

ANALISI NUMERICHE PER LA VALUTAZIONE DELL'ISOLAMENTO GEOTECNICO SISMICO MEDIANTE MISCELA GHIAIA-GOMMA

Glenda Abate

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Catania

glenda.abate@unict.it

Angela Fiamingo

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Catania

angela.fiamingo@phd.unict.it

Sommario

L'Isolamento Geotecnico Sismico (GSI) è una tecnologia innovativa finalizzata alla riduzione del rischio sismico di strutture ed infrastrutture. L'idea principale è quella di migliorare le caratteristiche del terreno di fondazione in modo che l'energia venga parzialmente dissipata prima di essere trasmessa alla struttura. Tra i materiali adottati per il miglioramento del terreno, le miscele ghiaia-gomma (*gravel-rubber mixture*, GRM) sono considerate particolarmente promettenti grazie alle loro ottime proprietà statiche e dinamiche.

La presente nota valuta numericamente l'efficacia di uno strato di miscela ghiaia-gomma posto idealmente al di sotto di un edificio in calcestruzzo armato ubicato nel comune di Fleri (Catania). Tale edificio è stato severamente danneggiato in seguito al terremoto del 26.12.2018 che ha colpito il versante orientale dell'Etna. Sono stati sviluppati due differenti modelli FEM, con e senza lo strato di GRM, valutandone il comportamento dinamico al variare dell'input sismico e stimando pertanto gli effetti dissipativi offerti dallo strato ghiaia-gomma.

1. Introduzione

L'Isolamento Geotecnico Sismico (GSI) è una tecnologia altamente innovativa, a basso costo ed ecosostenibile, finalizzata alla riduzione del rischio sismico di strutture ed infrastrutture. L'idea principale è quella di migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno all'interfaccia struttura-terreno, utilizzando, tra gli altri possibili materiali, strati di miscele di terreno a grana grossa e granulato di gomma ottenuto da pneumatici fuori uso (PFU). L'utilizzo di dette miscele ha il duplice scopo di: ridurre il rischio sismico in aree ad alta pericolosità sismica; riutilizzare materiali di rifiuto, intendendoli come risorse per innovative soluzioni al servizio dell'ingegneria civile. Già da qualche anno sono effettuate prove di laboratorio su miscele ghiaia-gomma e sabbia-gomma (GRM, *gravel-rubber mixture* e SRM, *sand-rubber mixture*), che hanno permesso di evidenziare le loro ottime proprietà statiche e dinamiche: basso peso specifico, elevata elasticità, basso modulo di taglio e alto smorzamento (Anastasiadis et al., 2012; Tasalotti et al., 2021a). Tuttavia, sono ancora disponibili pochi studi sperimentali e numerici sull'idoneità e i vantaggi di tali miscele come GSI (Tsang, 2009; Ptilakis et al., 2015; 2021; Tasalotti et al., 2021b; Abate et al., 2022).

Nella presente nota viene valutata mediante simulazioni numeriche l'efficacia dell'isolamento sismico offerto da uno strato di miscela ghiaia-gomma posto idealmente al di sotto di un edificio in calcestruzzo armato, sito a Fleri (Catania), gravemente danneggiato durante il terremoto del 26.12.2018. Lo strato di miscela ghiaia-gomma ipotizzato all'interfaccia terreno-fondazione è stato testato (e valutato efficace nello smorzare un segnale sismico) nel corso dell'attualmente unica campagna sperimentale a larga scala

condotta a Salonicco (Grecia) sulla struttura prototipo “EuroProteas”, nell’ambito del recente Progetto di Ricerca Europeo “SERA-SOFIA” (Pitilakis et al., 2021; Abate et al., 2022).

2. Descrizione del caso studio

2.1 Caratteristiche dell’edificio e del terreno di fondazione

L’edificio oggetto di studio ha una struttura intelaiata in c.a. che si sviluppa lungo tre elevazioni (Fig. 1.a), progettata secondo le Norme Tecniche del 1976 (D.M., 1976) per soli carichi verticali; è fondata su travi 50x70 cm, con profondità del piano di posa pari a 80 cm. La struttura esaminata ricalca quella di molti edifici esistenti appartenenti al patrimonio edilizio italiano. L’edificio, ubicato a Fleri (Catania), è stato gravemente danneggiato in seguito al terremoto del 26.12.2018, manifestando una rottura a taglio del pilastro compreso tra la seconda trave del vano scala e quella del secondo impalcato.

