	22.0	21.0	20.5	18.0
Modulo di Taglio [kPa]	$5.63 \cdot 10^7$	$6.12 \cdot 10^6$	$1.72 \cdot 10^5$	$4.05 \cdot 10^4$
Modulo di compressibilità [kPa]	$7.51 \cdot 10^7$	$1.33 \cdot 10^6$	$5.17 \cdot 10^5$	$1.89 \cdot 10^5$
Coefficiente di Poisson	0.20	0.30	0.35	0.40
Coazione [kPa]	10000	500	160	40
Shear wave velocity [m/s]	1600	540	290	150

Tabella 3 – Parametri dei terreni

MODELLO	T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]	T_4 [s]
Terreno A	0.672	0.229	0.148	0.121
Terreno B	0.700	0.232	0.152	0.121
Terreno C	0.721	0.280	0.235	0.149
Terreno D	0.808	0.358	0.235	0.166

Tabella 4 – Periodi naturali di vibrazione dovuti all'effetto di SSI

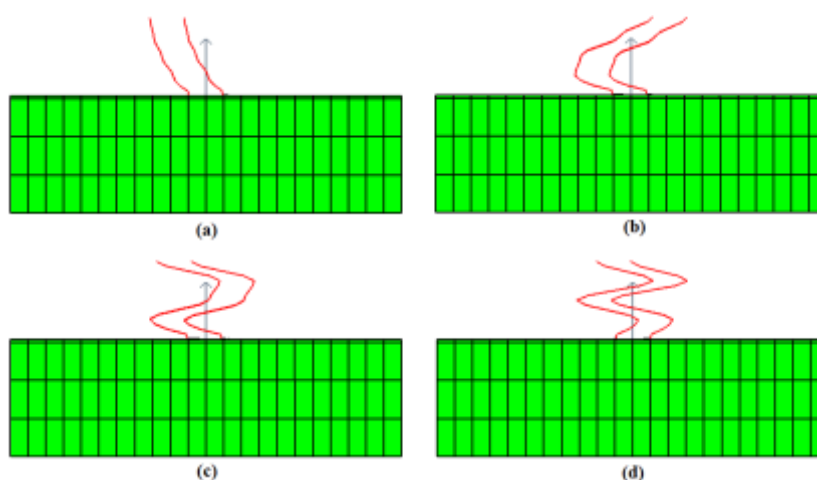


Figura 4 – Modi di vibrare (modelli non isolati, terreno rigido)

ANALISI MODALI (SISTEMA ISOLATO)

In questo paragrafo sono stati studiati gli effetti del suolo con diverse deformabilità e isolamento alla base allo stesso tempo. La struttura isolata è stata considerata in primo luogo fondata sul caso di suolo rigido (suolo A) e quindi su suoli B, C e D. La Figura 5 mostra i modi di vibrare in caso di terreno A. La tabella 5 mostra invece i periodi della struttura con diverse condizioni del terreno. Di può vedere che il periodo del sistema aumenta per tutte le condizioni di terreno a 3,35 s. I risultati mostrano che la deformabilità del terreno non pregiudica i periodi quando l'isolamento è applicato e quindi che l'isolamento svolge la sua funzione di disaccoppiamento della struttura dal terreno. Confrontando con i casi non isolati (Tabella 4), gli aumenti sono più significativi per terreno A che in caso di terreno D. Ciò dimostra che l'efficienza della tecnica di isolamento alla base aumenta con i terreni rigidi e che dipende in modo significativo dalla deformabilità del terreno, come mostrato in [6].

