POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Criteri semplificati per la selezione tra approccio equivalente lineare e nonlineare nelle analisi di risposta sismica locale

Original
Criteri semplificati per la selezione tra approccio equivalente lineare e nonlineare nelle analisi di risposta sismica locale / Aimar, Mauro; Foti, Sebastiano. - ELETTRONICO. - (2021). (Intervento presentato al convegno Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica IARG 2021 tenutosi a Caserta (CE) nel 12-11-2021).

Availability:
This version is available at: 11583/2943872 since: 2021-12-09T14:09:24Z

Publisher:
Associazione Geotecnica Italiana

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

28 March 2024

CRITERI SEMPLIFICATI PER LA SELEZIONE TRA APPROCCIO EQUIVALENTE LINEARE E NONLINEARE NELLE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Mauro Aimar
Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
mauro.aimar@polito.it

Sebastiano Foti
Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
sebastiano.foti@polito.it

Sommario

La possibile amplificazione delle onde sismiche nei depositi di suolo è cruciale per la progettazione sismica di edifici e sistemi geotecnici. Gli approcci più comuni per la simulazione numerica della risposta sismica locale sono i metodi EQuivalente Lineare (EQL) e NonLineare (NL). Sebbene i loro vantaggi e limiti siano stati indagati in diversi studi, il relativo campo di applicabilità è ancora oggetto di dibattito.
Questo studio ha testato entrambi i metodi su un'estesa popolazione di modelli di sottosuolo, soggetti a storie temporali di accelerazione di diversa intensità. Dal confronto dei risultati degli approcci EQL e NL, si sono definiti dei criteri semplificati per prevedere quando i due schemi sono compatibili o meno, sulla base di parametri geotecnici e di scuotimento. Il risultato rivela un buon livello di affidabilità dell'approccio EQL per varie condizioni del suolo riscontrate in applicazioni comuni, anche per scuotimenti ad alta intensità.

1. Introduzione

La stima dell'amplificazione sismica dovuta a effetti stratigrafici si basa tipicamente su analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) in condizioni monodimensionali. Un aspetto critico in queste simulazioni consiste nella modellazione costitutiva del terreno in condizioni dinamiche, che esibisce un comportamento nonlineare e isteretico. Gli schemi più comuni sono gli approcci EQuivalente Lineare (EQL) e NonLineare (NL). Lo schema EQL è relativamente semplice e intuitivo, sebbene le simulazioni NL sembrino essere più idonee in presenza di depositi deformabili o di sismi a elevata intensità (Hartzell et al., 2004). D'altra parte, le analisi NL si basano su modelli costitutivi avanzati, talvolta di complessa calibrazione (Stewart et al., 2008), e sono affette da una notevole variabilità intrinseca (Régnier et al., 2016). Per queste ragioni, l'approccio EQL è ancora largamente impiegato, anche per individuare anomalie nelle simulazioni NL (Stewart et al., 2014).
Molti studi hanno analizzato le condizioni alle quali i risultati dei due approcci iniziano a divergere in modo significativo. Tipicamente, è stato proposto un limite di applicabilità dello schema EQL, basato sul livello massimo di deformazione a taglio o su indicatori a esso legati (ad es., Kaklamanos et al., 2013). Questi studi, tuttavia, sono principalmente basati su osservazioni empiriche e indagano un insieme ristretto di condizioni stratigrafiche. Inoltre, i criteri sviluppati propongono un singolo valore come limite per l'applicabilità per i metodi EQL e NL, mentre l'affidabilità di ciascun approccio può dipendere anche dalle caratteristiche specifiche del deposito (Aristizábal et al., 2018).
L'obiettivo dello studio consiste nella valutazione delle differenze tra gli schemi EQL e NL considerando un database stocastico di analisi di RSL. Il database contiene i risultati di simulazioni svolte su 10'150 modelli 1D di sottosuolo, soggetti a 42 input sismici aventi diversa ampiezza e forma spettrale. Le simulazioni EQL e NL sono state eseguite tramite i software SHAKE91 (Sun e Idriss, 1992) e DEEPSOIL v7.0 (Hashash et al., 2017), rispettivamente. Le differenze relative tra i metodi EQL e NL

sono state esaminate in funzione delle caratteristiche stratigrafiche e di scuotimento. A tal fine, si è impiegato un nuovo criterio che confronta la distribuzione di tali differenze e quella del corrispondente parametro di amplificazione. Il risultato è uno schema semplificato per prevedere dove i due approcci divergono significativamente, che può essere utilizzato in modo predittivo nelle fasi preliminari della progettazione.

