

PROPAGAZIONE SISMICA NEAR-SOURCE: APPLICAZIONE A UN CASO STUDIO

Angelo DELLO RUSSO

Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi del Sannio (BN)

angelodr@unisannio.it

Stefania SICA

Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi del Sannio (BN)

stefsica@unisannio.it

Sommario

Dopo la sequenza sismica che nel 2009 ha colpito L'Aquila e i paesi limitrofi nella valle del fiume Aterno, la comunità scientifica nazionale ha riposto maggiore attenzione nello studio della risposta sismica di siti ubicati in prossimità di faglie sismogeniche. In tali condizioni sono state spesso misurate accelerazioni elevate, associate a eventi sismici di modesta magnitudo ($M_w < 5$). Nella modellazione di problemi al contorno di geotecnica sismica, la porzione di sottosuolo considerata nel dominio di analisi è in genere delimitata inferiormente dal tetto del *bedrock*, a cui viene poi applicato un unico input sismico. Nella simulazione degli effetti *near-source*, il modello numerico deve contenere oltre al sito anche la sorgente, per riprodurre correttamente il meccanismo focale e la propagazione delle onde elastiche nella roccia di base. L'obiettivo della nota è quello di evidenziare, tramite l'applicazione a un caso studio, gli effetti della propagazione sismica *near-source* sulla risposta sismica di grandi dighe in terra.

1. Peculiarità dell'input sismico in condizioni near-source

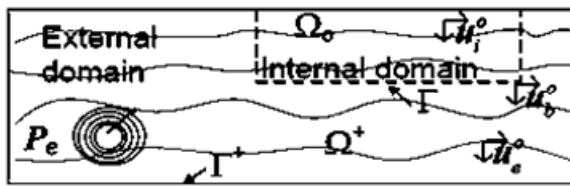
Interpretando le registrazioni sismiche in siti vicini a faglie attivate, si è constatato che le caratteristiche del moto sismico *near-source* sono molto diverse da quelle che si verificano in condizioni *far-source* per un evento di pari magnitudo. In particolare, in zone *near-source* si sono osservati: (i) segnali accelerometrici con contenuto energetico significativo alle alte frequenze; (ii) valori elevati di PGA, PGV e PGD; (iii) forme d'onda impulsive (*fenomeno della direttività*); (iv) evidenze in superficie della faglia; (v) moto sismico in direzione verticale paragonabile o, a volte, superiore rispetto a quello in direzione orizzontale. Quest'ultimo aspetto può avere risvolti ingegneristici importanti in quanto nella progettazione/verifica sismica delle opere geotecniche generalmente non viene considerata la componente verticale del moto. Tale scelta operativa trova giustificazione nel fatto che il fronte d'onda, propagandosi all'interno di mezzi sempre meno rigidi, assume una direzione pressoché sub-verticale mentre si avvicina alla superficie libera. Tale ipotesi, indubbiamente realistica per siti sufficientemente lontani dalla sorgente, è inverosimile per siti posti a breve distanza dall'ipocentro, in quanto il fronte d'onda raggiunge la superficie con un'inclinazione ben lontana dalla verticale. Queste circostanze, associate anche all'arrivo contemporaneo delle onde S e P, generano una componente verticale del moto significativa rispetto alle due componenti orizzontali e l'impossibilità di disaccoppiare gli effetti delle onde S e P sulle componenti del moto, verificandosi, di fatto, una sovrapposizione fra moto sussultorio e moto ondulatorio.

In questo contesto, la risposta sismica di grandi opere e, in particolare, di quelle a prevalente sviluppo longitudinale (dighe, rilevati stradali, gallerie, ponti, condotte), potrebbe essere influenzata dagli effetti cinematici e dinamici riconducibili alla propagazione sismica *near-source*.

1.1 Metodo del Dominio Ridotto

La risposta sismica di siti vicini a faglie sismogeniche dipende dal meccanismo sorgente, dal mezzo di propagazione e dalla posizione relativa sito-sorgente. Per una corretta valutazione del moto al *bedrock* in condizioni *near-source*, occorre quindi includere nel modello sia la sorgente e sia il sito oggetto di studio. Tale procedura richiede un notevole onere computazionale. Per evitare ciò, nel presente studio si è utilizzata la tecnica del *Domain Reduction Method* (DRM), inizialmente proposta da Bielak et al. (2003). Mediante il DRM è possibile suddividere il problema reale in due distinti modelli: a) ausiliario e b) ridotto (Fig. 1).

