

# **RUOLO DELLA RESISTENZA NELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE A GRANDI DEFORMAZIONI: EVIDENZE DA CASI DI STUDIO**

Francesco Di Buccio

*Dipartimento di Ingegneria e Geologia (INGEO), Università di Chieti-Pescara  
francesco.dibuccio@unich.it*

Alessandro Pagliaroli

*Dipartimento di Ingegneria e Geologia (INGEO), Università di Chieti-Pescara  
alessandro.pagliaroli@unich.it*

## **Sommario**

Le analisi di risposta sismica locale che raggiungono elevati valori di deformazione dovrebbero adottare modelli costitutivi in grado di garantire non solo una corretta modellazione di rigidità e smorzamento in tale campo ma anche sforzi di taglio compatibili con la resistenza dei materiali. Gli usuali modelli di tipo iperbolico utilizzati nelle analisi non lineari sono invece generalmente calibrati sulle curve del modulo di taglio e di smorzamento senza controllare che gli sforzi di taglio ad elevate deformazioni che ne derivano siano congruenti con lo sforzo massimo che il terreno può sopportare (Hashash et al., 2010). La non corretta modellazione della resistenza può portare ad una errata previsione della risposta sismica con risultati non necessariamente cautelativi.

La presente nota riporta i risultati di analisi monodimensionali di risposta sismica locale eseguite in Deepsoil (Hashash et al., 2020) utilizzando il modello “standard” iperbolico non lineare MKZ e il modello GQ/H (Groholski et al. (2016), il quale permette di considerare la resistenza del terreno come parametro di input. Le analisi sono realizzate con riferimento ad un caso reale, Sendai in Giappone, del quale si dispongono registrazioni in superficie e a 10.4 m di profondità per numerosi eventi sismici di diversa energia. Questo ha permesso di valutare l’affidabilità dell’approccio tradizionalmente seguito nelle analisi di risposta sismica locale a diversi livelli di deformazione e stabilire l’influenza dell’inclusione della resistenza tra i parametri di input. I risultati ottenuti dimostrano come l’utilizzo di modelli capaci di riprodurre il comportamento del terreno a grandi deformazioni permettano di avere un miglior accordo con le registrazioni in termini sia di spettro di risposta che di PGA.

## **1. Inquadramento geologico-strutturale**

La città di Sendai si trova su una valle pianeggiante nella regione di Tohoku in Giappone caratterizzata da depositi superficiali di spiaggia (Olocene). Questi depositi ricoprono la formazione Geba (Pliocene) che costituisce le colline settentrionali e orientali e costituita da ghiaia, arenaria, tufo, siltite tufacea e lignite. Il sito considerato in questo studio si trova sul crinale della spiaggia, formatosi attraverso il trasporto del suolo e la sedimentazione delle onde, circondato da paludi e pianure di fondovalle. Lo schema in Tabella 1 mostra la copertura di sabbia e ghiaia con uno spessore di 1,25 m, con a seguire strati di sabbia più fine sciolta fino a circa sette metri di profondità dove inizia uno strato più rigido di roccia. Il livello della falda si trova a circa 1,5 m di profondità.

Magnitudo e la massima accelerazione del suolo (PGA) in superficie e a 10.4 m di profondità degli eventi analizzati in questo studio (eventi #1 and #8) sono illustrati in Tabella 2. Le registrazioni sismiche sono state selezionate per rappresentare differenti PGA (e quindi differenti livelli deformativi) e contenuto di frequenza. In particolare, un evento di bassa intensità è stato utilizzato per calibrare il modello numerico mentre un evento di maggiore intensità ha permesso di studiare il miglioramento della risposta a grandi deformazioni includendo la resistenza del terreno come parametro di input.

Tabella 1. Parametri impiegati nelle analisi numeriche in Deepsoil (z profondità bordo inferiore dello strato considerato; Vs profilo delle velocità delle onde di taglio; ρ densità; φ' angolo d'attrito; c' coesione; OCR rapporto di sovraconsolidazione, τ<sub>max</sub> resistenza del terreno in accordo con la formulazione di Hardin e Drnevich (1972), G/G0 e D curve di decadimento).