2. Costruzione del database di risposta sismica locale

Di seguito sono riportati alcuni passaggi fondamentali riguardo la procedura di costruzione del database di RSL. Ulteriori dettagli circa la generazione dei modelli di sottosuolo e la selezione degli input sismici sono disponibili in Aimar et al. (2020), Aimar e Foti (2021) e Paolucci et al. (2021).

I modelli di sottosuolo sono stati selezionati da una collezione di 91'500 profili, i quali sono stati generati mediante una randomizzazione Monte-Carlo a partire da profili reali, impiegando il modello geostatistico proposto in Passeri et al. (2020). La selezione dei 10'150 modelli è stata svolta con riferimento allo schema di classificazione del sito proposto nella Bozza finale di revisione dell'EC8-1 (CEN, 2021), basato sulla profondità del bedrock sismico H e sulla velocità equivalente dell'onda di taglio $V_{S,H}$ (equivalenti ai parametri H e $V_{S,eq}$ delle NTC18). In questo modo, si è ottenuto un insieme di modelli realistici, che rappresentano in modo uniforme diverse condizioni stratigrafiche (Fig. 1a-d).

Il comportamento ciclico dei terreni è introdotto attraverso le curve MRD, che sono state stimate mediante modelli empirici (Darendeli, 2001; Rollins et al., 1998; Sun e Idriss, 1992). D'altra parte, questo studio non ha tenuto conto dell'effetto della resistenza al taglio in modo esplicito, a causa delle incertezze nella sua stima (Stewart et al., 2014). Tali relazioni sono state introdotte nelle analisi NL attraverso il modello di Kondner-Zelasko (Matasović e Vucetic, 1993), i cui parametri sono stati calibrati secondo la "Procedura MRDF" (Phillips e Hashash, 2009). Le analisi NL richiedono anche il rapporto di smorzamento viscoso, che è stato stimato dalle curve MRD e incorporato nelle simulazioni mediante la formulazione indipendente dalla frequenza (Phillips e Hashash, 2009).

Gli input sismici sono 42 storie temporali di accelerazione al suolo, selezionate da diverse banche dati internazionali (ITACA, ESM, ESD e NGA-West 2). Gli accelerogrammi selezionati sono stati registrati su affioramento roccioso pianeggiante (ossia $V_{S,30} > 800$ m/s) e coprono un ampio intervallo di ampiezze, con accelerazione di picco al suolo (PGA) variabile tra 0,05g e 0,35g (Fig. 1e).