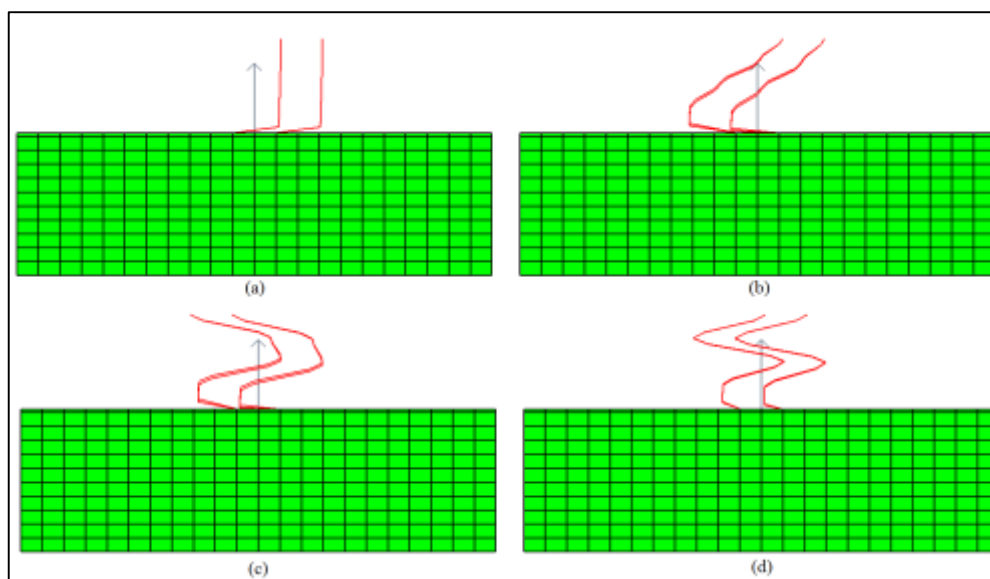


Figura 5 – Modi di vibrare (modelli isolati, terreno rigido)

MODELLO	$T_{1(iso)}$ [s]	$T_{2(iso)}$ [s]	$T_{3(iso)}$ [s]	$T_{4(iso)}$ [s]
Terreno A	3.349	0.297	0.158	0.122
Terreno B	3.352	0.297	0.158	0.122
Terreno C	3.356	0.297	0.158	0.122
Terreno D	3.370	0.297	0.167	0.158

Tabella 5 – Periodi Naturali di vibrazione

ANALISI DINAMICHE

In questo paragrafo, sono state effettuate analisi dinamiche. Sono stati selezionati sette input motions, come mostrato nella tabella 1 e figura 3, al fine di influenzare significativamente le caratteristiche dinamiche della struttura e applicati lungo l'asse x (longitudinale). I risultati ottenuti con l'input n.2 in termini di temi histories di accelerazioni e spostamenti sono mostrati nelle Figure 6 e 7 (al piano vari: $z = 13,6$ m, 10,2 m, 6,80 m e 3,40 m). Nella figura, il nome FIX-A indica i valori ottenuti con il modello a base fissa in corrispondenza del suolo A, mentre BI-A indica i risultati ottenuti per il modello BI. Grazie alla sua deformabilità, terreno D riduce gli effetti dei terremoti e, quindi, l'efficacia dell'isolamento diventa meno significativa (-53%). In termini di spostamenti, è possibile vedere che, a causa della presenza dell'isolamento, gli spostamenti sono concentrati alla base. Nei casi di base fissa, gli spostamenti sono concentrati a tutti i piani. La tabella 6 mostra il confronto

tra il fisso (FIX) e la struttura base di (BI) isolata per varie condizioni del terreno in termini di massime accelerazioni e spostamenti massimi. I rapporti (in termini di accelerazioni e spostamenti) tra queste due configurazioni è mostrato nelle ultime due colonne. La migliore riduzione in termini di accelerazioni è stata realizzata con suoli A (-88%), B (-88%) e C (-79%). L'aumento massimo in termini di spostamenti è stata ottenuta con terreno A (61%), quindi si osserva una diminuzione con terreno B (25%) e C (19%). Una diversa tendenza è visto quando il suolo D è stato eseguito (36%). La figura 8 mostra un confronto tra gli spettri ottenuti con il modello fisso e BI, considerando gli effetti di SSI. Tabella 8 riassume i risultati in termini di accelerazioni spettrali ottenuti con tutti gli input riportati nella tabella 5. In particolare, i risultati ottenuti con terreno A sono stati considerati come riferimento per confrontare quelli ottenuti con altri terreni. Colonna 4 della tabella 8 mostra il rapporto tra i valori massimi di pseudo-accelerazione tra struttura fissa e modello BI in corrispondenza con i terreni considerati. Le ultime due colonne nella tabella 8 (b), (c) e (d) mostrano il rapporto tra suolo A ed il terreno considerato, sia in caso di struttura fissa e BI rispettivamente.

