

CONSIDERAZIONI SULL'UTILIZZO DI QUAD4M NELLA STIMA DEGLI EFFETTI DI SITO

Johann Facciorusso
Università di Firenze
johannf@dicea.unifi.it

Claudia Madiati
Università di Firenze
clau@dicea.unifi.it

Sommario

La memoria presenta i primi risultati di una sperimentazione numerica condotta per stabilire come i codici di calcolo disponibili per le analisi di risposta sismica locale bidimensionali interpretano e riproducono gli effetti legati alla dimensionalità del problema. Tra i codici disponibili è stato considerato quello che è attualmente il più diffuso (QUAD4M). Nell'ambito della sperimentazione ad oggi effettuata sono stati approfonditi due aspetti dell'analisi: le modalità di trasmissione del moto dal substrato rigido al deposito e l'entità degli effetti di bordo in relazione ad alcuni parametri geometrici e meccanici del deposito ritenuti significativi.

Introduzione

Come è noto, il moto sismico in superficie, in un determinato sito, è il risultato della natura e dell'ubicazione della sorgente, e delle modifiche che le onde sismiche subiscono interagendo con i mezzi attraversati nel loro cammino dalla sorgente fino alla superficie. Il percorso di propagazione, in genere, si svolge prevalentemente all'interno della parte rocciosa della crosta terrestre (*substrato o "bedrock"*), che comunque può presentare al suo interno stratificazioni e livelli di fratturazione e/o di alterazione (con conseguenti variazioni e/o inversioni di velocità), e, solo nel tratto finale, attraversa, laddove presenti, gli strati di terreno più superficiali. Anche supponendo note la posizione e il meccanismo di sorgente, appare alquanto difficile, se non ricorrendo a complessi codici di calcolo, definire con precisione i fenomeni di riflessione, rifrazione e in generale di smorzamento che le onde sismiche subiscono nel substrato roccioso, specie se si considera la lunghezza del percorso e le elevate profondità coinvolte, che, in genere, non consentono una adeguata e approfondita conoscenza delle proprietà del substrato. D'altra parte, nonostante le onde sismiche attraversino anche decine di chilometri di roccia e spesso meno di un centinaio di metri di terreno, è proprio quest'ultimo che influenza in maniera determinante le caratteristiche del moto sismico in superficie. Per tale ragione appare più appropriato, specie da un punto di vista ingegneristico, procedere in maniera "inversa", partendo dal moto sismico registrato (o comunque stimato con adeguati studi di pericolosità sismica di base) in superficie, preferibilmente su roccia o terreno rigido di riferimento in prossimità del sito in esame e ricavando da questo, mediante "deconvoluzione", il moto sismico in corrispondenza del bedrock, tenendo conto della presenza del terreno sovrastante, le cui proprietà, date le minori profondità in gioco, sono più facilmente determinabili. In tal modo, l'analisi di risposta sismica locale (RSL) si riduce a studiare le "sole" modifiche che il moto sismico subisce nel suo tratto finale di propagazione attraverso gli strati di terreno che costituiscono il deposito.

I codici di calcolo più comunemente utilizzati consentono sia di assegnare direttamente il

moto sismico in superficie su terreno rigido di riferimento (che viene successivamente deconvoluto) sia di applicare il moto, qualora fosse noto, in corrispondenza del bedrock (sismico), ovvero alla base del deposito.

Nel caso specifico delle analisi bidimensionali (2-D), per le quali si utilizzano codici di calcolo più complessi e quindi informazioni più dettagliate sulla geometria degli strati e sulle loro caratteristiche meccaniche, si pongono una serie di problemi connessi alla dimensionalità del problema e che riguardano l'interazione tra le onde sismiche e la geometria sepolta (rifrazione e riflessione delle onde sismiche) e superficiale (generazione delle onde sismiche superficiali) del deposito. Tutto ciò determina una risposta del terreno che può variare lungo la sezione analizzata e che può differenziarsi, anche sensibilmente, rispetto al caso monodimensionale (1-D), specie in prossimità dei bordi della valle (*effetti di bordo*) o laddove la geometria presenta le maggiori complessità (a causa di faglie o discontinuità).