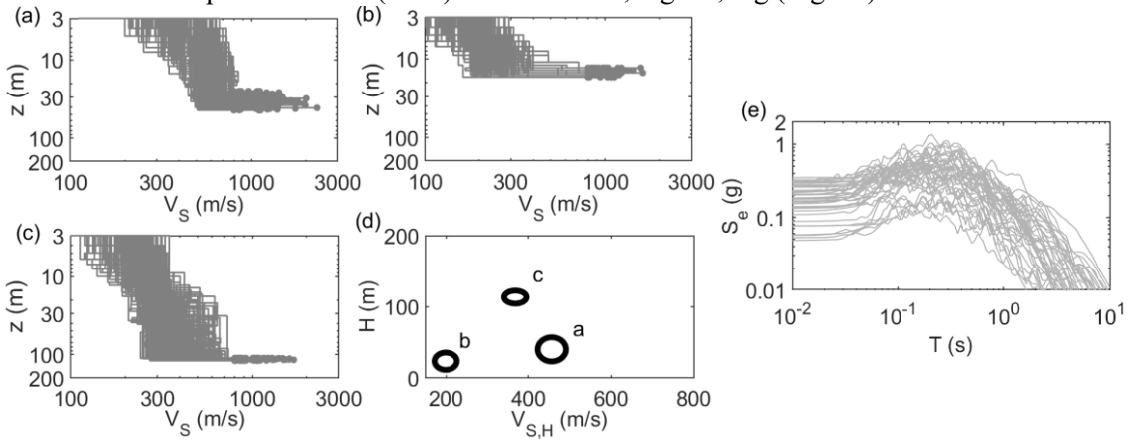


Fig 1. a-c) Esempi di profili generati, la cui posizione nel dominio $V_{S,H}$-H è riportata in d); e) Spettri di risposta in accelerazione S_e degli input sismici selezionati.

3. Parametri di amplificazione

L'amplificazione sismica è descritta secondo fattori di amplificazione FA, derivati da parametri sintetici. Il primo parametro è il fattore di amplificazione PGAA dell'accelerazione di picco, definito come il rapporto tra la PGA calcolata in superficie (PGA_s) e quella in input (PGA_r):

$$PGAA = \frac{PGA_s}{PGA_r} \tag{1}$$

Inoltre, sono stati valutati dei fattori di amplificazione spettrale (FAS), definiti come il rapporto tra l'intensità spettrale (Rey et al., 2002) in superficie ($SI_{AB,s}$) e quella in input ($SI_{AB,r}$):

$$SA_{AB} = \frac{SI_{AB,s}}{SI_{AB,r}}, SI_{AB} = \int_A^B S_e(T)dT \tag{2}$$

Il presente studio ha considerato tre FAS (Tab. 1), che sono stati introdotti nei più recenti studi di microzonazione sismica condotti in Italia (PCM, 2017). Essi sono considerati rilevanti per gruppi omogenei di strutture, ossia edifici bassi (SPSA), intermedi (IPSA) e alti (LPSA).

Tab. 1. Parametri di intensità e di amplificazione spettrale.

Parametro di intensità spettrale	Fattore di amplificazione spettrale	Range di periodi
Intensità spettrale a brevi periodi (SPSI)	Fattore di amplificazione spettrale a brevi periodi (SPSA)	[0.1 s; 0.5 s]
Intensità spettrale a medi periodi (IPSI)	Fattore di amplificazione spettrale a medi periodi (IPSA)	[0.4 s; 0.8 s]
Intensità spettrale a lunghi periodi (LPSI)	Fattore di amplificazione spettrale a lunghi periodi (LPSA)	[0.7 s; 1.1 s]

4. Descrizione delle differenze inter-metodo

In questo studio, la differenza δ_X tra le stime EQL e NL è quantificata mediante il logaritmo del rapporto tra le corrispondenti stime del FA X (ad es., Kaklamanos et al., 2013):

$$\delta_X = \ln \frac{X_{EQL}}{X_{NL}} \tag{3}$$

Un valore positivo indica una sovrastima del FA da parte dello schema EQL rispetto all'approccio NL. Per valutare la divergenza tra i due approcci, occorre inoltre definire di un criterio per individuare le condizioni entro cui l'entità delle differenze relative non è significativa. Il criterio confronta l'intervallo definito dalla media $\mu_{\delta,X}$ e una deviazione standard $\sigma_{\delta,X}$ di δ_X con una soglia δ_X^{max}. In particolare, il confronto riguarda il massimo $\delta_X^{\mu\pm\sigma}$ tra gli estremi di tale intervallo (in valore assoluto), definito come:

$$\delta_X^{\mu\pm\sigma} = \max\left(\left| \mu_{\delta,X} \pm \sigma_{\delta,X} \right| \right) \tag{4}$$