MODEL	Max Acc (13.6 m) [g]		Max Disp (13.6 m) [mm]		FIX-ACC	FIX-DISP
	FIX	BI	FIX	BI	BI-ACC	BI-DISP
Soil A	1.96	0.24	357	575	-88.0%	+61.1%
Soil B	2.03	0.24	463	579	-88.0%	+25.1%
Soil C	1.17	0.24	712	844	-79.2%	+18.6%
Soil D	0.31	0.15	474	645	-53.4%	+36.1%

Tabella 6 – Confronto tra accelerazioni e spostamenti di modelli FIX e BI

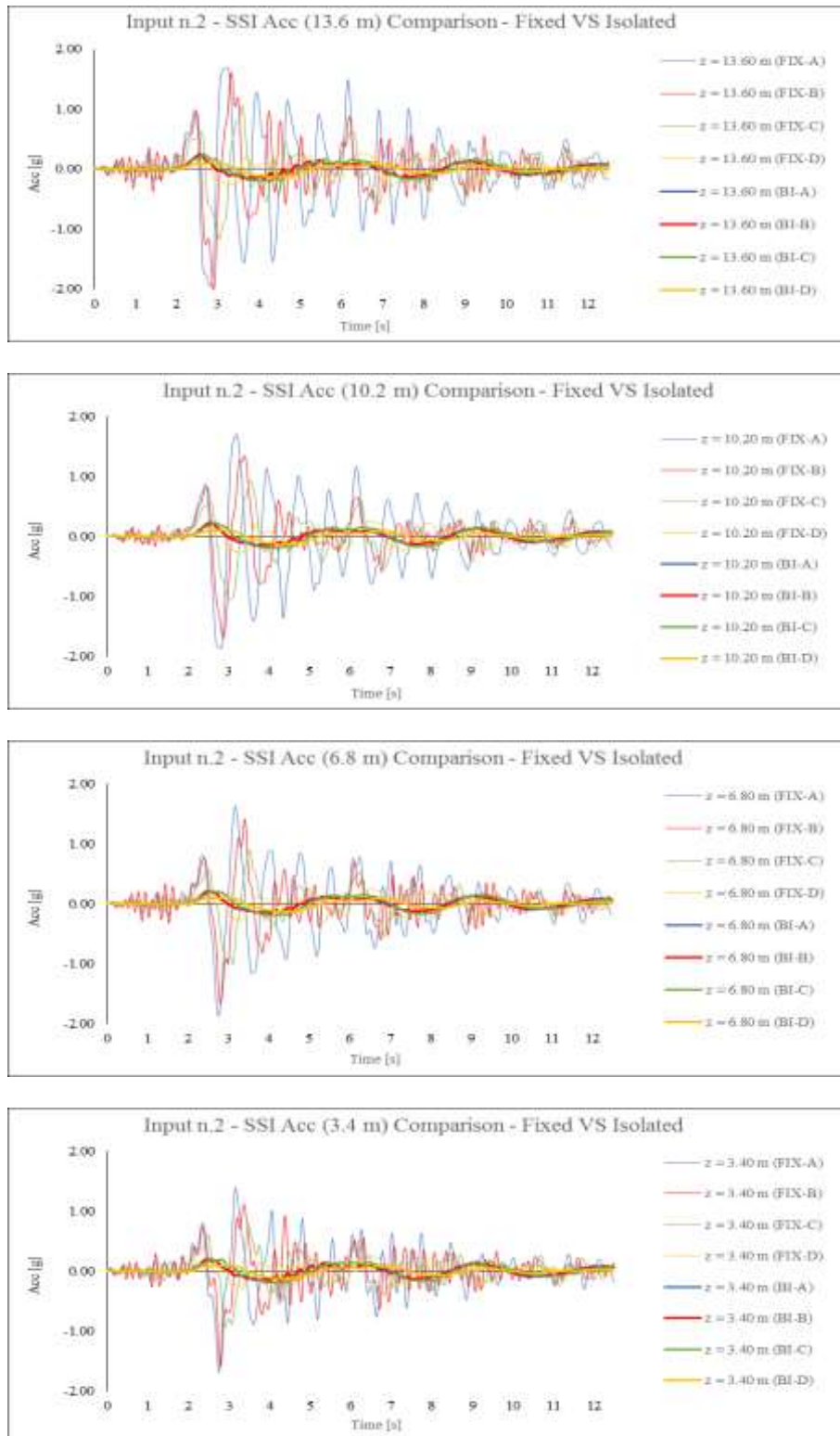


Figura 6 – Time histories accelerazioni a varie altezze (input 2)