La questione importante è dunque stabilire come i codici di calcolo disponibili per le analisi di RSL 2-D interpretano e riproducono tali effetti. A questo scopo è in corso un intenso programma di sperimentazione numerica condotta utilizzando uno dei codici di calcolo 2-D attualmente più diffusi, il programma *QUAD4M* (Hudson et al., 1994).

QUAD4m

Per schematizzare la sezione del deposito lungo la quale si intende valutare la RSL, il codice di calcolo *QUAD4M* utilizza un modello ad elementi finiti (FEM), a masse concentrate. Per schematizzare il comportamento del terreno è assunto un legame tensioni-deformazioni di tipo visco-elastico lineare (*modello di Kelvin-Voigt*). La variazione della rigidezza e dello smorzamento, con il livello di deformazione raggiunto, vengono tenuti in conto applicando, nella risoluzione delle equazioni differenziali del moto per ciascun nodo, il *metodo lineare equivalente* secondo lo schema di fig.1. Il sistema di equazioni così ottenuto viene risolto nel dominio del tempo ed in termini di tensioni totali (ovvero senza considerare l'eventuale incremento di sovrappressioni interstiziali correlato e i fenomeni di decadimento e degradazione ad esso associati).

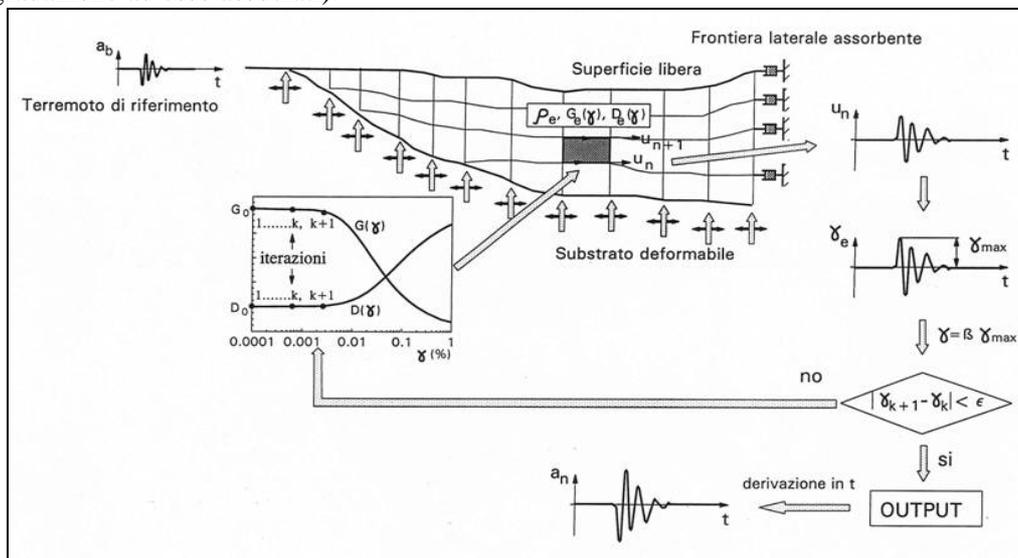


Figura 1. Schema di funzionamento di *QUAD4M*

Il substrato alla base del deposito viene schematizzato come un mezzo deformabile con comportamento elastico lineare in modo da simulare il passaggio e lo scambio delle onde che effettivamente avviene tra i due mezzi attraverso il fenomeno della rifrazione (con conseguente smorzamento dell'energia sismica). I nodi di frontiera al contatto tra substrato e base del deposito (*buried bedrock*) possono essere assunti come "nodi trasmittenti"

(*transmitting nodes*), ovvero come nodi che trasmettono al deposito il moto sismico che proviene dal substrato e che il codice ottiene mediante deconvoluzione a partire dal moto sismico di input, assunto su substrato affiorante (*outcropping input*). In alternativa, si possono assumere all'interno del substrato, alle profondità desiderate, dei "nodi di input" (*input nodes*) in corrispondenza dei quali viene direttamente applicato il moto sismico (*inside input*).

