

ANALISI DELLA RISPOSTA CICLICA DI TERRENI GRANULARI ATTRAVERSO UN MODELLO BOUNDING SURFACE

Angelo Amorosi
Sapienza Università di Roma
angelo.amorosi@uniroma1.it

Daniela Boldini
Università di Bologna
daniela.boldini@unibo.it

Annamaria di Lernia
Politecnico di Bari
annamaria.dilernia@poliba.it

Fabio Rollo
Sapienza Università di Roma
fabio.rollo@uniroma1.it

Sommario

La modellazione numerica della risposta dinamica dei terreni richiede l'adozione di modelli costitutivi in grado di riprodurre le tipiche evidenze sperimentali, quali la degradazione della rigidità a taglio e l'accumulo di sovrappressioni interstiziali con l'aumento delle deformazioni distorsive. Nel presente lavoro è preso in esame il modello *bounding surface* per sabbie formulato da Dafalias e Manzari (2004). Dopo essere stato implementato nel codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 3D, il modello è stato validato per diversi livelli di deformazione sulla base di prove triassiali cicliche non drenate a controllo di spostamento. E' inoltre stato impiegato per studiare la risposta del terreno durante la propagazione delle onde sismiche in condizioni di campo libero, confrontando i risultati con quelli ottenuti attraverso un'analisi lineare equivalente.

1. Introduzione

La modellazione di problemi di propagazione di onde sismiche nei depositi di terreno richiede l'impiego di modelli costitutivi capaci di riprodurre in modo appropriato la risposta in condizioni di carico ciclico e dinamico. In generale devono poter essere colti aspetti come la degradazione della rigidità a taglio e l'accumulo di sovrappressioni interstiziali con il livello di deformazione e, con particolare riferimento ai terreni sabbiosi, il fenomeno della liquefazione. Modelli costitutivi di questo tipo spesso non sono disponibili nei codici di calcolo commerciali e, a causa dell'elevato numero di parametri costitutivi di cui necessitano, risultano di non immediato utilizzo. Nel presente lavoro il modello costitutivo *bounding surface* per terreni sabbiosi proposto da Dafalias e Manzari (2004) è stato implementato nel codice di calcolo agli elementi finiti (FE) PLAXIS 3D (Brinkgreve et al., 2013) ed è stato impiegato per modellare il comportamento meccanico delle sabbie per diversi livelli di deformazione. È stata studiata dapprima la risposta monotona e ciclica simulando prove triassiali a controllo di spostamento in condizioni non drenate. La calibrazione dei parametri è avvenuta nell'ottica di cogliere al meglio la risposta per piccoli e medi o per grandi livelli di deformazione.

Infine è stata studiata la risposta sismica locale in condizioni di campo libero per un deposito ideale di terreno sabbioso saturo, confrontandola con quella ottenuta mediante il più tradizionale approccio lineare equivalente implementato nel codice di calcolo EERA.

2. Il modello costitutivo Manzari e Dafalias (2004)

Il modello di Dafalias e Manzari (2004) è un modello elastoplastico di tipo *bounding surface* appartenente alla famiglia SANISAND (*Simple ANIsotropic model for SAND*). Sviluppato nell'ambito della meccanica dello stato critico, è stato concepito per riprodurre mediante un unico gruppo di parametri la risposta meccanica monotona e ciclica delle sabbie a partire da stati tensionali e di addensamento iniziali anche sensibilmente diversi.

Il legame costitutivo prevede quattro superfici nello spazio delle tensioni, rappresentate da coni con vertice nell'origine: la superficie di snervamento, la superficie di stato critico, la superficie limite (*bounding surface*) e quella di dilatanza, che segna il passaggio da comportamento contraente a dilatante. Le ultime due sono funzione del parametro di stato $\Psi = e - e_c$ (Been e Jefferies, 1985), dove e è l'indice dei vuoti corrente ed e_c è l'indice dei vuoti a stato critico corrispondente alla pressione media efficace corrente. Le tre superfici, critica, di dilatanza e *bounding*, sono concentriche, omotetiche e dipendono dall'angolo di Lode; esse degenerano in quella critica una volta raggiunta la condizione $\Psi = 0$. Il dominio elastico è delimitato nello spazio delle tensioni da una superficie di snervamento conica a sezione circolare, il cui centro è individuato da un *back-stress tensor*. La superficie di snervamento è caratterizzata da una legge di flusso non associata e prevede un incrudimento di tipo cinematico, regolato dalla differenza tra l'immagine del *back stress tensor* sulla superficie limite e la posizione corrente del centro della superficie di plasticizzazione, ed un incrudimento di tipo isotropo, dipendente dalla variazione delle deformazioni volumetriche plastiche. Infine la presenza del tensore variabile interna *fabric-dilatancy* tiene conto dell'effetto del riarrangiamento dei grani sulla dilatanza.