Litotipi	z [m]	Vs [m/s]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	φ' [°]	c' [kPa]	OCR	τ <sub>max</sub> [kPa]	Curve: G/G0 - γ; D - γ	Modelli Costitutivi
Sabbia con ghiaia	1.25				0		4.05	SENDAI - 2 T2 - 2	
	2				1850		12.86		
Sabbia fine	3	240		43.60	1.2	2	16.58	SENDAI - 2 T2 - 4	MKZ vs GQ/H  (Non-Masing rules)
	4						20.39		
	5						24.28		
	6						28.18		
	7						32.07		
bedrock	10.4	550	2480	-	-	-	-	Linear (D=1%)	

## 2. Modello geotecnico

I parametri impiegati nel modello geotecnico (Tabella 1) sono stati ricavati dalle prove disponibili in sito e in laboratorio (OYO Corporation, 2014). Per calibrare il modello è stata confrontata la funzione di amplificazione calcolata e quella registrata come riportato in Figura 1. La registrazione in superficie della funzione di trasferimento è stata ottenuta dall'evento TS-8-S, un evento di bassa intensità con PGA=0.005g a 10,4 m di profondità. La funzione di amplificazione numerica è stata ottenuta mediante un'analisi lineare considerando una base rigida e la registrazione del sensore situato a 10,4 m di profondità come input. Questo confronto mostra che il profilo Vs ipotizzato (Figura 1a) riproduce correttamente le frequenze naturali del sito, nonostante lievi differenze tra osservazioni e simulazioni in termini di ampiezza sia per il primo che per il secondo picco.

Il comportamento non lineare degli strati più superficiali è stato ottenuto da due prove di compressione triassiale ciclica eseguite a 3.3 m e 5.4 m denominate rispettivamente Sendai-2 T2-2 e Sendai-2 T2-4, (Figura 2). Poiché le curve di decadimento sono espresse in termini di modulo di Young E e deformazione assiale, la corrispondente deformazione di taglio è stata considerata pari a 3/2 della deformazione assiale mentre il modulo di taglio è stato calcolato da E considerando la nota relazione per i materiali elastici isotropi (Régnier et al., 2018).

Tabella 2. Eventi analizzati (componente Est-Ovest).

#	Codice	M <sub>w</sub>	Distanza	D <sub>epi</sub>	PGA downhole	PGA in superficie
			(km)	(km)	(cm/s <sup>2</sup> )	(cm/s <sup>2</sup> )
1	TS-1-S	9	23.7	163	252	410
8	TS-8-S	6.4	34.5	208	5	7