I parametri che il programma richiede sono:

- la geometria superficiale e sepolta del deposito,
- la successione e lo spessore degli strati all'interno del deposito,
- le caratteristiche fisiche degli strati in termini di densità, ρ_i ,
- le caratteristiche meccaniche degli strati in termini di velocità delle onde di taglio, V_{si} , coefficiente di Poisson, ν_i , e rapporto di smorzamento iniziale, D_{0i} ,
- le leggi di variazione con la deformazione di taglio γ del modulo di rigidezza a taglio, G , e del rapporto di smorzamento D per ciascuno degli strati,
- le caratteristiche fisiche e meccaniche del bedrock in termini, rispettivamente, di densità, ρ_b e velocità V_{sb} ,
- il moto sismico di input da assegnare su terreno di rigido di riferimento affiorante ("*outcropping input*") o ai nodi alla base del deposito ("*inside input*").

Aspetti approfonditi

Nell'ambito della sperimentazione sono stati approfonditi due aspetti dell'analisi della RSL 2-D con specifico riferimento all'utilizzo di QUAD4M:

- le modalità di trasmissione del moto al deposito
- l'entità degli effetti di bordo in relazione ad alcuni parametri geometrici e meccanici del deposito ritenuti significativi.

Per quanto riguarda il primo punto (fig.2), è stata prima valutata la RSL assumendo i nodi in corrispondenza della frontiera tra deposito e substrato (*buried bedrock*) come nodi di trasmissione del moto sismico ed assegnando il moto sismico di input su bedrock affiorante (*caso a: "Transmitting nodes-outcropping input"*). Quindi si è valutato l'effetto che si ottiene sulla RSL, sia in superficie che alla base del deposito, applicando direttamente il moto sismico di input a differenti profondità all'interno del substrato (*caso b: input nodes and inside input*). Tale accorgimento viene spesso adottato nella modellazione per regolarizzare la geometria della frontiera (e rendere quindi il moto di input uniforme lungo la base) e introdurre una "distanza di sicurezza" tra la frontiera effettiva e quella a cui viene invece applicato l'input.

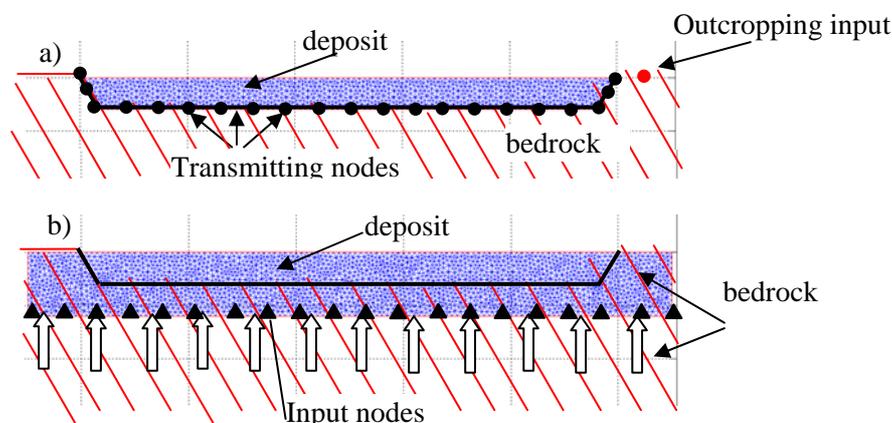


Figura 2. Schemi di applicazione dell'input considerati: *transmitting nodes-outcropping input* (a), *input nodes-inside input* (b)

In merito al secondo punto, è stata determinata l'influenza della geometria del deposito, della stratigrafia e della rigidità degli strati, dell'intensità del moto sismico di input (correlata alle soglie di deformazione elastica dei materiali) sugli effetti di bordo, stimati a partire dal confronto tra la risposta sismica superficiale del deposito secondo il modello 1-D (centro della valle) e la risposta ottenuta dalla modellazione 2-D lungo la sezione analizzata.