Per i dettagli relativi alla formulazione analitica del modello si rimanda all'articolo originale di Dafalias e Manzari (2004) e a quanto discusso in Amorosi et al. (2017).

2.1 Calibrazione dei parametri del modello

Il modello è stato originariamente calibrato come proposto da Dafalias e Manzari (2004) sulla base dei risultati sperimentali di prove triassiali drenate e non drenate condotte da Verdugo e Ishihara (1996) sulla sabbia di Toyoura. Utilizzando questi valori dei parametri costitutivi è stato osservato come il modello sia in grado di riprodurre in modo soddisfacente la risposta monotona e ciclica delle sabbie per elevati livelli di deformazione (20-30%). Al contrario, per livelli di deformazione piccoli e medi (0.001% - 0.5%), valori tipicamente indotti nel terreno da eventi sismici, la corrispondenza tra evidenza sperimentale e simulazione numerica risulta decisamente peggiore. La risposta ciclica della sabbia di Toyoura per piccoli e medi livelli di deformazione è stata investigata sperimentalmente da Kokusho (1980), attraverso prove triassiali cicliche non drenate condotte a partire da diversi stati tensionali e di addensamento iniziali, riportando i risultati in termini di curve di decadimento del modulo di taglio e di evoluzione del fattore di smorzamento con il livello deformativo. Al fine di simulare in maniera accurata la risposta ciclica per tali intervalli di deformazione, è stato necessario procedere ad una ricalibrazione dei parametri del modello costitutivo. In particolare il parametro G_0 è stato incrementato in modo da ottenere lo stesso valore del modulo di taglio massimo G_{max} osservato sperimentalmente. Inoltre, con l'obiettivo di limitare la degradazione della rigidità a taglio e la generazione di sovrappressioni interstiziali al crescere dell'entità delle deformazioni, è stato aumentato il valore del parametro h_0 , correlato alla rigidità plastica, mentre è stato ridotto il parametro A_0 , legato alla dilatanza. Il gruppo di parametri originali proposto da Dafalias e Manzari (2004) e quello proposto dagli autori di questa nota in seguito alla nuova calibrazione sono riportati in Tabella 1.

3. Risposta triassiale ciclica del modello

Per verificare le capacità predittive del modello nell'ambito dei piccoli e medi livelli di deformazione in condizioni di carico ciclico, sono state simulate numericamente delle prove triassiali cicliche condotte a controllo di spostamento in condizioni non drenate. Si è fatto riferimento a provini di sabbia mediamente addensata, caratterizzata da un indice dei vuoti iniziale $e_{in}=0.735$ ($D_R=65\%$), consolidata isotropicamente a una pressione media efficace di 100 kPa (Kokusho, 1980). Al provino è stato applicato uno spostamento verticale variabile con legge sinusoidale per 10 cicli di carico, con valore massimo corrispondente al livello di deformazione previsto. Per diversi livelli di deformazione, da piccoli (0.001%) a relativamente grandi (0.9%), sono stati valutati con riferimento al decimo ciclo il modulo di taglio secante, il rapporto di smorzamento e le sovrappressioni interstiziali generate, riportando questi valori in funzione della deformazione a taglio.