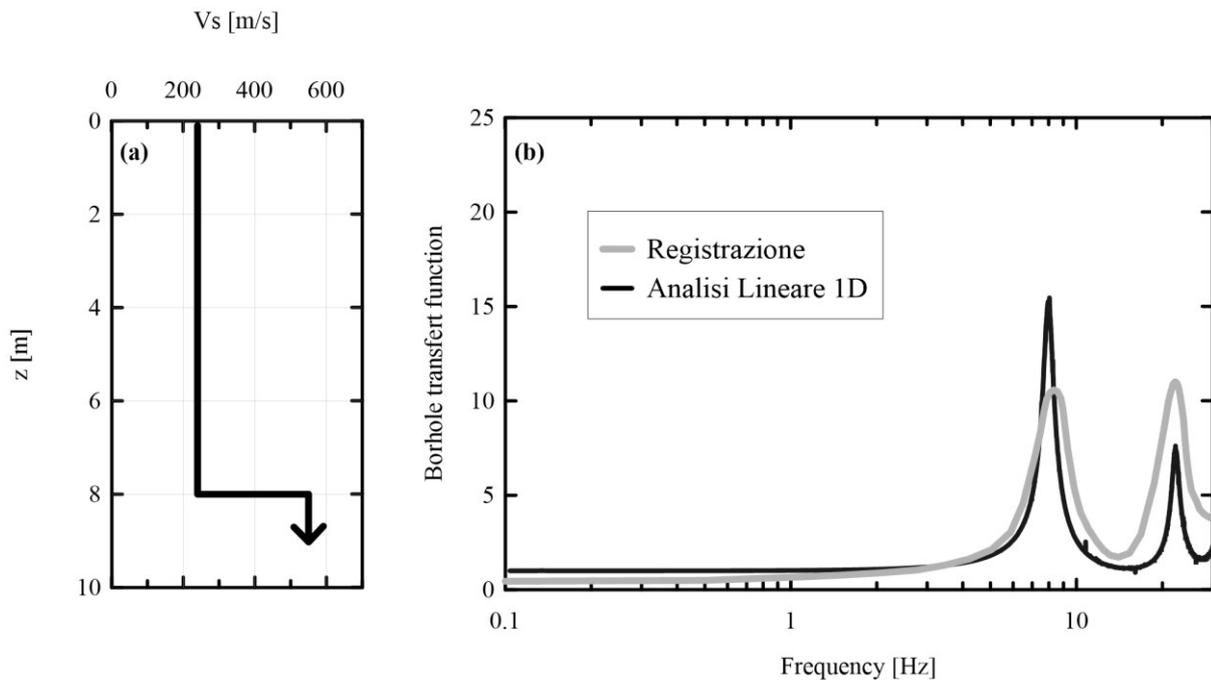


Figura 1. (a) Profilo  $V_s$  (b) confronto tra funzione di amplificazione calcolata e registrata per l'evento TS-8-S ( $PGA = 0.005g$  a 10.4m).

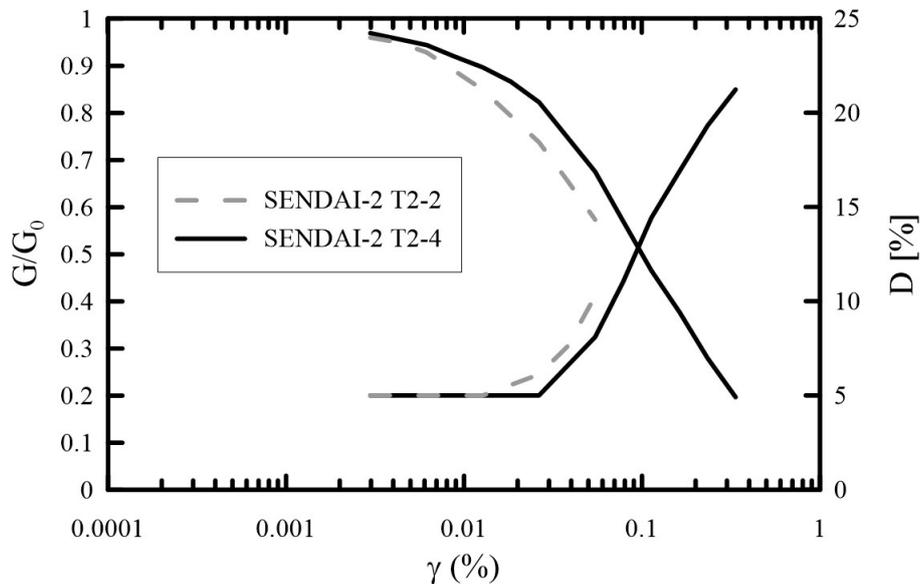


Figura 2. Curve di laboratorio. Prova a compressione triassiale ciclica: SENDAI-2 T2-2 (2.80 – 3.80m) e SENDAI-2 T2-4 (4.90 – 5.90m).

### 3. Analisi numeriche in Deepsoil

Le analisi numeriche sono state eseguite in Deepsoil utilizzando i modelli MKZ e GQ/H per mostrare la differenza tra il modello “standard” iperbolico non lineare e un modello più avanzato in grado di cogliere il reale comportamento del terreno a grandi deformazioni includendo la resistenza come parametro di input. La resistenza è stata calcolata in accordo con la formulazione di Hardin & Drnevich