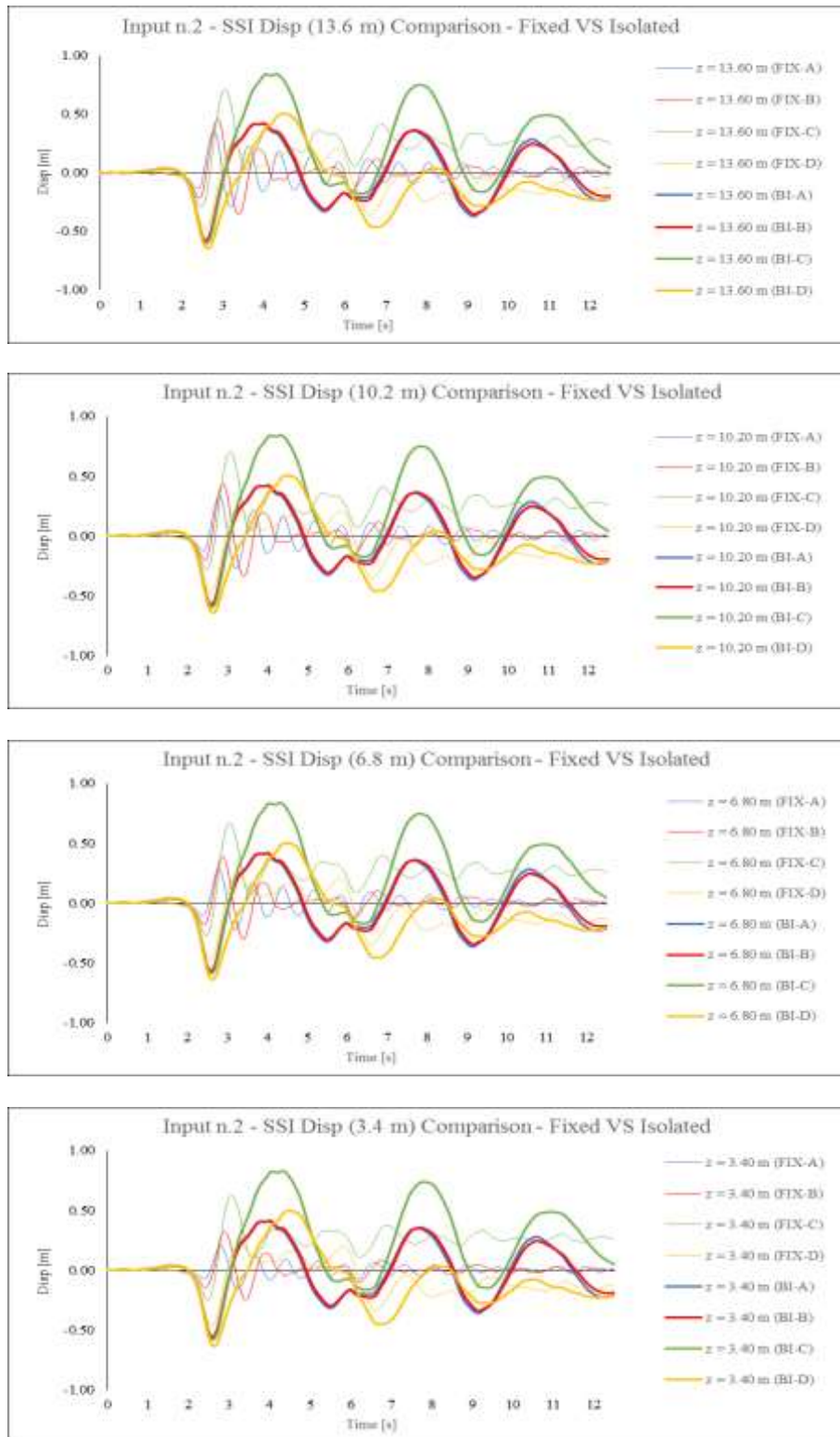


Figura 7 – Time histories spostamenti a varie altezze (input 2)