Pertanto, le differenze relative sono assunte trascurabili ("$\delta < \delta^{max}$") se vale la seguente condizione:

$$\delta_X^{\mu\pm\sigma} < \delta_X^{max} = \sigma_{\ln X}^E \tag{5}$$

La soglia δ_X^{max} è assunta pari alla deviazione standard empirica $\sigma_{\ln X}^E$ del FA in esame (Carlton e Tokimatsu, 2016), che è stata derivata da Ground Motion Prediction Equations (Aimar e Foti, 2021). I valori sono elencati in Tab. 2 in funzione di $V_{S,30}$, in quanto $\sigma_{\ln X}^E$ dipende dalle condizioni del sito.
Questo approccio può identificare sia le situazioni in cui le differenze relative sono mediamente grandi, cioè $\mu_{\delta,X}$ si discosta significativamente da zero, sia quelle in cui la media è nulla ma $\sigma_{\delta,X}$ è così elevato che la soglia è superata per un gran numero di casi. Inoltre, il criterio assume che la discrepanza sia trascurabile quando essa ricade dentro la dispersione naturale del FA in esame. In questo modo, i metodi EQL e NL vengono confrontati secondo un criterio oggettivo, che identifica quando le differenze relative sono significative rispetto alla variabilità statistica che caratterizza l'amplificazione stratigrafica.

Tab. 2. Valori di $\sigma_{\ln X}^E$ in funzione del FA in esame e di $V_{S,30}$.

Parametro	$V_{S,30}$ > 400 m/s	250 m/s ≤ $V_{S,30}$ ≤ 400 m/s	$V_{S,30}$ < 250 m/s
PGAA	0.265	0.3	0.345
SPSA	0.238	0.3	0.333
IPSA	0.233	0.275	0.308
LPSA	0.231	0.268	0.318

5. Ruolo delle caratteristiche del sottosuolo

Al fine di comprendere l'effetto delle condizioni del suolo sulle differenze tra gli approcci EQL e NL, la Fig. 2 rappresenta la distribuzione di $\mu_{\delta,X}$ per SPSA e LPSA tra i vari modelli. Tale distribuzione dipende da $V_{S,H}$ e dalla frequenza naturale f_0 ($f_0 = V_{S,av}/4H$, $V_{S,av}$ = media armonica di V_S fino al bedrock). In depositi poco profondi (H < 30 m) aventi f_0 elevata (ad es., f_0 > 10 Hz per SPSA – Fig. 2b), δ_X è prossimo a zero a causa del basso livello di deformazione (Kwok et al., 2008). Per f_0 bassa, invece, δ_X è positivo e aumenta notevolmente se la deformabilità è elevata. L'andamento può ancora essere legato a f_0, in quanto il picco di $\mu_{\delta,X}$ si trova su un intervallo di f_0 pari a 1,5-8 Hz per PGAA, 2-4 Hz per SPSA (Fig. 2b) e 2-3,5 Hz per IPSA. A lunghi periodi, invece, δ_X aumenta continuamente (Fig. 2d).
Nei modelli profondi (H > 30 m), δ_X dipende principalmente da $V_{S,H}$. Per depositi più rigidi ($V_{S,H}$ > 400 m/s), δ_X è generalmente basso, mentre modelli profondi e deformabili mostrano valori di δ_X positivi ed elevati, soprattutto per $V_{S,H}$ < 200 m/s. Inoltre, l'entità della differenza massima aumenta per lunghi periodi di vibrazione (Fig. 2c). Simili considerazioni valgono per $\sigma_{\delta,X}$ e per gli altri FA.
In base a queste considerazioni, viene proposto uno schema di suddivisione dei depositi di terreno per impostare una valutazione semplificata delle differenze tra gli approcci EQL e NL (Fig. 4). Lo schema è concepito per raggruppare diverse condizioni stratigrafiche aventi un comportamento simile in termini di δ_X e tiene conto della dipendenza di δ_X^{max} rispetto a $V_{S,30}$ (Tab. 2). La partizione si basa su limiti specifici in termini di $V_{S,H}$ e H, ma a basse profondità la suddivisione tiene anche conto del ruolo di f_0.

