Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Centro di Ricerche Sismologiche di Udine



Progetto S3

Studio dell'interazione tra suolo-edificato nel comune di Bonefro



Rapporto redatto da: Giovanna Laurenzano e Enrico Priolo Il Direttore del Dipartimento CRS: Dr. E. Priolo



REL. 2006/90-CRS 22 MODES d.d. 21/10/2006

Introduzione

Questo studio, svolto nell'ambito progetto sismologico S3 - Scenari di scuotimento in aree di interesse prioritario e/o strategico previsto dal piano di attività della Convenzione 2004-2006 tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e la Direzione Nazionale della Protezione Civile INGV – DPC S3 (2004 -2006), si pone l'obiettivo di evidenziare possibili effetti sul moto del suolo durante un terremoto dovuti all'interazione tra suolo ed edifici presenti nonché all'interazione tra più edifici vicini. Il caso affrontato è quello di due edifici in cemento armato siti nel comune di Bonefro (CB) su suolo argilloso. I due edifici, adiacenti, simili per forma, ma diversi per altezza (uno di 4 e l'altro di 3 piani), subirono danni differenti durante la sequenza sismica occorsa in Molise nell'anno 2002. In particolare, l'edificio a quattro piani subì gravi danni strutturali (EMS=4), mentre l'edificio a tre piani subì solamente lievi danni non strutturali (EMS=2). Uno studio (Mucciarelli et al., 2004) basato sulla registrazione del secondo evento più forte della sequenza del 2002, e cioè l'evento M=5.3 del 1-11-2002, acquisita fortuitamente sull'edificio più lesionato, ipotizza l'interazione tra suolo ed edifici come possibile causa tra le differenze di danno osservate. Le misure eseguite nello studio (Mucciarelli et al., 2004) mostrano che la frequenza naturale di vibrazione fo dell'edificio maggiormente lesionato è compresa nella banda 2.5-3.2 Hz, e che questa si abbassa arrivando fino a circa 1.3 Hz durante l'eccitazione sismica violenta dell'aftershock maggiore. L'edificio più basso invece evidenzia nei rapporto spettrale tra le due componenti orizzontali e quella verticale del moto (HVSR) dei picchi corrispondenti a circa 4 Hz in una delle due componenti, e a 2.5 e 5 Hz nell'altra. Le misure eseguite in campo libero sul suolo argilloso indicano che la frequenza fondamentale del sito e' di circa 2.5 Hz, molto vicina quindi alla f0 dell'edificio a tre piani, avvalorando l'ipotesi di un effetto di risonanza tra suolo e struttura per giustificare il danneggiamento.

Per investigare più a fondo l'ipotesi di interazione tra suolo ed edifici ci si è avvalsi, nel presente studio, della modellazione numerica del campo d'onda sismico. La modellazione è effettuata con il metodo 2-D agli elementi spettrali di Chebyshev (SPEM 2-D; Priolo, 2001 e 2002). Il metodo si presta bene a risolvere gli effetti della propagazione attraverso una struttura geologica realistica con topografia anche irregolare, descritta in termini di velocità delle onde e di attenuazione, e risolve simultaneamente la sorgente e la propagazione del campo d'onda sismico fino alla superficie.

Parametrizzazione del modello e della sorgente

Al fine di comprendere l'effetto della presenza degli edifici e la loro interazione sono stati costruiti tre differenti modelli: il primo, modello 0 rappresenta la struttura geologica senza le costruzioni (Figura 1, in alto a destra); il secondo, modello 1, pone alla superficie un solo edificio, il più alto, che è quello che subì maggiori danni durante il terremoto (Figura 1, in basso a destra); il terzo infine, modello 2, simula la presenza di entrambi gli edifici (Figura 1, a sinistra). La dimensione complessiva del modello di calcolo è di circa 2 km di larghezza per 600-700 m di profondità (Figura 1).