La caratterizzazione geotecnica del terreno di fondazione (Tabella 1) è stata effettuata grazie a indagini MASW eseguite in prossimità dell’edificio analizzato. Il terreno di fondazione è costituito da tre strati (Tabella 1): il primo (con spessore $h = 2.4$ m) è caratterizzato da vulcanoclastiti, il secondo ($h = 4.6$ m) ed il terzo ($h = 12$ m) da lave scoriaee. Il *bedrock* è stato individuato ad una profondità di 19 m rispetto al piano campagna. Il deposito di terreno analizzato appartiene alla classe di sottosuolo B, con un fattore di amplificazione S pari ad 1.16 ($S_s = 1.16$ ed $S_T = 1$ secondo le NTC, 2018). Per tener conto della non linearità del terreno, nelle analisi numeriche sono stati adottati i valori modificati di modulo di taglio G_s^* e rapporto di smorzamento D_s^* sulla base delle indicazioni fornite dall’EC8 parte 5 (EN 1998-5, 2004), ovvero con riferimento al valore di $a_g \cdot S$ atteso in superficie, pari a 0.26g.

2.2 Caratteristiche della miscela ghiaia-gomma ipotizzata alla base della struttura

La miscela ipotizzata per l’Isolamento Geotecnico Sismico contiene, in peso, il 70% di ghiaia e il 30% di gomma (GRM: 70-30). Si tratta di una delle tre miscele adottate durante la campagna sperimentale a larga scala condotta a Salonicco (Grecia) sulla struttura prototipo “EuroProteas” (Pitilakis et al., 2021; Abate et al., 2022), ovvero la miscela che effettivamente si è dimostrata efficace nello smorzare il segnale sismico. Per tale motivo gli autori hanno deciso di ipotizzare l’interposizione di tale miscela alla base dell’edificio scelto per le analisi. In particolare, si è scelto di ipotizzare uno spessore di GRM di 1.5 m, pari a $B/8$, con $B = 12$ m larghezza della fondazione dell’edificio (Tsang, 2009).

La densità della miscela è pari a 1.258 t/m³, mentre l’angolo di resistenza al taglio e il coefficiente di Poisson sono pari a 23.6° e 0.4. Le curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ che ne caratterizzano il comportamento dinamico (Fig. 1.b) sono state dedotte sulla base delle equazioni di Pistolas (Pistolas, 2015), per una pressione di confinamento $\sigma_0' = 99.70$ kPa (corrispondente allo spessore ipotizzato di 1.5 m).

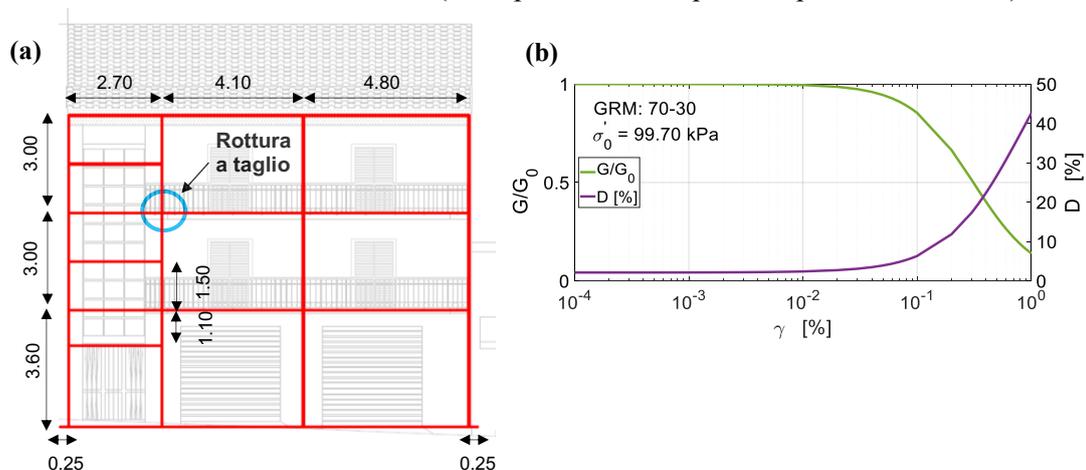


Fig. 1. (a) Telaio analizzato nella modellazione numerica (misure espresse in metri) (da Fiamingo et al., 2022); (b) Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ della miscela GRM ipotizzata alla base della struttura.