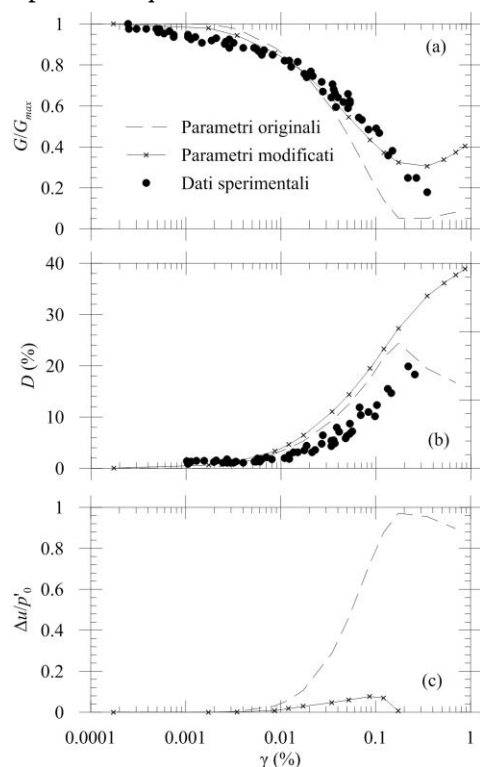


Fig 1. Confronto delle simulazioni (parametri originali e modificati) con i dati sperimentali (Kokusho 1980) per la sabbia di Toyoura: (a) curve di decadimento del modulo di rigidezza secante normalizzato, (b) del fattore di smorzamento e (c) delle sovrappressioni interstiziali

I risultati, diagrammati in Fig. 1, si riferiscono sia al gruppo di parametri originariamente definiti da Dafalias e Manzari (2004) sia alla nuova calibrazione proposta. Nel primo caso si ottiene una sottostima di circa il 70% del modulo di taglio massimo G_{max} rispetto a quanto osservato sperimentalmente, dovuta alla strategia di calibrazione adottata originariamente finalizzata a cogliere la risposta della sabbia per grandi livelli di deformazione. Un altro aspetto rilevante consiste nella eccessiva rapidità di decadimento della rigidezza a taglio con le deformazioni (Fig. 1a), intimamente connessa allo sviluppo di elevate sovrappressioni interstiziali (Fig. 1c). Attraverso la nuova calibrazione proposta è stato possibile migliorare la risposta del modello in termini di curva di decadimento del modulo, con un modesto incremento della capacità dissipativa del materiale (Fig. 1b). Oltre al naturale effetto svolto dal parametro G_0 , i parametri h_0 e A_0 assumono un ruolo cruciale nella risposta meccanica. All'aumentare di h_0 aumenta la rigidezza plastica del mezzo e al diminuire di A_0 si inibisce la tendenza contraente o dilatante del materiale, che in condizioni non drenate si traduce in una riduzione delle sovrappressioni interstiziali. Come mostrato più in dettaglio in Amorosi et al. (2017), con questa nuova

calibrazione non è possibile cogliere in maniera altrettanto soddisfacente la risposta meccanica monotona e ciclica per alti livelli di deformazione. Per questa ragione la formulazione attuale del modello è incapace di riprodurre la risposta del materiale a tutti i livelli deformativi con l'impiego di un unico gruppo di parametri costitutivi.

4. Risposta sismica locale

Con l'obiettivo di valutare la capacità del modello di prevedere la risposta sismica locale in condizioni di campo libero, sono state eseguite delle analisi numeriche prendendo a riferimento un deposito ideale di sabbia di 20 m di spessore, poggiante su un substrato rigido. La falda è posizionata in corrispondenza del piano campagna. Il modello del terreno è rappresentativo della sabbia di Toyoura,

caratterizzato da peso dell'unità di volume $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, angolo di attrito efficace pari a 31.2° e indice dei vuoti iniziali variabile con la profondità, in modo che il parametro di stato Ψ rimanga costante e pari a -0.18 (valore ottenuto come differenza tra l'indice dei vuoti corrente $e = 0.735$ e all'indice dei vuoti a stato critico corrispondente alla pressione media corrente di 100 kPa $e_c = 0.915$). Le analisi sono state effettuate con riferimento al gruppo di parametri del modello modificati (Tabella 1).