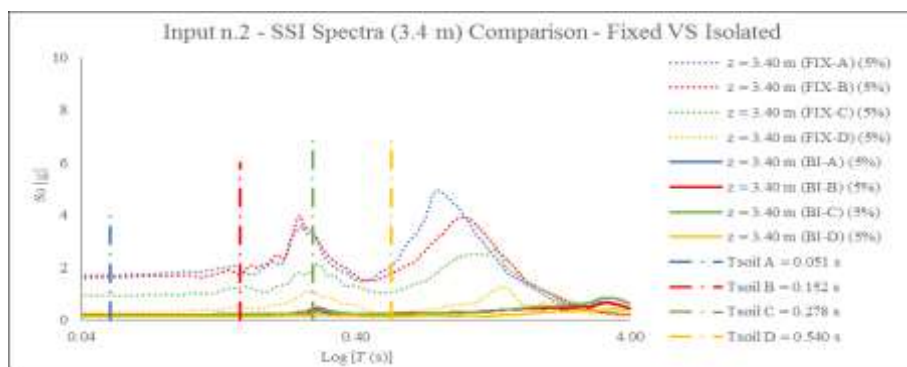
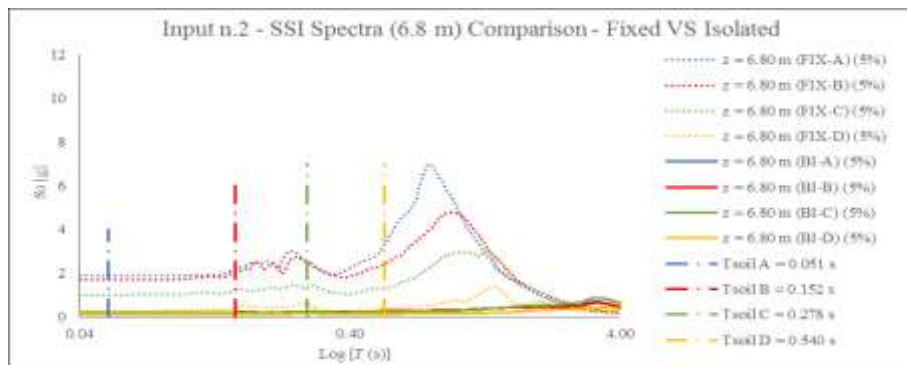
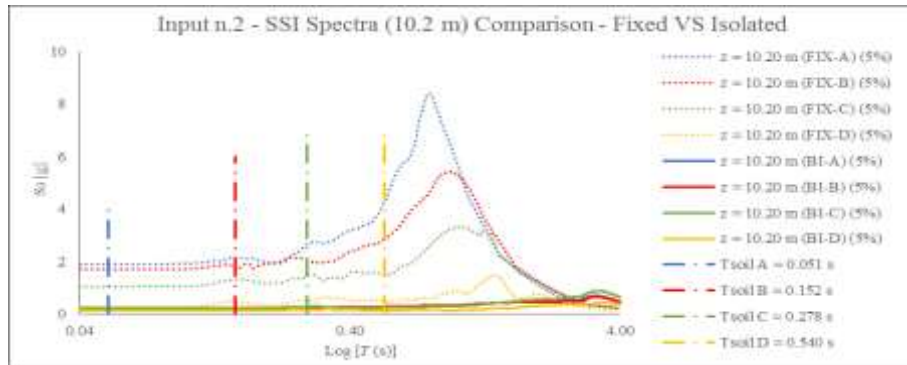
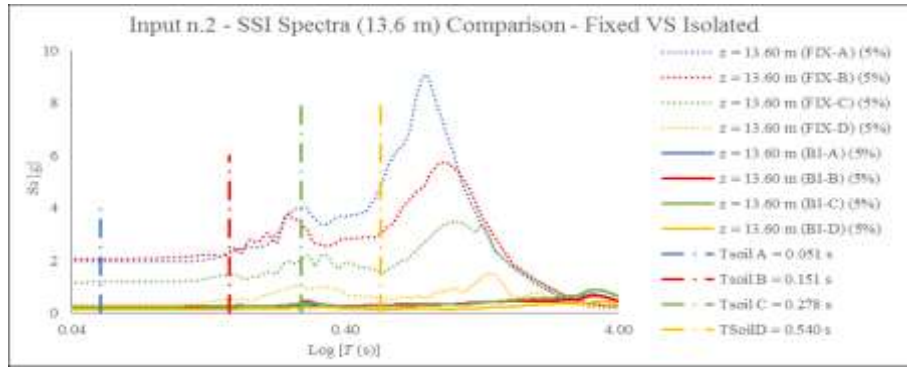