a) problema ausiliare



b) problema ridotto

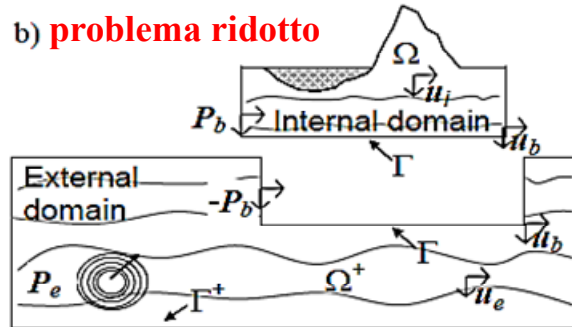


Fig 1. Schematizzazione del DRM: modello ausiliario (a); modello ridotto (b)

Il **modello ausiliario** (Fig. 1a) è un dominio a scala territoriale in cui sono presenti il meccanismo sorgente e il mezzo di propagazione interposto tra faglia e sito. A questa scala è possibile trascurare la topografia superficiale e l'orografia profonda, approssimando la geologia dell'area a una stratificazione monodimensionale orizzontale. Durante questa fase il sito in esame è parte integrante del modello (Figura 1a), ma ha una geometria semplificata e non contiene eventuali manufatti. Lo scopo del modello ausiliario è la generazione e la propagazione delle onde sismiche nella roccia di base, dal dominio esterno sino al bordo del dominio interno. Considerati i valori elevati di rigidezza del mezzo di propagazione e il basso livello di sollecitazione indotto dal fronte d'onda in avanzamento, in questa fase è plausibile adottare un legame visco-elastico lineare per tutti i materiali in gioco.

Nel **modello ridotto** viene analizzata soltanto l'area oggetto di studio con un livello di dettaglio adeguato agli scopi della modellazione. Sono infatti considerati: (i) la reale morfologia del territorio, superficiale e profonda; (ii) i manufatti di interesse ingegneristico (edifici, ponti, dighe, etc.); (iii) il comportamento non lineare dei materiali; (iv) la natura multifase dei terreni.

Come evidenziato in Figura 1b, il dominio ridotto riceve dal modello ausiliario il moto sismico sotto forma di storie temporali di forze nodali (denominate forze efficaci, P_{eff}) applicate alla frontiera esterna del dominio ridotto. Per il calcolo delle forze efficaci, Bielak et al. (2003) propongono la formulazione matriciale riportata nell'Equazione 1:

$$\Omega \cup \Omega^+ \quad \begin{bmatrix} \underline{M}_{ii}^{\Omega} & \underline{M}_{ib}^{\Omega} & 0 \\ \underline{M}_{bi}^{\Omega} & \underline{M}_{bb}^{\Omega} + \underline{M}_{bb}^{\Omega^+} & \underline{M}_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & \underline{M}_{eb}^{\Omega^+} & \underline{M}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{w}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{K}_{ii}^{\Omega} & \underline{K}_{ib}^{\Omega} & 0 \\ \underline{K}_{bi}^{\Omega} & \underline{K}_{bb}^{\Omega} + \underline{K}_{bb}^{\Omega^+} & \underline{K}_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & \underline{K}_{eb}^{\Omega^+} & \underline{K}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ w_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\underline{M}_{be}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^o - \underline{K}_{be}^{\Omega^+} u_e^o \\ \underline{M}_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^o + \underline{K}_{eb}^{\Omega^+} u_b^o \end{Bmatrix} = P_{eff} \quad (1)$$

dove \underline{M} e \underline{K} denotano rispettivamente le matrici di massa e di rigidezza, mentre i pedici i, e, b indicano il dominio di riferimento, rispettivamente interno, esterno e di bordo.

Nell'ambito di tale studio è stato sviluppato un algoritmo per l'implementazione del DRM all'interno di un codice di calcolo commerciale alle differenze finite. La procedura è stata poi validata sulla *case-history* della diga in terra di Conza della Campania (AV) che durante il terremoto dell'Irpinia 80 (M=6.9) potrebbe aver risentito degli effetti della propagazione sismica *near-source*.

2. Il caso studio

La diga di Conza è uno sbarramento sul fiume Ofanto, ancora in fase di costruzione quando si verificò il sisma del 23/11/1980 da cui fu gravemente danneggiata (Brigante, 2010). Come è ben noto in letteratura, il terremoto dell'Irpinia fu caratterizzato da una sequenza sismica costituita da tre distinti eventi, innescatisi dopo un intervallo di circa 20s: il primo segmento, ossia quello principale, è posizionato in corrispondenza della direttrice Monte Marzano - Monti Picentini; il secondo si estende a sud-est del primo; il terzo presenta una direzione di immersione opposta ai precedenti ed è localizzato ad est del meccanismo 1 (Bernard & Zollo, 1989; Cocco & Pacor, 1993). La diga di Conza è posizionata ad una distanza inferiore a 20 km rispetto al primo meccanismo focale e inferiore a 10 km rispetto al terzo meccanismo focale. La diga risulta, quindi, in condizioni *near-source* rispetto al sistema di faglie attivate nel 1980.