Tabella 1. – Parametri del modello SANISAND per la sabbia di Toyoura

	Parametri	Valori originali	Valori modificati
Elasticità	G_0	125	375
	ν	0.05	0.05
Stato critico	M_c	1.25	1.25
	c	0.712	0.712
	λ_c	0.019	0.019
	e_0	0.934	0.934
	ζ	0.7	0.7
	m	0.01	0.01
Superficie di snervamento			
Modulo plastico	h_0	7.05	20
	c_h	0.968	0.968
	n^b	1.1	1.1
Dilatanza	A_0	0.704	0.05
	n^d	3.5	3.5
Tensore dilatancy-fabric	z_{max}	4	4
	c_z	600	600

Il modello numerico consiste in una colonna di terreno, per la quale sono adottate le condizioni al contorno *tied nodes*. Il segnale sismico selezionato, relativo al terremoto registrato a Kalamata nel 1986, è applicato alla base del modello (condizione di base rigida). Il segnale di input è stato scalato a tre diversi valori dell'accelerazione massima (0.05g, 0.25g e 0.35g), al fine di indagare la risposta del modello per crescenti livelli di deformazione indotti dall'evento sismico. Le analisi numeriche sono state eseguite in condizioni non drenate.

Le analisi lineari equivalenti, eseguite con il codice EERA (Bardet et al. 2000), sono state condotte adottando il profilo delle velocità delle onde di taglio e le curve di decadimento del modulo di rigidezza a taglio normalizzato e del fattore di smorzamento implementati nel modello SANISAND (Fig. 1a, b).

I confronti dei risultati delle analisi non lineari e lineari equivalenti sono mostrati in termini di spettri di Fourier della risposta ottenuta in corrispondenza di un punto a 5 m di profondità dal piano campagna (Fig. 2) e di profili delle accelerazioni massime con la profondità (Fig. 3) per i diversi segnali di input considerati. Inoltre, in Fig. 4 sono riportate le curve tensioni-deformazioni di taglio τ - γ ottenute con le analisi non lineari e le analisi lineari equivalenti, insieme ai diagrammi dei percorsi tensionali efficaci q - p' , questi ultimi con riferimento alle sole analisi agli elementi finiti.

Con riferimento al segnale di input meno intenso (0.05g), si osserva un buon accordo tra la risposta ottenuta con il modello costitutivo avanzato e quella ottenuta con l'approccio lineare equivalente sia in termini di ampiezze che in termini di contenuto in frequenza (Figura 2a). Tale accordo è confermato dai profili delle accelerazioni massime al variare della profondità (Figura 3a).

All'aumentare dell'intensità del segnale sismico alla base, si osserva un maggiore scostamento tra le due previsioni in termini di ampiezze di Fourier (Fig. 2b, c) e di accelerazioni massime al variare della profondità (Fig. 3b, c). Ciò è ascrivibile da una parte alla maggiore capacità dissipativa del modello costitutivo, per il quale il comportamento è caratterizzato da una risposta plastica ed irreversibile associata ad un maggiore livello deformativo indotto dagli eventi sismici, e dall'altra alla natura delle soluzioni numeriche adottate. Infatti, mentre l'approccio lineare equivalente lavora nel dominio delle frequenze e la risposta è determinata in funzione del livello di deformazione medio indotto dall'evento

sismico, l'analisi non lineare tiene conto dell'evoluzione della rigidezza a taglio e dello smorzamento al variare dell'effettivo livello di deformazione.