Figura 8 – Spettri di piano a varie altezze (input 2)

SOIL A	Max Sa (z = 13.6 m) [g]		FIX-A
	FIX-A	BI-A	BI-A
Input n.1	3.86	1.52	-60.6%
Input n.2	9.08	0.70	-92.2%
Input n.3	11.86	1.52	-87.2%
Input n.4	3.27	1.11	-66.1%
Input n.5	6.99	1.12	-84.0%
Input n.6	6.43	1.25	-80.6%
Input n.7	3.61	0.39	-89.2%

(a)

SOIL B	Max Sa (z = 13.6 m) [g]		FIX-B	FIX-A	BI-A
	FIX-B	BI-B	BI-B	FIX-B	BI-B
Input n.1	3.72	1.44	-61.3%	-3.6%	-5.3%
Input n.2	5.73	0.67	-88.4%	-36.8%	-5.2%
Input n.3	5.85	1.54	-73.7%	-50.7%	+1.3%
Input n.4	3.22	1.02	-68.3%	-1.5%	-8.1%
Input n.5	7.10	1.07	-84.9%	+1.6%	-4.5%
Input n.6	2.39	1.14	-52.3%	-62.8%	-8.8%
Input n.7	2.20	0.36	-83.6%	-39.1%	-7.7%

(b)

SOIL C	Max Sa (z = 13.6 m) [g]		FIX-C	FIX-A	BI-A
	FIX-C	BI-C	BI-C	FIX-C	BI-C
Input n.1	2.10	1.44	-31.4%	-45.6%	-5.3%
Input n.2	3.48	0.88	-74.6%	-61.7%	+25.3%
Input n.3	4.10	1.52	-62.9%	-65.4%	+0.0%
Input n.4	2.12	1.02	-51.9%	-35.2%	-8.1%
Input n.5	4.55	1.04	-77.1%	-34.9%	-2.8%
Input n.6	2.32	1.15	-50.4%	-63.9%	-8.0%
Input n.7	1.89	1.42	-24.9%	-47.6%	+264.1%

(c)

SOIL D	Max Sa (z = 13.6 m) [g]		FIX-D	FIX-A	BI-A
	FIX-D	BI-D	BI-D	FIX-D	BI-D
Input n.1	0.97	1.23	+26.8%	-74.9%	-19.1%
Input n.2	1.53	0.43	-72.0%	-83.2%	-39.4%
Input n.3	0.97	3.19	+228.9%	-91.8%	+109.9%
Input n.4	1.08	0.99	-8.3%	-67.0%	-10.8%
Input n.5	1.77	1.10	-37.9%	-74.7%	+5.8%
Input n.6	0.95	1.53	+61.1%	-85.2%	+22.4%
Input n.7	1.11	0.44	-60.4%	-69.3%	+12.8%

(d)

Tabella 7 – Confronto tra le pseudoaccelerazioni tra modelli FIX e BI per i terreni A-D.