Tab. 1. Principali parametri geotecnici del terreno di fondazione

Parametri		Strato			
		1	2	3	Bedrock
Peso dell'unità di volume	γ_s [kN/m ³]	18	18	18	22
Angolo d'attrito	φ' [°]	33	33	33	40
Coesione	c	0	0	0	0
Coefficiente di Poisson	ν_s	0.3	0.3	0.3	0.45
Modulo di taglio iniziale	G_{s0} [kPa]	78625	184320	380880	1998060
Modulo di taglio modificato	G_s^* [kPa]	32875	77068	380880	1998060
Rapporto di smorzamento iniziale	D_{s0}	0.02	0.02	0.02	0.01
Rapporto di smorzamento modificato	D_s^*	0.085	0.085	0.085	0.01

(* Modulo di taglio e rapporto di smorzamento modificati secondo EC8 parte 5 (EN 1998-5, 2004)

2.3 Selezione degli accelerogrammi per le analisi numeriche

Le elaborazioni numeriche FEM sono state realizzate utilizzando nove accelerogrammi. Sette accelerogrammi sono spettro-compatibili (ID 4675, ID 0651, ID 7187, ID 0198xa, ID 7156, ID 0198ya, ID 0287): la selezione è stata effettuata tramite Rexel 3.5 (Iervolino et al., 2009), seguendo le indicazioni delle attuali norme tecniche (NTC, 2018). I sette accelerogrammi sono compatibili con lo spettro di risposta *target* (con riferimento a: Categoria di sottosuolo A, Categoria topografica T1, Vita nominale 50 anni, Classe d'uso II e Stato Limite di interesse SLV, secondo le NTC, 2018) e con la disaggregazione della pericolosità sismica (Stucchi et al., 2011) in termini di magnitudo M e distanza epicentrale R , riferiti ad uno specifico intervallo ($M = 4.0-7.0$, $R = 0-30$ km). Ciascuno dei sette accelerogrammi è stato scalato linearmente per ottenere uno spettro medio con una tolleranza inferiore del 10% ed una tolleranza superiore del 30%, nell'intervallo di periodi 0.15-2 s, rispetto allo spettro di riferimento. Infine, sono stati adoperati due accelerogrammi registrati (ID SVN, ID EVRN), rispettivamente, dalle stazioni SVN ed EVRN, in occasione del terremoto del 26.12.2018. La Fig. 2 mostra gli spettri dei nove accelerogrammi adottati nelle analisi numeriche.

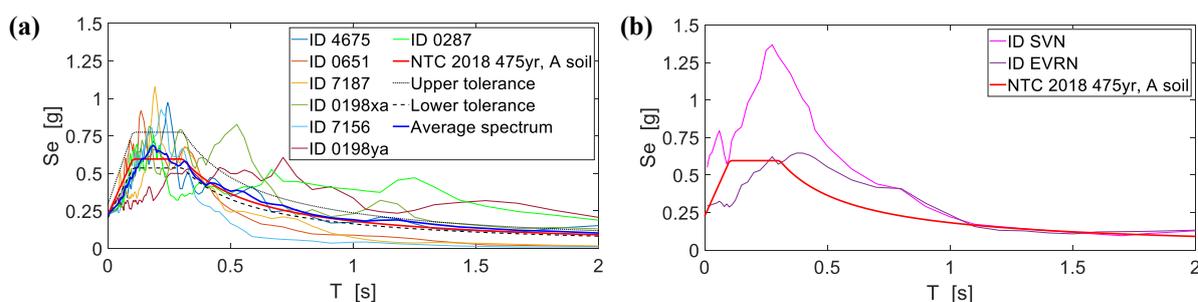


Fig. 2. (a) Spettri di risposta elastici dei sette accelerogrammi spettro-compatibili, fattore di scala medio 1.16; (b) Spettri di risposta elastici dei due accelerogrammi registrati (ID SVN ed ID EVRN).