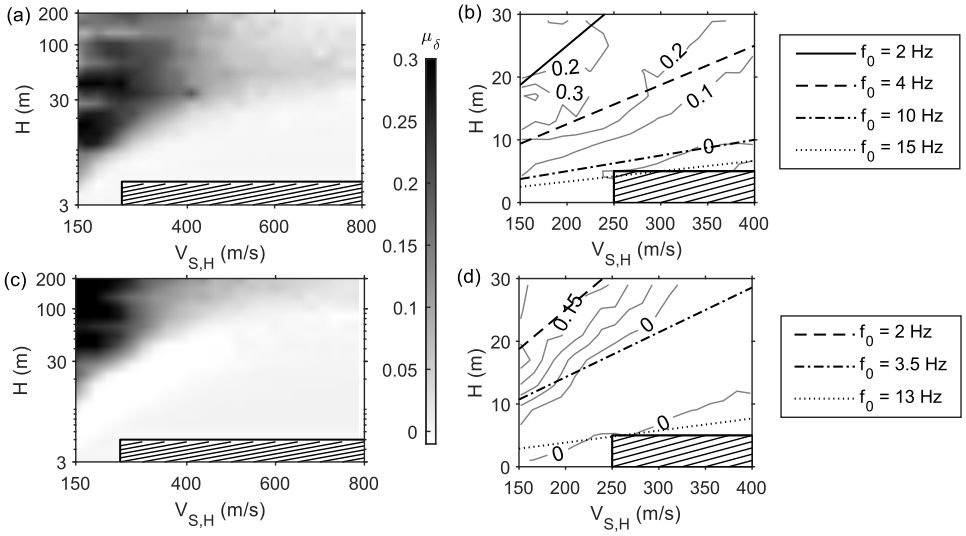


Fig. 2. Andamento di $\mu_{\delta,X}$ in funzione di $V_{S,H}$ e H per SPSA (a-b) e LPSA (c-d). Le figure b-d) mostrano in dettaglio l'andamento di $\mu_{\delta,X}$ (come curve di livello) nella regione rappresentativa dei depositi superficiali e deformabili. La porzione tratteggiata non è stata oggetto di analisi.

6. Ruolo dei parametri di scuotimento

L'effetto dei parametri di scuotimento è stato inizialmente studiato mettendo in relazione diversi parametri di scuotimento con $\delta_X^{\mu\pm\sigma}$ per ciascun gruppo di modelli (Fig. 3m). Il grado di relazione è stato quantificato attraverso il coefficiente di correlazione τ_b di Kendall (Kendall, 1955).
Si osserva una relazione da moderata a forte (cioè τ_b > 0,5) tra $\delta_X^{\mu\pm\sigma}$ e *PGA* in diversi gruppi di modelli di suolo per tutti i FA, come mostrato in Fig. 3 per $\delta_{SPSA}^{\mu\pm\sigma}$. La *PGA*, infatti, è correlata all'entità della divergenza tra gli approcci di RSL (Assimaki e Li, 2012). Unica eccezione sono i depositi rigidi e superficiali, dove $\delta_{SPSA}^{\mu\pm\sigma}$ è basso indipendentemente dalla *PGA*. Simili risultati valgono per gli altri FA.
Le relazioni individuate consentono di stimare il livello di scuotimento nel quale δ_X diventa rilevante, confrontando l'andamento di $\delta_X^{\mu\pm\sigma}$ e δ_X^{max}, in accordo con (5). La soglia δ_X^{max} è stata assegnata a ogni gruppo di modelli, in base alla distribuzione di $V_{S,30}$ al suo interno. La Fig. 4 mostra i livelli di *PGA* fino a cui è soddisfatta la condizione "$\delta < \delta^{max}$" per ciascun gruppo, in funzione del FA. In depositi profondi con materiale tenero, eventi con *PGA* > 0,1g danno luogo a forti differenze. Tuttavia, all'aumentare di

$V_{S,H}$ o del periodo in esame, i due schemi sono compatibili per *PGA* più elevate, fino a 0,3g.
Infine, le differenze per i FAS mostrano una forte relazione con i corrispondenti SI_{AB} (ad es., $\delta_{SPSA}^{\mu\pm\sigma}$ vs SPSI). Pertanto, tali differenze dipendono dal contenuto in frequenza, ossia intensità e forma spettrale. Ulteriori dettagli circa i risultati sono disponibili in Aimar e Foti (2021).