Il modello strutturale costruito lungo la sezione, e' stato suddiviso, dal punto di vista fisico, in sottodomini caratterizzati da diversi valori dei parametri: densità, velocità delle onde di corpo e di taglio (Vp e Vs) e fattore di attenuazione Q. La Figura 2 e la Figura 3 mostrano la distribuzione della velocità delle onde di taglio Vs nei diversi sottodomini per il modello con i due edifici. Il suolo argilloso è caratterizzato da un gradiente di velocità pressoché costante da valori da 100 m/s in superficie a 400 m/s. Un forte contrasto di impedenza è presente al contatto dei suoli con il bedrock sottostante (costituito da marne), ad una profondità di circa 30 m. Tale profilo è stato ottenuto da un'analisi ad array di rumore ambientale (Mucciarelli et al., 2004). I due edifici sono stati rappresentati nel modello 2 –D come rettangoli con base di uguale lunghezza (21 m) e diversa altezza. Considerando le fondazioni i due edifici sono alti rispettivamente 12 e 15 m. I valori di densità nel bedrock, nel suolo argilloso e negli edifici sono rispettivamente 2500, 1500 e 300 kg/m³. In Figura 4 é rappresentata la discretizzazione ad elementi spettrali usata per la modellazione. Si noti la variabilità di forma e dimensioni degli elementi (la griglia si infittisce nel dominio più superficiale, a velocità più basse). Gli edifici sono stati discretizzati tramite una maglia regolare di passo di 3 m. Ai bordi esterni del modello sono applicate delle fasce assorbenti in cui l'onda viene progressivamente attenuata per evitare la riflessione dai bordi esterni del domino di calcolo. Il risultante modello computazionale ha circa 5500 elementi.

Il campo d'onda che simula l'eccitazione sismica corrisponde ad un'onda piana con incidenza verticale. Esso è generato con una linea orizzontale di sorgenti poste a 200 metri di profondità al di sotto degli edifici (Figura 5, a destra). La storia temporale della sorgente è un impulso di Ricker, con frequenza di picco pari a 4 Hz (Figura 5, a sinistra). I sismogrammi sono calcolati per una lunghezza pari a T=10.24 s e successivamente sono filtrati con un filtro passa basso con frequenza di taglio a 10 Hz, che rappresenta la frequenza massima di interesse per questo studio.

Risultati delle modellazioni

Le analisi sono state eseguite considerando sia le istantanee del campo d'onda sia i sismogrammi calcolati su diverse litologie di suolo in campo libero e in vari punti sugli edifici. Il moto del suolo è stato calcolato in diverse posizioni sia in campo libero, sulle diverse litologie di suolo (sulle argille e sul bedrock), sul suolo in mezzo ai due edifici, in cima, all'interno ed alla base degli edifici stessi.

E' stata verificata la corrispondenza del modello di velocità utilizzato nella modellazione numerica nei primi 30 metri (per il suolo argilloso) con la frequenza di risonanza ottenuta dal calcolo dei rapporti spettrali HVSR da rumore ambientale e terremoti (Mucciarelli et al, 2004). I rapporti tra gli spettri di ampiezza di sismogrammi sintetici calcolati sul suolo argilloso e quelli calcolati sul bedrock, nel modello senza edifici (Figura 6), presentano sia nella componente orizzontale radiale P-SV sia quella orizzontale trasversale SH un picco in corrispondenza della frequenza di 2.6 Hz, compatibile con la frequenza di picco dei rapporti spettrali H/V da rumore ambientale e terremoti osservati nel sito sul suolo argilloso.

La Figura 7 mostra i sismogrammi di accelerazione calcolati in superficie con e senza i due edifici. Sono segnati in rosso i sismogrammi calcolati in cima alle due costruzioni, in modo da evidenziare direttamente la variazioni del campo d'onda provocato dalla presenza degli edifici stessi. Le diversità nelle caratteristiche del campo d'onda in presenza o meno degli edifici sono qualitativamente osservabili anche dalle istantanee del campo d'onda (Figura 8). Nel caso della

presenza di uno o entrambi gli edifici (simulazioni 1 e 2) il campo d'onda rimane intrappolato all'interno degli edifici, oltre che all'interno dei suoli argillosi, e l'energia rilasciata gradualmente aumenta la durata dei sismogrammi nell'area in cui sono costruiti gli edifici rispetto a quanto avviene nel modello senza edifici (simulazione 0).

In Figura 9 sono rappresentate le istantanee del campo d'onda lungo gli edifici e nella zona immediatamente circostante: questo permette di valutare visivamente i modi di vibrazione con cui le due strutture oscillano nonché le frequenze e fasi differenti.

Le caratteristiche spettrali del moto del suolo simulato sono evidenziate tramite i rapporti degli spettri di Fourier in ampiezza ottenuti in cima agli edifici nella simulazione 2 con quelli ottenuti in superficie nella stesse posizioni nella simulazione 0 (senza edifici) (Figura 10). Per l'edificio di tre piani gli spettri di ampiezza calcolati per le due componenti mostrano un doppio picco a circa 3 e 4 Hz, mentre i rapporti spettrali sono caratterizzati da un picco a 3.6 Hz nella componente radiale e uno a 3.9 Hz nella componente trasversale. L'edificio a quattro piani mostra invece, nello spettro di ampiezza, un picco marcato a circa 2.4 Hz in ambedue le componenti (quindi una frequenza fondamentale molto vicina a quella di risonanza del sito); mentre nei rapporti spettrali si ha un picco a 2.4 Hz nella sola componente radiale ed un'amplificazione generale nella banda 2-4 Hz, con picco massimo a 3.7 Hz nella componete trasversale.