Programma di sperimentazione

Per analizzare separatamente le due problematiche sopra descritte, la sperimentazione è stata suddivisa in due fasi.

In una prima fase, non interessando gli effetti di bordo, si è assunto un deposito omogeneo con una geometria di tipo 1-D, ovvero rettangolare con una lunghezza L molto superiore allo spessore H ($H/L = 0.06$), quindi, sono stati considerati i due casi: a) nodi trasmettenti alla base del deposito con moto sismico di input assegnato su substrato affiorante (input di riferimento); b) input ottenuto a partire dal moto di riferimento mediante deconvoluzione 1-D e direttamente applicato all'interno del substrato a profondità maggiori dello spessore del deposito ($Z = -2H, -4H$). In quest'ultimo caso, al materiale che si trova tra la base del deposito e i nodi di input sono state attribuite le stesse proprietà del substrato e comportamento elastico lineare. Inoltre, la larghezza L della sezione è stata modificata in modo da conservare lo stesso rapporto H/L del caso a. In entrambi i casi, l'input sismico di riferimento, la sua accelerazione massima (a_g) e le leggi di variazione di G e D con γ , sono stati scelti in modo che il rapporto tra la deformazione di taglio efficace indotta, γ_{eff} , e la soglia elastica lineare del materiale, γ_l , fosse maggiore di 1 ($a_g = 0.2 g$; $\gamma_l = 0.011$; $\gamma_{eff} = 0.024$). Nelle analisi sono stati inoltre ipotizzati differenti valori del rapporto di impedenza I tra substrato e deposito ($I = 1.5, 2.5$ e 3.5). I casi complessivamente analizzati sono 12 e riassunti in tab.1.

Tabella 1. Casi considerati nella prima fase della sperimentazione.

Caso	Tipo di input	Larghezza [m]	Profondità dell'input	I
1	outcropping	L	-	2.5
2	inside	L	-2H	2.5
3	inside	L	-4H	2.5
4	inside	2L	-4H	2.5
5	outcropping	L	-	3.5
6	inside	L	-2H	3.5
7	inside	L	-4H	3.5
8	inside	2L	-4H	3.5
9	outcropping	L	-	1.5
10	inside	L	-2H	1.5
11	inside	L	-4H	1.5
12	inside	2L	-4H	1.5

Per la seconda fase della sperimentazione, si è assunta per la sezione una forma regolare e simmetrica (fig. 3) ed è stata valutata la RSL in superficie al variare della geometria della sezione (ovvero del rapporto $H/L = 0.06, 0.12, 0.24$ e della pendenza $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$), del rapporto di impedenza tra la base del deposito e il substrato ($I = 1.5, 2.5, 3.5$) e della stratigrafia. Quest'ultima è stata schematizzata secondo tre profili di velocità delle onde S (fig. 3): uno con andamento uniforme (A), uno crescente con la profondità (B) ed uno con inversione di velocità (C), scelti in modo da considerare tutte le categorie di terreno previste dalle normative nella definizione dell'azione sismica (D.M. 14/1/2008, EC8). Per descrivere il decadimento del materiale è stata assunta una legge di variazione unica per tutti gli strati relativa ad argille di media plasticità (Vucetic e Dobry, 1991), lo stesso dicasi per la densità ($\rho = 18 \text{ t/m}^3$) e per il rapporto di smorzamento iniziale ($D_0 = 2.5\%$). Infine si è tenuto conto

dell'intensità del moto sismico di input in relazione alla legge di decadimento adottata per il materiale, facendo variare il rapporto $\gamma_{\text{eff}}/\gamma_1$ (0.5, 1, 2).