2.1 Modello a Scala Territoriale

Per l'applicazione del DRM è stato prima realizzato il modello ausiliare sulla base delle conoscenze geologiche e geofisiche raccolte negli ultimi 20 anni su una vasta area dell'Appennino Campano-Lucano, da Benevento a Potenza.

Per stabilire quale dei numerosi modelli stratigrafici proposti in letteratura (Bernard & Zollo, 1989; Amato & Selvaggi, 1993; Improta et al., 2000; Chiarabba et al., 2005; Maggi et al., 2009; Lancieri & Zollo, 2009; De Matteis et al., 2010; Matrullo et al., 2013; etc.) sia più idoneo a caratterizzare il sottosuolo di Conza della Campania, è stata effettuata una *back-analysis* della propagazione sismica associata a diversi terremoti *weak-motion* con epicentro in prossimità del centro abitato di Auletta, registrati nell'ultimo decennio dalla rete ISNet (*Irpinia Seismic Network*). Sono stati implementati i vari modelli di velocità dell'Appennino Campano-Lucano proposti in letteratura e alla fine si è scelto il modello stratigrafico proposto da Matrullo et al. (2013) riportato in Figura 2a. Nelle simulazioni effettuate sul modello ausiliare (Figura 2a), a ciascuno strato è stato attribuito un legame costitutivo di tipo visco-elastico lineare con smorzamento e densità variabili con la profondità, in accordo con precedenti modellazioni eseguite sempre per l'Appennino Campano-Lucano (Lancieri & Zollo, 2009). Per aumentare le riverberazioni nel segnale simulato e incrementarne di conseguenza la durata, nel modello originario di Matrullo et al. (2013) è stata inserita una distribuzione stratigrafica *random* nel primo kilometro di profondità, considerando uno scostamento di $\pm 50\%$ rispetto ai valori originari. Sono state considerate oltre 25 distribuzioni stratigrafiche *random* dalle quali è stata selezionata la stratigrafia di Figura 2b. La scelta effettuata garantisce il miglior *fitting* tra i segnali registrati e simulati in termini di ordinate spettrali (S_a) sulle 12 stazioni sismiche di riferimento e per tutte e tre le componenti del moto. Le simulazioni sono state realizzate determinando iterativamente le funzioni di Green tra sito e sorgente mediante il codice Axitra (Coutant, 1989).

Per la sola stazione accelerometrica di Caggiano e per uno degli eventi *weak-motion* considerati, in Figura 3 si riporta il confronto tra lo spettro di risposta elastico registrato e quello simulato in direzione Nord-Sud, considerando la stratigrafia di Matrullo originaria (Matrullo et al., 2003) e quella integrata con la stratigrafia *random* di Figura 2b.