3. Modellazione numerica

Sono stati sviluppati due modelli FEM 2D, denominati Modello 1 e Modello 2: il primo modello simula il sistema terreno-struttura di riferimento (Fig. 3.a); il secondo modello ipotizza l'interposizione di uno strato di miscela terreno-gomma al piano di posa delle fondazioni (Fig. 3.b). In entrambi i modelli è stato ipotizzato un comportamento visco-elastico equivalente per il terreno e un comportamento anelastico dissipativo per la struttura. Inoltre, sono entrambi caratterizzati da una profondità (direzione z) di 19 m (profondità del *bedrock*) e da una larghezza totale di 100 m (direzione y), al fine di ridurre al minimo gli effetti di bordo. Gli elementi strutturali sono di tipo *beam*; più precisamente, sono stati considerati dei tratti elastici con cerniere plastiche di lunghezza finita alle estremità, alle quali sono state

assegnate diverse curve momento-curvatura. Per il terreno, e per la miscela nel Modello 2, sono stati utilizzati elementi 2D-solid a 4 nodi; la deformabilità del substrato roccioso è stata adeguatamente considerata utilizzando *dashpot* alla base del modello. Sono state opportunamente fissate le condizioni al contorno: ai nodi lungo i confini laterali, alle medesime profondità, è stata imposta la stessa traslazione nelle direzioni y e z , mentre alla base dei *dashpot* è stata impedita la sola traslazione lungo la direzione z . Inoltre, per riprodurre la condizione di piano rigido, ai nodi delle travi è stata imposta la medesima traslazione lungo la direzione y . È stata definita un'interfaccia tra la fondazione e il terreno considerando un angolo di attrito pari a $2/3 \varphi'$. La dimensione degli elementi adottata è stata scelta in modo da riprodurre tutte le forme d'onda delle frequenze analizzate ed avere una discretizzazione più fine in prossimità della struttura. La viscosità del materiale è stata definita adottando opportuni fattori di smorzamento alla Rayleigh, calibrati in base alle frequenze fondamentali di vibrazione del terreno ($f_1 = 3.52 \text{ Hz}$, $f_2 = 10.55 \text{ Hz}$) e della struttura ($f_1 = 1.37 \text{ Hz}$, $f_2 = 4.00 \text{ Hz}$) e ai rapporti di smorzamento pari a 8.5% per il terreno e 5% per la struttura. Carichi distribuiti sono stati applicati alle travi per tener conto del peso proprio degli impalcati, del vano scala, dei balconi e delle tamponature; infine, gli input sismici presentati al Par. 2.3 sono stati applicati alla base dei *dashpot*. Maggiori dettagli sul Modello 1 sono in Fiamingo et al., 2022. Nel Modello 2, uno strato di terreno di 1.5 m di profondità e 18.1 m di larghezza sotto la fondazione è stato sostituito con la miscela GRM: 70-30 descritta al Par. 2.2. La miscela è stata modellata a comportamento visco-elastico equivalente come fatto per il terreno, ma adottando valori G e D aggiornati in funzione dell'effettivo livello deformativo raggiunto per ogni input sismico adottato, sulla base delle curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ presentate in Fig. 1.b.