CONCLUSIONI

Il lavoro illustra uno studio numerico volto a indagare tecnica BI come una soluzione per proteggere le strutture agli effetti dei terremoti. Lo studio presentato mira a superare le semplificazioni (modelli equivalenti-lineari) considerando il suolo con materiali isteretici non lineari e modelli di plasticità avanzate. Simulazioni numeriche 3D di un sistema terreno-struttura sono state applicate alle diverse condizioni del terreno. In particolare, il lavoro applica l'interfaccia computazionale open source OpenSeesPL, implementato all'interno del codice di FE OpenSees. Tale interfaccia permette di eseguire studi parametrici basati sul comportamento reciproco delle caratteristiche dinamiche del terreno e la struttura. Lo studio è stato diviso in due fasi. Il primo passo è consistito nel calcolare gli effetti dell'isolamento alla base sui periodi fondamentali della struttura. Il beneficio di BI è stato valutato in termini di variazione dei periodi fondamentali. Lo studio riproduce inoltre analisi dinamiche che consentono di stimare gli effetti reciproci del suolo e l'isolamento. Accelerazioni e spostamenti ai diversi livelli della struttura sono state considerati al fine di valutare gli effetti dell'isolamento del suolo sulle prestazioni del sistema. Sviluppi futuri riguarderanno del lavoro consisteranno nella riproduzione di sistemi strutturali (isolamento ed edificio) più complessi.

REFERENCES

- [1] ATC-3-06. Amended tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings. ATC Publication ATC 3-06, NBS Special Publication 510, NSF Publication 78-8, Applied Technology Council. US Government Printing Office: Washington, DC, 1978.
- [2] Building seismic safety council, NEHRP. Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings (and other structures). National earthquake hazards reduction programme: Washington, DC, 1985, 1988, 1991, 1994 (1997, 2000).
- [3] J. E. Luco, Linear soil-structure interaction: a review. Earthquake Ground Motion and Its Effects on structures, 1982.
- [4] S. Renzi, C. Madiati, G. Vannucchi, A simplified empirical method for assessing seismic soil-structure interaction effects on ordinary shear-type buildings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2013, 55: 100–107.
- [5] S. L. Kramer, Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, International Series in Civil engineering and engineering Mechanics, William J. Hall Editor, 1996.
- [6] D. Forcellini, Cost Assessment of isolation technique applied to a benchmark bridge with soil structure interaction, Bulletin of earthquake Engineering, DOI: 10.1007/s10518-016-9953-0, 2017.
- [7] A. Vlassis, C. Spyrakos, Seismically isolated bridge piers on shallow soil stratum with soil-structure interaction. Computer and Structure 79: 2847-2861, 2001.
- [8] N. Tongaonkar, R. Jandid, Seismic response of isolated bridges with soil-structure interaction. Soil dynamic and Earthquake Engineering 23(4):287-302, 2003.
- [9] A. Ucak, P. Tsopelas, A.M. ASCE, Effect of soil-structure interaction on seismic isolated bridges. Journal of Structural Engineering, 2008.

- [10] OpenSees PL (<http://soilquake.net/openseespl/>).
- [11] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves, Open System for Earthquake Engineering Simulation, User Command-Language Manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2009.
- [12] A. Elgamal, J. Lu, D. Forcellini, Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: three-dimensional numerical simulation, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135, 1672–1682, 2009
- [13] D. Forcellini, S. Gobbi, D. Mina, Numerical simulation of ordinary buildings with soil structure interaction, *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation – Zingoni (Ed.)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02927-9, 2016
- [14] H.K. Law, I.P. Lam, Application of periodic boundary for large pile group, *Journal of Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127-10, 889–892, 2001;
- [15] D. Forcellini, S. Gobbi, Soil structure interaction assessment with advanced numerical simulations, *Proceeding of Computational Method in Structural Dynamics and Earthquake Engineering conference (COMPDYN)*, Crete Island, 25 – 27 May 2015.
- [16] J. H. Prevost, A simple plasticity theory of frictional cohesionless soils. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 4(1): 9-17, 1985.
- [17] Z. Yang, A. Elgamal, E. Parra, Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation, *Journal of Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129, 1119-1127, 2003.
- [18] A. Elgamal, Z. Yang, E. Parra and A. Ragheb, Modelling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils. *International Journal of Plasticity* 9:6, 883-905, 2003.
- [19] Algasism HDRB and LRB. ALGA S.P.A., Milan.