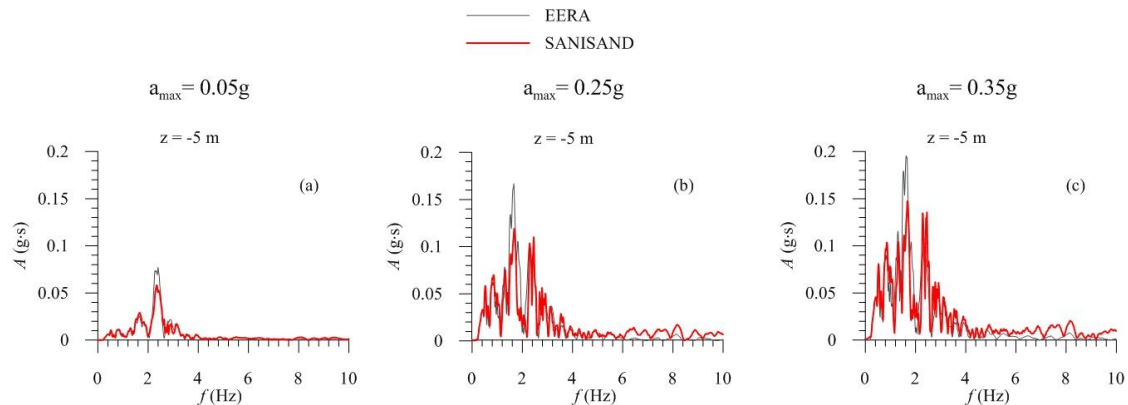


Fig 2. Confronto tra i risultati ottenuti con EERA e PLAXIS in termini di spettri di Fourier per un punto alla profondità di 5 m dal piano campagna con riferimento al segnale di input scalato a (a) 0.05g, (b) 0.25g e (c) 0.35g

Quanto detto è confermato dalle curve tensioni-deformazioni di taglio, riportate in Fig. 4a, c, e, che presentano, nel caso delle analisi agli elementi finiti, dei cicli di ampiezza più elevata, cui è associata una maggiore aliquota di energia dissipata durante il ciclo. E' opportuno osservare che, una volta raggiunta la massima deformazione indotta dall'evento sismico, nel successivo intervallo temporale il modello esibisce cicli isteretici caratterizzati da una rigidezza media compatibile con quella osservata con l'approccio lineare equivalente; il modello infatti recupera la rigidezza all'inversione. Inoltre, all'aumentare dell'intensità del segnale sismico di input, il materiale mostra una tendenza a dilatare, come illustrato in Fig. 4b, d, f, in cui i percorsi tensionali efficaci sono caratterizzati da un aumento della pressione media efficace p' , cui è associato lo sviluppo di sovrappressioni interstiziali negative, durante l'intervallo temporale in cui il segnale è caratterizzato da ampiezze significative. La pressione media efficace torna a ridursi negli istanti di tempo successivi.

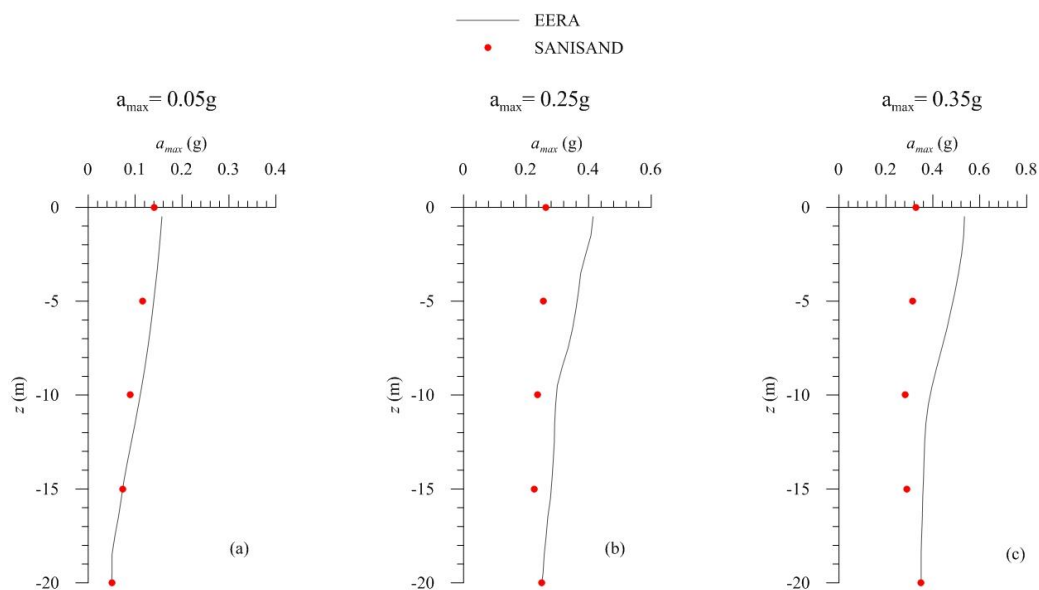


Fig 3. Confronto dei profili delle accelerazioni massime con la profondità ottenuti con EERA e PLAXIS con riferimento al segnale di input scalato a (a) 0.05g, (b) 0.25g e (c) 0.35g