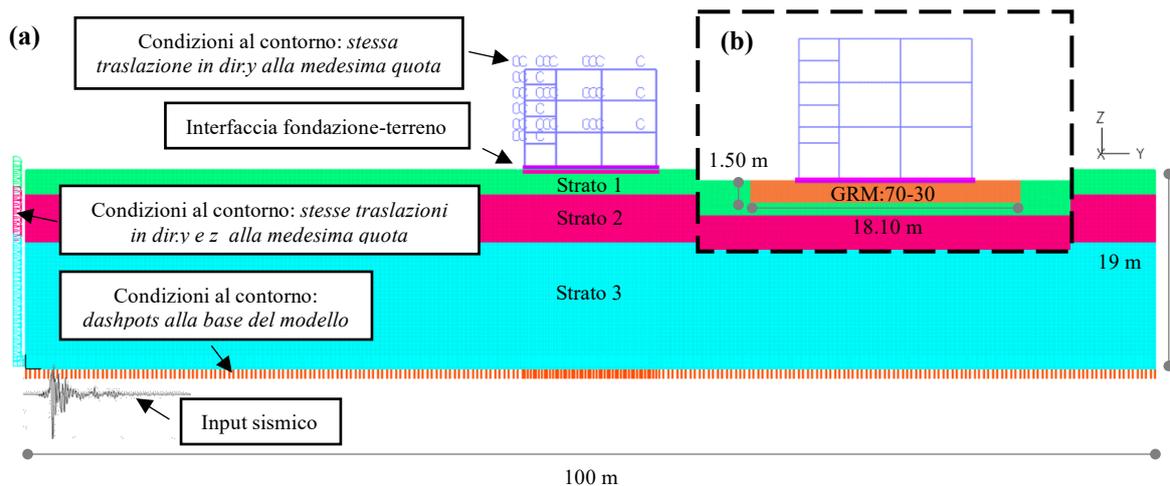


Fig. 3. Modelli FEM sviluppati: (a) Modello 1: sistema terreno-struttura di riferimento; (b) Dettaglio del Modello 2: sistema isolato mediante lo strato di GRM sotto le fondazioni.

4. Risultati e conclusioni

Per valutare l'efficacia dello strato di GRM come tecnica GSI, è stata analizzata la risposta dinamica dei due Modelli 1 e 2 in termini di involucri degli spettri di risposta elastici in accelerazione alla fondazione e al tetto della struttura (Fig. 4.a e Fig. 4.b), e variazione percentuale delle ordinate spettrali in funzione dei periodi, alla fondazione e al tetto della struttura (Fig. 4.c e Fig. 4.d). Inoltre, le Fig. 4.e e 4.f mostrano lo spettro di Fourier (FAS) ottenuto per l'input sismico "ID 0287", rispettivamente alla fondazione e al tetto; tale input è stato scelto perché rappresentativo dell'andamento medio della variazione percentuale delle accelerazioni spettrali.

Gli involucri degli spettri di risposta a livello della fondazione (*Foundation Motion*) e del tetto della struttura (*Roof Motion*) sono stati ottenuti facendo riferimento agli spettri di risposta elastici di tutti gli input sismici, considerando un rapporto di smorzamento pari al 5%. Dalle Fig. 4.a e 4.b è possibile notare che la miscela GRM ha prodotto una riduzione dei picchi di accelerazione spettrale e una

traslazione di questi picchi verso periodi più alti (cioè verso frequenze più basse). Questo è tipico di tutti quei sistemi in cui si verificano forti fenomeni di interazione terreno-struttura (EN 1998-5, 2004). Quanto alla variazione percentuale delle ordinate spettrali mostrata nelle Fig. 4.c e nella Fig. 4.d, valori negativi rappresentano una “de-amplificazione” dell’accelerazione spettrale; al contrario, valori positivi indicano una “amplificazione” dell’accelerazione spettrale. In fondazione (Fig. 4.c), per valori di periodi negli intervalli $0 \div 0.28$ s e $0.52 \div 0.94$ s si è verificata una deamplificazione delle accelerazioni spettrali pari a circa il 30% per il primo intervallo e pari a circa il 20% per il secondo. Tuttavia, negli intervalli $0.28 \div 0.52$ s e $0.94 \div 2.0$ s si è ottenuta un’amplificazione dell’accelerazione spettrale pari al 20%. Analoghe considerazioni possono essere ripetute al tetto della struttura (Fig. 4.d): si è verificata una significativa deamplificazione delle accelerazioni spettrali pari a circa il 40% nel range $0 \div 0.93$ s, ma un’amplificazione pari a circa il 20% nell’intervallo $0.93-2$ s. È possibile spiegare l’andamento medio della variazione percentuale (linea nera tratteggiata in Fig. 4.c e Fig. 4.d) osservando gli spettri di Fourier relativi all’input ID 0287 mostrati nelle Fig. 4.e e Fig. 4.f.