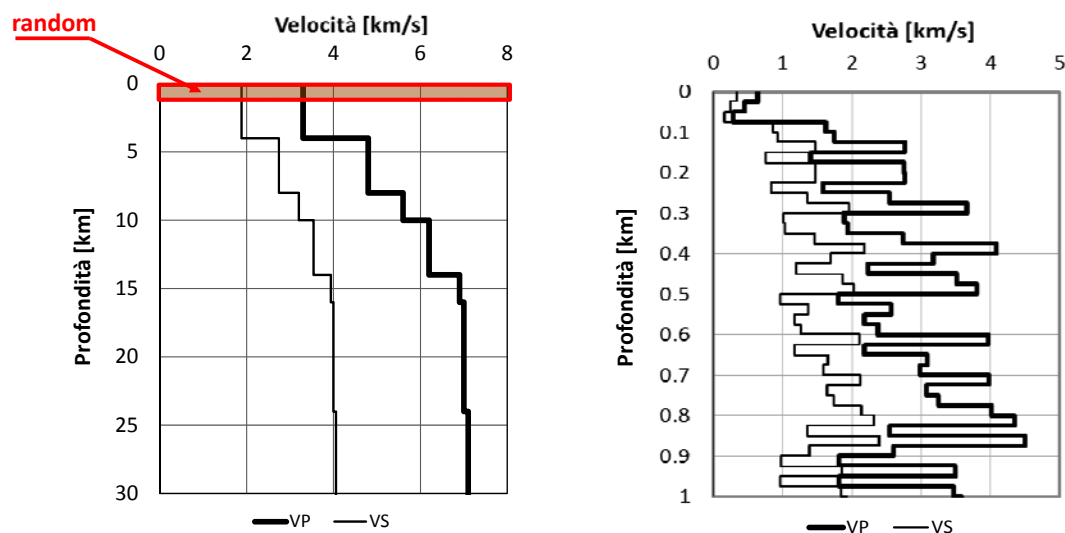


Fig 2. Modello di velocità utilizzato nelle simulazioni a scala territoriale (a) dettaglio del profilo di velocità tra le profondità 0 e 1km (b).

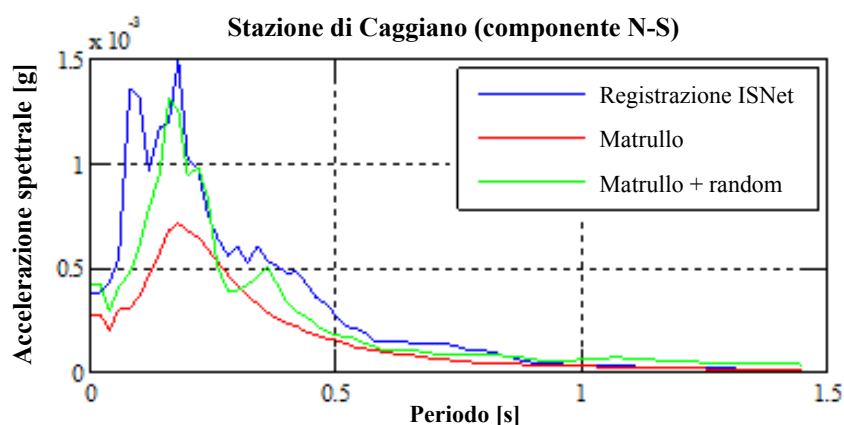


Fig 3. Confronto tra gli spettri di risposta elastici di un accelerogramma registrato alla stazione di Caggiano e degli accelerogrammi simulati tramite le due stratigrafie considerate nel modello a scala territoriale.

Tarato il modello ausiliare mediante *back-analysis* sulle rigidezze e sulle stratigrafie del modello a scala regionale, si è poi implementata la sorgente del terremoto dell'Irpinia del 1980. In particolare, si è utilizzato il modello di Cocco & Pacor (1993) per il primo meccanismo focale mentre per il secondo ed il terzo meccanismo è stata ipotizzata una propagazione della rottura radiale a partire dall'ipocentro stimato da Bernard & Zollo (1989). Per gli ultimi due meccanismi è stata, inoltre, considerata una distribuzione di slip concentrica all'ipocentro (Madariaga, 1976).

In Figura 4a si riportano, a titolo di esempio, la componente orizzontale (in direzione trasversale monte-valle della diga) e quella verticale dell'accelerogramma ottenuto in un punto del *bedrock*, in corrispondenza del baricentro della fondazione del rilevato (Figura 4b). Osservando i due segnali, si nota che, in linea con quanto atteso in condizioni *near-source*, le componenti orizzontali e verticali del moto sono tra loro paragonabili.