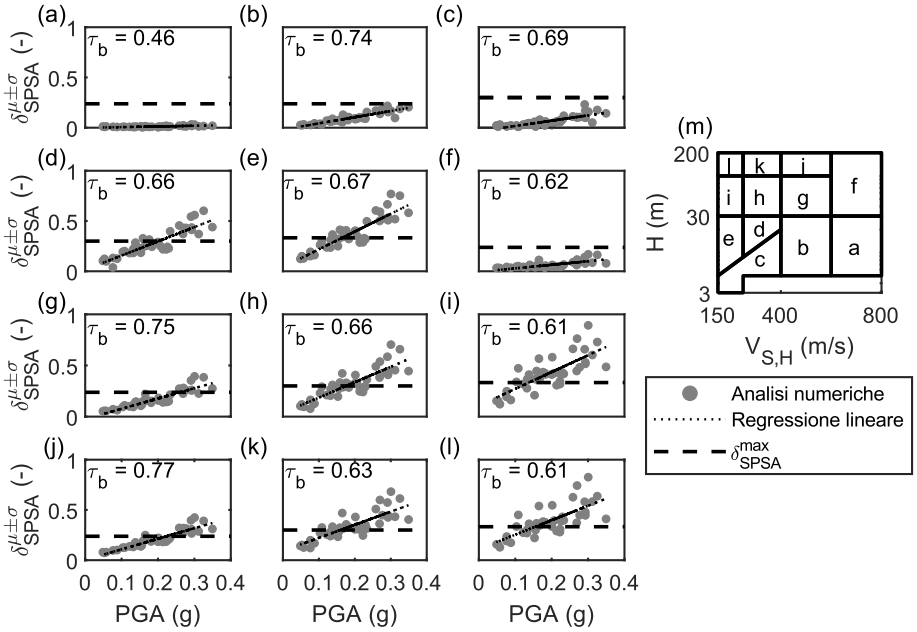


Fig. 3. Confronto tra $\delta_{SPSA}^{\mu\pm\sigma}$ e PGA per i diversi gruppi di modelli, la cui posizione è indicata in (m).

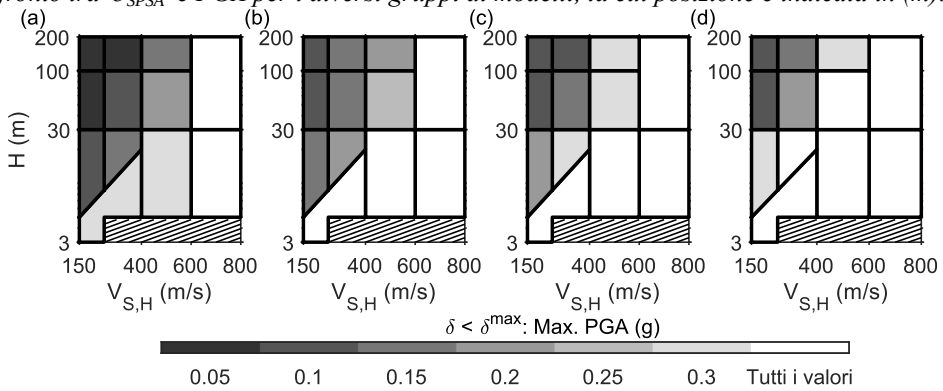


Fig. 4. Massimo livello di PGA entro il quale i metodi EQL e NL sono compatibili, per PGAA (a), SPSA (b), IPSA (c) e LPSA (d). La porzione tratteggiata non è stata oggetto di analisi.

7. Conclusioni

Lo studio ha interpretato un database stocastico di RSL per indagare le differenze tra l'approccio EQL e lo schema NL. A tal scopo, si è adottato un nuovo criterio per valutarne l'entità, che confronta l'intervallo definito dalla media e una deviazione standard delle differenze relative con un inviluppo corrispondente alla deviazione standard del parametro di amplificazione. Questa soluzione consente una valutazione robusta della significatività della divergenza tra i due metodi, in quanto tiene conto esplicitamente della dispersione dei risultati e anche della variabilità intrinseca dell'amplificazione stessa. La Fig. 4 definisce il limite superiore di *PGA* per il quale le analisi EQL e NL forniscono risultati simili. Pertanto, questo risultato può essere utilizzato come guida per la selezione del metodo numerico, in funzione dei parametri geotecnici ($V_{S,H}$ e H), del livello atteso di scuotimento e dell'applicazione specifica per la quale è richiesta l'analisi di RSL (ossia il periodo di interesse). Si osserva che gli schemi EQL e NL sono tra di loro compatibili in depositi con spessore fino a 30 m. In terreni deformabili, invece, le differenze inter-metodo sono trascurabili entro *PGA* prossimi a 0,1-0,2g, ma questo limite può essere innalzato sensibilmente quando il periodo in esame è lungo. In questo modo, il risultato