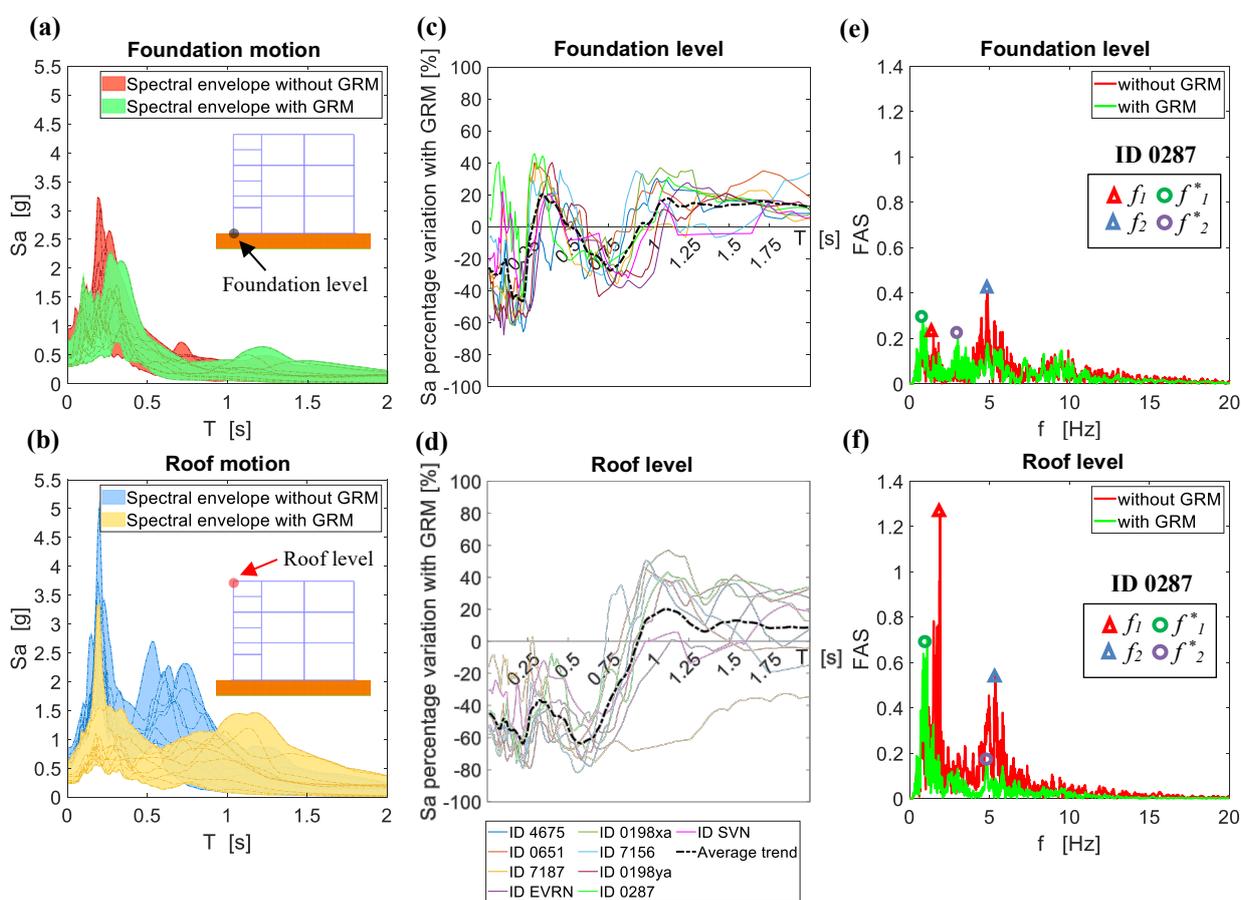


Fig. 4. Involuppo degli spettri di risposta elastici (a) in fondazione e (b) al tetto della struttura; variazione percentuale delle ordinate spettrali in funzione dei periodi: (c) in fondazione e (d) al tetto della struttura; spettro di Fourier per l’input ID 0287 (e) in fondazione e (f) al tetto della struttura (f sono le frequenze valutate per il sistema “senza GRM” ed f^* sono le frequenze valutate per il sistema “con GRM”)