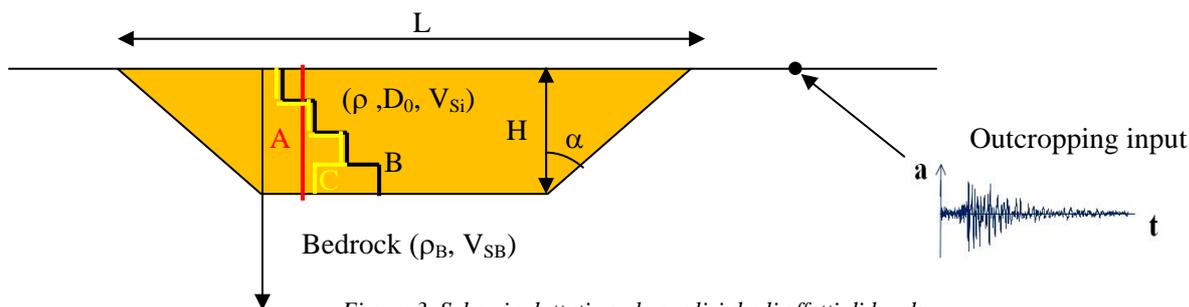


Figura 3. Schemi adottati per le analisi degli effetti di bordo

Analisi dei primi risultati

Nella presente memoria vengono illustrati i soli risultati relativi alla prima fase di sperimentazione. Tali risultati sono stati interpretati nel dominio del tempo e delle frequenze e riportati per ciascun nodo della frontiera, ubicata al contatto tra substrato e deposito, in termini di parametri significativi del moto sismico (picco di accelerazione massima, PGA, intensità di Arias, I_a , intensità di Housner calcolata negli intervalli di periodi [0-0.5 Hz], I_{H1} , e [0.5 – 1Hz], I_{H2}) e, per i nodi superficiali, in termini di fattori di amplificazione, calcolati, rispetto al moto sismico di riferimento (su affioramento rigido), in termini di PGA, I_H e dei fattori F_a e F_v suggeriti in *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Per un confronto più immediato tra i 12 casi riportati in Tab.1, i valori ottenuti dalla modellazione 2-D sono stati normalizzati rispetto ai corrispondenti valori ottenuti dalla modellazione 1-D (eseguita utilizzando il codice di calcolo EERA) e quindi mediati tra loro. I valori normalizzati medi dei parametri del moto sismico e dei fattori di amplificazione sono infine riportati, al variare del rapporto di impedenza e delle modalità di applicazione dell'input, rispettivamente nelle figg. 4 e 5, con riferimento, per ragioni di simmetria, a metà della sezione. Per quanto riguarda la base del deposito, data la geometria particolarmente semplificata della sezione, il moto sismico proveniente dal substrato dovrebbe risultare uniforme, tranne che in prossimità delle estremità, dove non avendo imposto alcun vincolo nella modellazione si generano inevitabilmente onde riflesse il cui contributo, comunque, si riduce allontanandosi dai bordi. Lo stesso si può affermare per il fattore di amplificazione stimato in superficie. Da un esame più approfondito delle figure 4 e 5 emerge che:

- nel caso (a) (*outcropping input and transmitting nodes*) il moto sismico è effettivamente uniforme su gran parte della base della sezione (tranne che alle estremità per un lunghezza di circa $L/10$) e pari a quello ottenuto dall'analisi 1-D; questo indipendentemente dal rapporto di impedenza adottato. Analoghe considerazioni valgono per il fattore di amplificazione medio lungo la superficie;
- nel caso (b) (*inside input and input nodes*) il moto sismico al bedrock sepolto, così come il fattore di amplificazione in superficie, appare molto più variabile anche al centro della sezione e differisce, fino e oltre il 40%, dal corrispondente valore 1-D; tale effetto si accentua all'aumentare della profondità dei nodi in cui è applicato l'input e sembra dipendere sensibilmente dal rapporto di impedenza (specie per profondità elevate);
- se con la profondità dei nodi in cui è applicato l'input, viene aumentata anche la larghezza della sezione (in modo da rispettare il valore iniziale del rapporto H/L), si ottiene un andamento più simile a quello riscontrato nel caso a), anche se la risposta pare sempre sottostimata rispetto al caso 1D.