contribuisce positivamente all'affidabilità dello schema EQL per diverse condizioni stratigrafiche di interesse ingegneristico, anche in presenza di scuotimenti intensi.

Bibliografia

Aimar M., Ciancimino A., Foti S. (2020). "An assessment of the NTC18 stratigraphic seismic amplification factors", *Italian Geotechnical Journal*, 1, 5-21.

Aimar M., Foti S. (2021). "Simplified Criteria to Select Ground Response Analysis Methods for Seismic Building Design: Equivalent Linear versus Nonlinear Approaches", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(4), 1940-1953.

Aristizábal C., Bard P.-Y., Beauval C., Gómez J.C. (2018). "Integration of site effects into probabilistic seismic hazard assessment (PSHA): A comparison between two fully probabilistic methods on the Euroseistest site", *Geosciences*, 8, 285.

Assimaki D., Li W. (2012). "Site- and ground motion-dependent nonlinear effects in seismological model predictions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 32, 143-151.

Carlton B., Tokimatsu K. (2016). "Comparison of equivalent linear and nonlinear site response analysis results and model to estimate maximum shear strain", *Earthquake Spectra*, 32 1867-1887.

Darendeli M.B. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Doctoral Dissertation, University of Texas at Austin

CEN (2021). Eurocode 8: Earthquake resistance design of structures. EN1998-1-1 Working Draft N1017.

Hartzell S., Bonilla L.F., Williams R.A. (2004). "Prediction of nonlinear soil effects", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 1609-1629.

Hashash Y.M.A., Musgrove M.I., … Phillips C.A. (2017). DEEPSOIL 7.0, User Manual. Urbana, IL.

Kaklamanos J., Bradley B.A., Thompson E.M., Baise L.G. (2013). "Critical parameters affecting bias and variability in site-response analyses using KiK-net downhole array data", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1733-1749.

Kendall M.G. (1955). Rank Correlation Methods. Hafner Publishing Co.

Kwok A.O.L., Stewart J.P., Hashash Y.M.A. (2008). "Nonlinear ground-response analysis of Turkey Flat shallow stiff-soil site to strong ground motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 331-343.

Matasović N., Vucetic M. (1993). "Cyclic characterization of liquefiable sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 1805-1822.

Paolucci R., Aimar M., … Vanini M. (2021). Checking the site categorization criteria and amplification factors of the 2021 draft of Eurocode 8 Part 1–1, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 4199-4234.

Passeri F., Foti S., Rodriguez-Marek A. (2020). "A new geostatistical model for shear wave velocity profiles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136.

Phillips C., Hashash Y.M.A. (2009). "Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1143-1158.

PCM (2017). Ordinanza n. 24 del 12 Maggio 2017.

Régnier J., Bonilla L.F., … Watanabe K. (2016). "International benchmark on numerical simulations for 1D, nonlinear site response (PRENOLIN): Verification phase based on canonical cases", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 2112-2135.

Rey J., Faccioli E., Bommer J.J. (2002). "Derivation of design soil coefficients (S) and response spectral shapes for Eurocode 8 using the European Strong-Motion Database", *Journal of Seismology*, 6, 547-555.

Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily III W.D. (1998). "Shear modulus and damping relationships for gravels", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 396-405.

Stewart J.P., Afshari K., Hashash Y.M.A. (2014). Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analysis for ground motion prediction, PEER Report 2014. Berkeley.

Stewart J.P., Kwok A.O.L., …Yang Z. (2008). Benchmarking of nonlinear seismic ground response analysis procedures, PEER Report 2008/04.

Sun J., Idriss I.M. (1992). User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Davis, California.