A livello della fondazione (Fig. 4.e), i picchi dello spettro di Fourier per il sistema “con GRM” (linea verde) si hanno per frequenze più basse rispetto ai picchi dello spettro di Fourier per il sistema “senza GRM” (linea rossa): $f_1 = 1.48$ Hz e $f_2 = 4.84$ Hz per il sistema “senza GRM” contro $f_1^* = 0.80$ Hz e $f_2^* = 3.00$ Hz per il sistema “con GRM”. Fissata pertanto una bassa frequenza, l’ampiezza dello spettro di Fourier per il sistema “con GRM” è maggiore dell’ampiezza dello spettro di Fourier per il sistema “senza

GRM”; fissata invece un’alta frequenza, l’ampiezza dello spettro di Fourier per il sistema “con GRM” è inferiore all’ampiezza dello spettro di Fourier per il sistema “senza GRM”. Al tetto della struttura (Fig. 4.f) si è ottenuto lo stesso andamento: la prima frequenza fondamentale $f_1 = 1.89$ Hz per il sistema “senza GRM” si sposta al valore inferiore $f_1^* = 1.10$ Hz per il sistema “con GRM”, così come la seconda frequenza fondamentale $f_2 = 5.36$ Hz si sposta verso una frequenza leggermente inferiore, pari a $f_2^* = 4.81$ Hz. Anche se le seconde frequenze fondamentali sono molto simili, per il sistema “con GRM” è stata ottenuta un’importante diminuzione dell’ampiezza dello spettro di Fourier. Pertanto, l’effetto dello strato di GRM sull’input sismico è duplice: da un lato determina un aumento dell’ampiezza dello spettro di Fourier a basse frequenze e dall’altro una diminuzione dell’ampiezza dello spettro di Fourier alle alte frequenze.

Sulla base dei risultati raggiunti a livello della fondazione (Fig. 4.c), ovvero la buona riduzione delle accelerazioni spettrali, questa miscela potrebbe quindi essere efficacemente utilizzata come tecnica GSI per la struttura indagata.

Bibliografia

- Abate, G., Massimino, M.R., Pitilakis, D., Anastasiadis, A., Vratsikidis, A. (2022). “Influence of rubberized soil underneath the foundation of a structure investigated by dynamic large-scale tests”. Proc. 20th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE, Sydney, 58-63.
- Anastasiadis, A., Senetakis, K., Pitilakis, K. et al. (2012). “Dynamic behaviour of sand/rubber mixtures. Part I: effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio”, *Journal of ASTM International* 9.
- D.M. (1976). Norme tecniche per l’esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche. GU Suppl. Ord. 14-08-1976.
- EN 1998-5 (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. European Committee for Standardization, Brussels.
- Fiamingo, A., Bosco, M., Massimino M.R. (2022). “The role of soil in structure response of a building damaged by the 26 December 2018 earthquake in Italy”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.06.010>.
- Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. (2009). “REXEL: computer-aided record selection for code-based seismic structural analysis”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 339–362.
- NTC (2018). Norme tecniche per le costruzioni. GU Serie Generale n. 42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8.
- Pistolas, G.A., (2015). Experimental and Numerical Investigation of the Implementation of Recycled Materials Mixtures in the Foundation of Structures for the Improvement of Seismic Behavior, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece. (in Greek).
- Pitilakis, K., Karapetrou, S., Tsagdi, K. (2015). “Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber–sand mixtures”, *Soil dynamics and Earthquake engineering*, 79, 237-252.
- Pitilakis, D., Anastasiadis, A., Vratsikidis, A., Kapouniaris, A., Massimino, M.R., Abate, G., Corsico, S. (2021). “Large-scale field testing of geotechnical seismic isolation of structures using gravel-rubber mixtures”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50, 1-20.
- Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Crowley, H., Calvi, G.M., Boschi., E. (2011). “Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1885-1911.
- Tasalloti, A., Chiaro, G., Murali, A., Banasiak, L. (2021a). “Physical and mechanical properties of granulated rubber mixed with granular soils - a literature review”, *Sustainability (Switzerland)*, 13.
- Tasalloti, A., Chiaro, G., Banasiak, L., Palermo, A. (2021b). “Experimental investigation of the mechanical behaviour of gravel-granulated tyre rubber mixtures”, *Construction and Building Materials*, 273.
- Tsang, H.H. (2008). “Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37, 283-303.
- Tsang, H.H. (2009). Geotechnical seismic isolation. Nova Science Publishers Inc., New York.