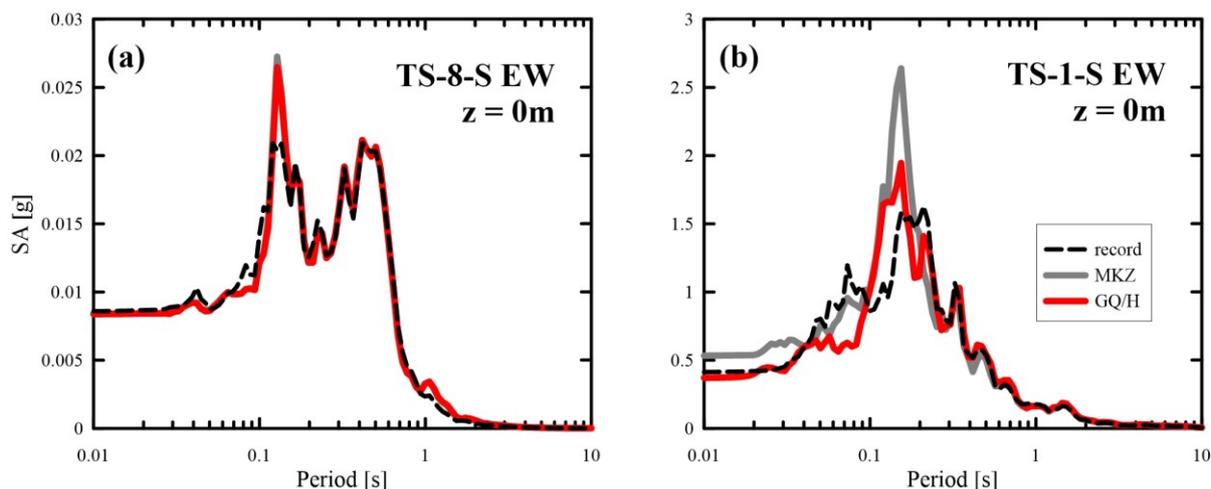


Figura 3. Confronto in termini di Spettro di risposta ( $\xi=5\%$ ) tra registrato e analisi numerica utilizzando come input la registrazione a 10.4 m di profondità. (a) TS-8-S EW. (b) TS-1-S EW.

(1972). Per maggiori dettagli consultare Di Buccio & Pagliaroli 2020. In entrambi i casi, sono stati considerati i criteri di Masing modificati. Sono stati analizzati gli eventi TS-1-S e TS-8-S, considerando la componente est-ovest (Tabella 2). La registrazione a 10.4 m di profondità è stata utilizzata come input. I risultati delle analisi non lineari sono espressi in termini di spettro di risposta in superficie come riportato in Figura 3, nella quale le simulazioni sono state confrontate con le registrazioni degli eventi analizzati. Il confronto mostra come per l'evento di bassa intensità (Figura 3a), TS-8-S, ci sia un buon accordo tra analisi numeriche e registrazione per entrambi i modelli impiegati per tutti i campi di periodo, tranne per  $0.1 \div 0.2$ s dove si osserva una leggera sovrastima. Infatti, in questo caso, la massima deformazione (circa 0.001%) è ben al di sotto della soglia volumetrica; quindi, il modello iperbolico non lineare è in grado di rappresentare correttamente il comportamento del terreno per questo range di deformazioni. Al contrario nel caso dell'evento di maggiore intensità (Figura 3b), TS-1-S, la risposta sismica raggiunge grandi deformazioni (circa 0.1%). In questo caso si può osservare come il modello MKZ sovrastima di quasi il 50% la registrazione a 0.15s e del 10% in termini di PGA. L'utilizzo del modello GQ/H, che esplicitamente include la resistenza come parametro di input, permette di migliorare la rappresentazione del picco a 0.15s e di cogliere perfettamente la PGA di 0.41g. Questa differenza nei risultati ottenuti dipende dalle curve di decadimento impiegate dai due modelli. Infatti, analizzando ad esempio le curve adottate nello strato a 5 m di profondità dal modello non lineare iperbolico MKZ (Figura 4) si osserva che la resistenza associata è superiore a quella calcolata mediante la formulazione di Hardin e Drnevich (24 kPa).