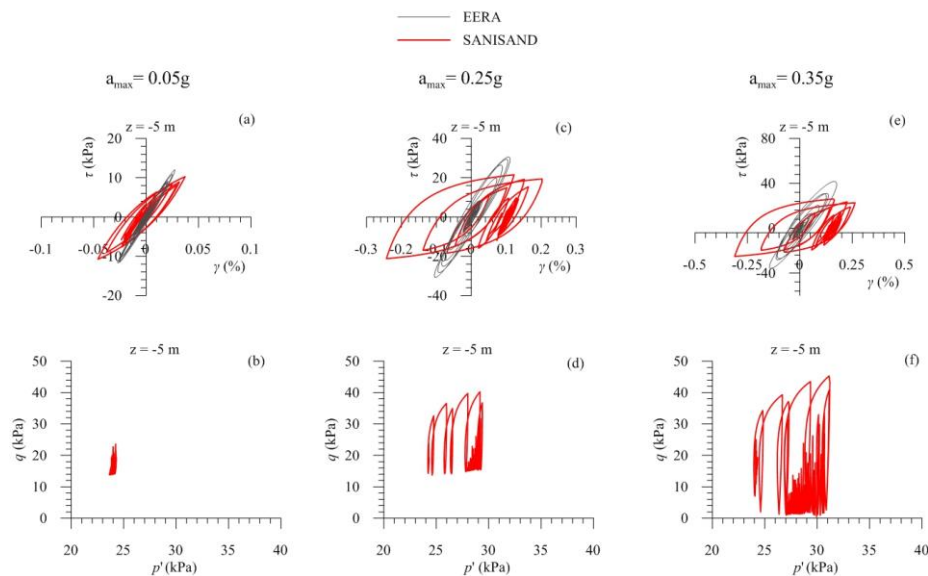


Fig 4. Curve tensioni-deformazioni di taglio ottenuti con EERA e PLAXIS e percorsi tensionali efficaci relativi ad un punto alla profondità di 5 m dal piano campagna con riferimento ai segnali di input scalati a (a, b) 0.05g, (c, d) 0.25g e (e, f) 0.35g

5. Conclusioni

Il presente lavoro illustra la risposta costitutiva del modello *bounding surface* per sabbie SANISAND, implementato nel codice di calcolo commerciale agli elementi finiti PLAXIS 3D. La risposta ciclica del modello costitutivo è confrontata con quella ottenuta da prove sperimentali condotte sulla sabbia di Toyoura. I parametri del modello SANISAND sono stati ricalibrati, rispetto a quelli adottati da Dafalias e Manzari (2004), per simulare la risposta alle grandi deformazioni, con l'obiettivo di cogliere in maniera più accurata la risposta ciclica nel campo delle piccole e medie deformazioni. Dal confronto si è evinto che la formulazione costitutiva, così come proposta attualmente, presenta un limite legato al fatto che non è possibile simulare la risposta meccanica alle piccole, medie e grandi deformazioni adottando un unico gruppo di parametri. La simulazione numerica della risposta sismica locale ha messo in luce l'adottabilità del modello costitutivo per studiare problemi di natura dinamica, garantendo la possibilità di osservare fenomeni non prevedibili con il più comunemente utilizzati approccio lineare equivalente.

Bibliografia

- Amorosi, A., Boldini, D., Elia, G., 2010. "Parametric study on seismic ground response by finite element modelling". *Computers and Geotechnics*, 37 (4), 515–528.
- Amorosi, A., Boldini, D., di Lernia, A., Rollo F., 2017. "Previsione del comportamento ciclico di sabbie alle piccole, medie e grandi deformazioni mediante un modello bounding surface". XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica
- Bardet, J.P., Ichii, K., Lin, C.H., 2000. "EERA: A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits"
- Been, K., Jefferies, M.G., 1985. "A state parameter for sands". *Géotechnique*, 35 (2), 99–112
- Dafalias, Y.F., Manzari, M.T., 2004. "Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects", *Journal of Engineering Mechanics* (ASCE), 130 (6), 622–634
- Kokusho, T., 1980. "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range". *Soils and Foundations*, 20 (2), 45–60
- Verdugo, R., Ishihara, K., 1996. "The steady state of sandy soils". *Soils and Foundations*, 36 (2), 81–91