Al fine di valutare l'interazione edificio-edificio, confrontiamo i rapporti tra gli spettri di Fourier ottenuti in cima all'edificio a quattro piani nella simulazione 2 e in superficie nella simulazione 0 (Figura 10, a destra) con quelli ottenuti sullo stesso edificio nella simulazione 1 sempre rispetto alla simulazione 0 (Figura 11, a sinistra). Dal confronto emerge che in entrambe le componenti della simulazione 1 manca il picco a quasi 4 Hz, presente invece nella simulazione 2. Ciò suggerisce quindi la presenza di un effetto di interazione tra i due edifici, più in particolare, il picco a 4 Hz nell'edificio alto sarebbe una conseguenza dell'oscillazione del edificio più basso. Una conferma di ciò si ha confrontando i rapporti spettrali calcolati sullo stesso edificio nella simulazione 2 e nella simulazione 1 (Figura 11, a destra). I rapporti spettrali evidenziano effettivamente un picco a 4 Hz, in ambedue le componenti, confermando questa ipotesi. E' interessante notare che l'analisi tramite la Wavelet Tranform eseguite nello studio (Mucciarelli et al., 2004) sulla registrazione acquisita nell'edificio più alto, hanno evidenziato un secondo picco proprio a 4 Hz che era stato però interpretato come un modo superiore di vibrazione dell'edificio.

La Figura 12 mette a confronto i sismogrammi ottenuti per le simulazioni 0 e 2 in siti sul suolo argilloso posti a sinistra e a destra della posizione degli edifici. I rapporti spettrali presentano nei due casi picchi a frequenze diverse, e più precisamente di circa 4-5 Hz a sinistra dell'edificio a tre piani e a 3.5-3.9 Hz a destra di quello a quattro piani. Quindi i due edifici influiscono in modo diverso anche sul free-field circostante. La stessa analisi effettuata su siti posti a sinistra e a destra dei due edifici, ma sul bedrock (Figura 13) evidenzia dei rapporti spettrali praticamente piatti (ed unitari) per ambedue le configurazioni, indicando che, a quelle distanze (> 100 m) e su quella litologia la presenza degli edifici non modifica in modo sostanziale il campo d'onda sismico.

Conclusioni

Sono state effettuate delle simulazioni numeriche 2D per analizzare gli effetti sul moto del suolo dovuti all'interazione suolo-struttura e struttura-struttura nel caso reale di due edifici siti nel comune di Bonefro (CB). Il caso é interessante perché per uno dei due edifici, il più lesionato del terremoto del Molise del 2002, sono disponibili i dati di alcuni aftershocks della medesima sequenza registrati da un accelerometro installato sull'edificio stesso subito dopo la scossa principale (Mucciarelli et al., 2004). In sintesi, questo studio dimostra che:

- l'edificio lesionato ha una frequenza naturale di vibrazione simile a quella del suolo argilloso su cui è costruito (*f*₀ ≈ 2.5 Hz), mentre quello meno lesionato ha una frequenza propria superiore;
- esiste un effetto di amplificazione spettrale dovuto alla presenza degli edifici e alla loro interazione durante l'eccitazione sismica, che si manifesta in prossimità egli edifici. In particolare, la risposta dell'edificio più grande mostra un forte picco di amplificazione alla frequenza fondamentale ($f_0 \approx 2.5$ Hz, che corrisponde anche a quella del suolo), mentre l'edificio più piccolo induce una amplificazione del moto nell'edificio più grande nei modi superiori.

Sono dunque confermati e spiegati con maggior dettaglio i risultati emersi dal precedente studio sperimentale basato sulle registrazioni accelerometriche da cui risulta che l'interazione della vibrazione propria della struttura con il suolo su cui è edificata può aver avuto un ruolo fondamentale nel danneggiamento dell'edifico più alto.