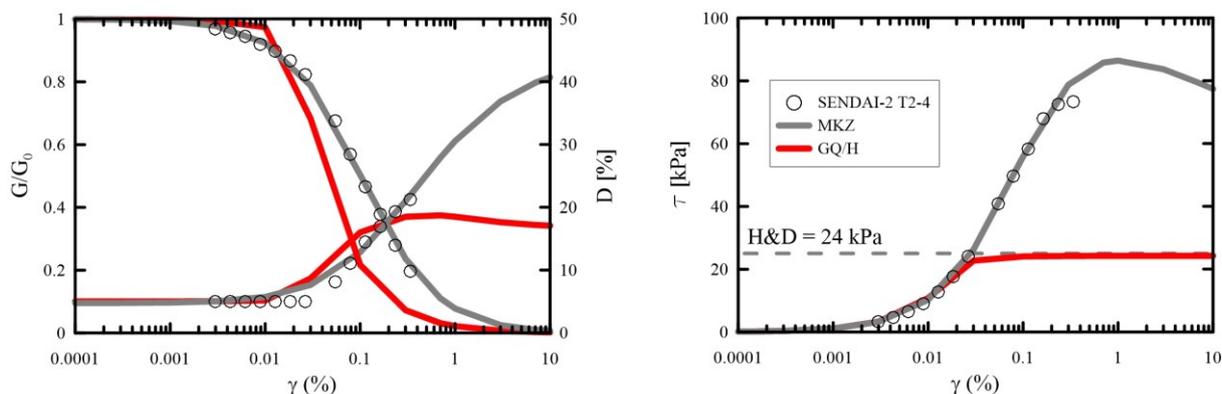


Figura 4. (a) Curve di decadimento dei modelli MKZ e GQ/H. (b) Relazione tensione-deformazione per lo strato a 5 m di profondità.

Il modello GQ/H permette di risolvere questo problema calibrando le curve in funzione della resistenza del terreno. Le stesse considerazioni sono valide per tutti gli strati, non riportati per brevità. Quindi, includere in maniera esplicita la resistenza come parametro di input consente di ottenere una rappresentazione più realistica. Le differenze osservate tra registrazione e simulazione numerica sono probabilmente dovute ad altri fattori, come effetti 2D, non rappresentabili da un'analisi monodimensionale.

#### 4. Conclusioni

Questo studio ha permesso di mostrare l'importanza di considerare la resistenza come parametro di input nella analisi di risposta sismica locale a grandi deformazioni. Superata la soglia volumetrica è necessario eseguire analisi numeriche mediante modelli più avanzati del semplice modello iperbolico non lineare, in grado di cogliere il reale comportamento del terreno. Il modello tradizionalmente utilizzato nelle analisi di risposta sismica locale permette di avere un buon accordo con l'evento a bassa intensità mentre a più elevate deformazioni è mostrato come la non corretta valutazione della resistenza al taglio, può portare a risultati irrealistici con una sensibile sovrastima del moto sismico. Il modello GQ/H permette di calibrare le curve in funzione della resistenza del terreno consentendo di ottenere risultati realistici sia in termini di spettro di risposta che PGA. Nel caso di terreni molto deformabili e/o in presenza di forti scosse sismiche è quindi opportuno non solo abbandonare l'approccio lineare equivalente ma tarare i modelli non lineari tenendo conto, oltre alle caratteristiche di rigidità e deformazione, della resistenza al taglio del terreno. Questo studio è parte di un più ampio progetto che ha previsto analisi parametriche su casi ideali (Di Buccio & Pagliaroli 2020) e su un altro caso reale (Lotung) includendo anche il tema della valutazione delle sovrappressioni interstiziali mediante modelli semplificati.

#### Bibliografia

- Di Buccio F., Pagliaroli A. (2020). Numerical modelling of seismic site response at large strains: a parametric study. *American Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 5, 2020, pp. 117-127. doi: 10.11648/j.ajce.20200805.12
- Groholski, D. R., Hashash, Y. M., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., and Stewart, J. P. (2016). Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1d seismic site response analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(9):04016042.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of the Soil mechanics and Foundations Division*, 98(7):667-692.
- Hashash, Y. M., Phillips, C., and Groholski, D. R. (2010). Recent advances in non-linear site response analysis. In 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, number 4.
- Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Groholski, D., Phillips, C., and Park, D. (2020). «deepsoil 7.0, user manual». urbana, il, board of trustees of university of illinois at urbana-champaign.
- OYO Corporation (2014). Report of soil investigation: Sendai District and Onahama District. Report from the PreNoLin Project, Nice, France.
- Régnier, J., Bonilla, L.-F., Bard, P.-Y., Bertrand, E., Hollender, F., Kawase, H., Sicilia, D., Arduino, P., Amorosi, A., Asimaki, D., et al. (2018). Prenolin: International benchmark on 1d nonlinear site-response analysis—validation phase exercise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2):876-900.