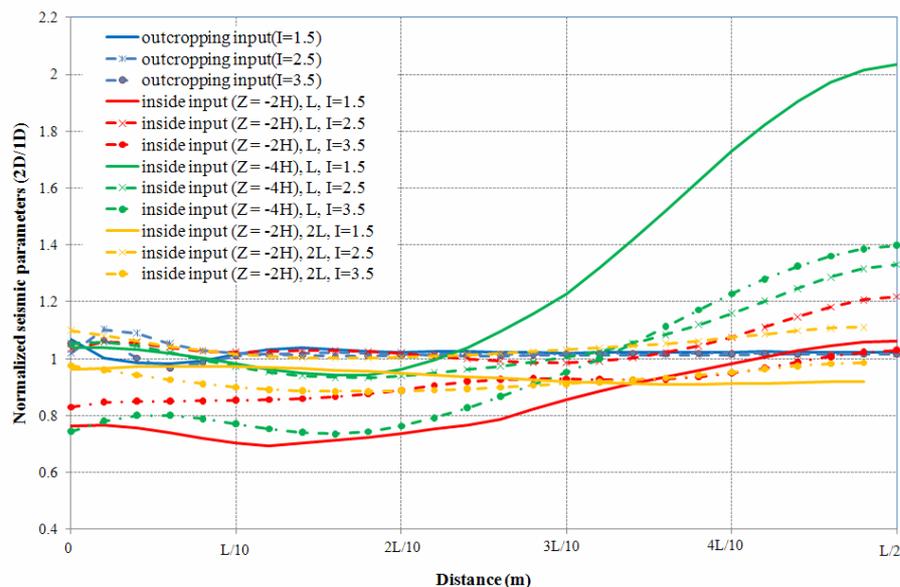


Figura 4. Valore medio normalizzato (rispetto al caso 1-D) dei parametri sismici calcolati lungo la base del deposito (bedrock sepolto) per ciascuno dei casi considerati

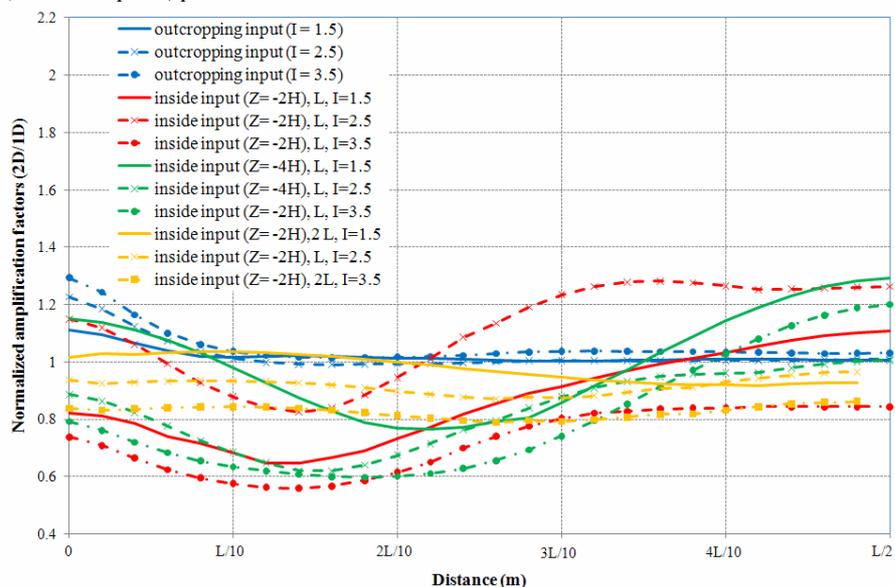


Figura 5. Valore medio normalizzato (rispetto al caso 1-D) dei fattori di amplificazione calcolati lungo la superficie del deposito per ciascuno dei casi considerati

Bibliografia

- D.M. 14/1/2008. Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008: Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture. G.U. n. 29 del 4/2/2008 – Serie Generale, Suppl. Ord. n. 30.
- EC8 - Part 1. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. December 2003.
- Gruppo di lavoro MS (2008). Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica, Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma (2008), 3 vol. e 1 Cd-rom.
- Hudson, M.B., Beikae, M., Idriss, I.M. (1994). QUAD4M, a Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures Using Finite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.