Bibliografia

- Mucciarelli, M., Masi, A., Gallipoli, M.R., Harabaglia, P., Vona, M., Ponzo, F., and Dolce, M. 2004. Analysis of RC building dynamic response and soil-building resonance based on data recorded during a damaging earthquake (Molise, Italy, 2002). BSSA, 94 (5), 1943-1953.
- Priolo, E., 2001. Earthquake ground motion simulation through the 2-D spectral element method. J. Comp. Acoustics, 9 (4), 1561-1581.
- Priolo, E., 2002. Ground Motion Modelling Using the 2-D Chebyshev Spectral Element Method. Numerical Analysis and Modeling in Geomechanics. Editor Dr. John W. Bull Spon Press. Taylor and Francis Group Ltd., London



Figura 1. In alto: estratto della carta tecnica regionale di Bonefro. La linea rossa tratteggiata indica la sezione individuata per la modellazione. In basso: struttura dei modelli, a sinistra modello con edifici (simulazione 2); a destra in alto modello senza edifici (simulazione 0), in basso modello con il solo edificio a quattro piani (simulazione 1). Le dimensioni sono in metri.



Figura 2. Valori di velocità Vs nel modello 2. Modello intero in basso e ingrandimento in prossimità della superficie in alto.



	ρ	Vs	Q
	(kg/m^3)	(m/s)	
edifici	300	170	20
suolo	1500-	100-	15-
argilloso	1800	400	25
bedrock	2500	1500	100

Figura 3. Valori di velocità Vs nella parte più superficiale del modello. In alto ed in basso: simulazioni 2 e 0, rispettivamente. Nella tabella sono indicati i valori di densità, Vs e fattore di qualità Q in ogni sottodominio.



Figura 4. Discretizzazione ad elementi spettrali usata per la modellazione. In alto è rappresentato l'intero modello computazionale, in basso e' evidenziata la zona superficiale in prossimità degli edifici.



Figura 5. A sinistra: storia temporale della sorgente. La funzione è rappresentata da un impulso di Ricker (fmax=25 Hz). A destra: istantanea del campo d'onda al primo istante di propagazione.



Figura 6. Sismogrammi sintetici calcolati nel modello senza edifici in superficie, rispettivamente sull'affioramento delle argille (in magenta) e del bedrock (in nero). Da sinistra a destra: sismogrammi sintetici, spettri di ampiezza di Fourier e rapporto tra gli spettri di ampiezza dei sismogrammi calcolati su argille rispetto a quelli calcolati su bedrock. In alto/basso: componente orizzontale radiale/trasversale.



Figura 7. Sismogrammi sintetici estratti in superficie lungo il transetto nel modello senza edifici (a sinistra) e in quello con edifici (a destra). Per questo ultimo sono evidenziati in rosso i sismogrammi estratti in cima ai due edifici. La scala grafica è la medesima per entrambi modelli.



Figura 8. Istantanee del campo d'onda P-SV le tre simulazioni (dall'alto in basso; simulazione 2, 1 e 0). In ogni pannello, in alto a destra, è indicato il tempo di propagazione.



Figura 9. Istantanee dello spostamento del campo d'onda P-SV per il modello con edifici. In ogni pannello, in alto, è indicato l'istante di propagazione.



Figura 10. Confronto tra la risposta calcolata per il modello con entrambi gli edifici (in rosso) e quello senza edifici (in nero). Il triangolo indica la posizione del punto di estrazione del sismogramma (a sinistra misura sull'edificio a tre piani, a destra su quello a quattro piani). Altri dettagli come in Figura 6.



Figura 11. A sinistra: confronto tra la risposta calcolata per il modello sull'edificio a quattro piani nel modello con un solo edificio (in rosso) rispetto a quella del modello senza edifici (in nero). A destra: confronto tra la risposta calcolata per il modello con due edifici (in rosso) rispetto a quella del modello con il solo edificio più alto (in nero). Il triangolo indica la posizione del punto di estrazione del sismogramma (sull'edificio a quattro piani, per ambedue i modelli). Altri dettagli come in Figura 6.

Figura 12. Confronto tra la risposta calcolata sul suolo argilloso per il modello con entrambi gli edifici (in rosso) rispetto a quella del modello senza edifici (in nero). Il triangolo indica la posizione del punto di estrazione del sismogramma (a sinistra e a destra degli edifici, rispettivamente). Altri dettagli come in Figura 6.

Figura 13. Confronto tra la risposta calcolata al bedrock (a distanza di circa 200 e 400 m, rispettivamente a sinistra e destra) per il modello con entrambi gli edifici (in rosso) rispetto a quella del modello senza edifici (in nero). Il triangolo indica la posizione del punto di estrazione del sismogramma (a sinistra e a destra degli edifici, rispettivamente). Altri dettagli come in Figura 6.