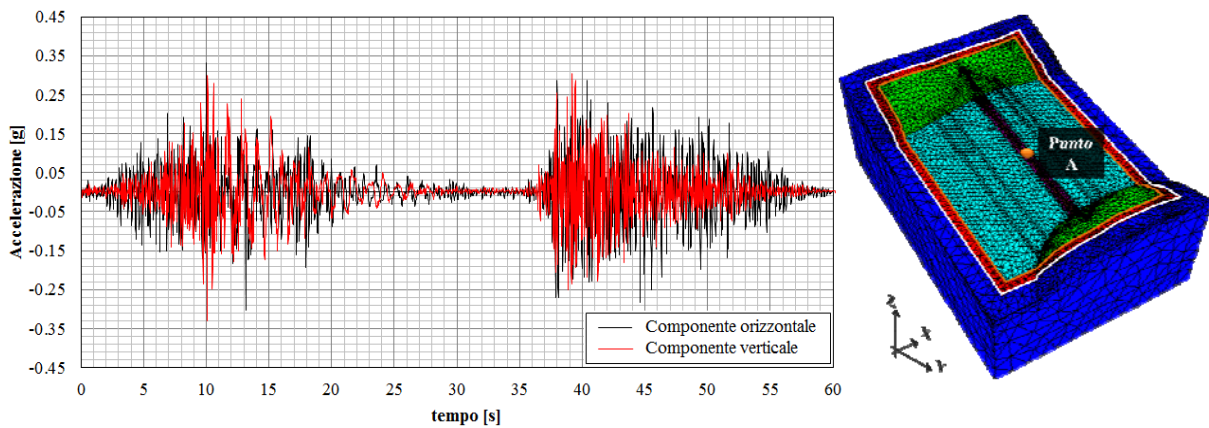


Fig 4. Modello a scala territoriale: (a) accelerogrammi simulati (componente verticale e orizzontale lungo la direzione trasversale della diga) in corrispondenza del punto A; (b) posizione del punto A su bedrock affiorante orizzontale.

2.2 Modello di Dettaglio a Scala di Sito

E' stato sviluppato un algoritmo *ad hoc* per il calcolo delle forze efficaci (Figure 5c e 5d) tramite le quali trasferire l'input sismico dal dominio esterno agli elementi di interfaccia del dominio ridotto (Figure 5a e 5b) fino alla fondazione del corpo diga. Bisogna sottolineare che ogni nodo posto alla base della diga sarà così sollecitato da un segnale sismico differente.

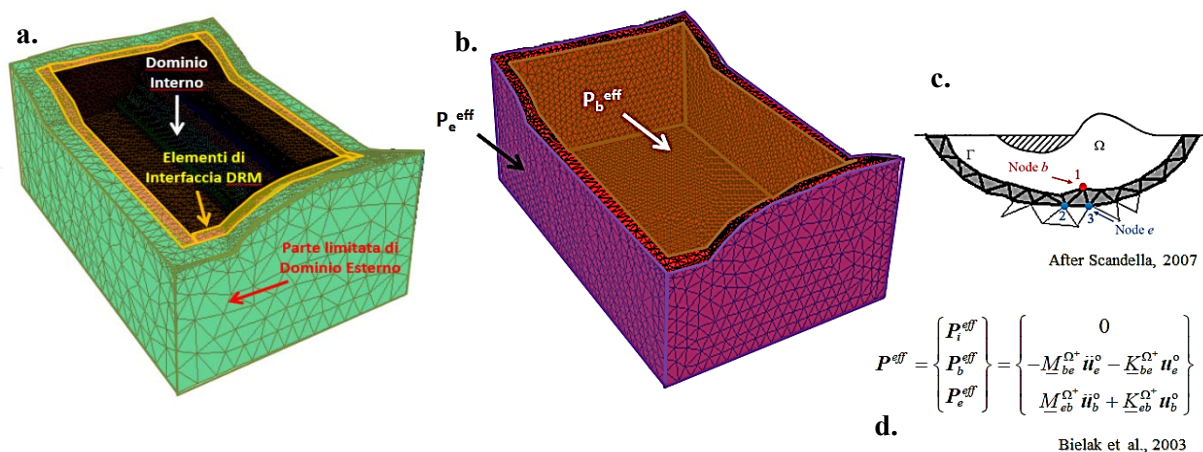


Fig 5. DRM: (a) dettaglio del dominio interno; (b) elementi di interfaccia; (c) schema di applicazione delle forze efficaci ai nodi esterni e interni della regione di interfaccia (Scandella, 2007) e vettore delle forze di interfaccia secondo Bielak et al. (2003).

Per la corretta simulazione della risposta sismica di una diga in terra, oltre alla definizione realistica dell'input, è necessaria anche una legge costitutiva adeguata per il terreno. Nel dominio interno (Figura 5a), pertanto, ai materiali costituenti la fondazione e il rilevato della diga è stato assegnato un modello costitutivo elasto-plastico, con rigidità a taglio iniziale (G_0) dipendente dalla pressione di confinamento (p'). Il comportamento isteretico del materiale alle piccole e medie deformazioni è stato correlato, tramite apposite funzioni "sigmoidi", al livello di deformazione indotto istante per istante dal sisma. Prima di effettuare l'analisi sismica, è stata simulata la storia di carico vissuta dalla diga prima del sisma del 1980.

Dal confronto tra i dati di monitoraggio relativi agli effetti indotti dal sisma del 1980 sul corpo diga (Brigante, 2010) e le previsioni numeriche ottenute con la procedura DRM sviluppata, emerge che quest'ultima riesce a riprodurre abbastanza fedelmente l'andamento e l'entità dei cedimenti osservati, con valori in fondazione e sul coronamento di entità maggiore in prossimità della spalla ovest (Figura 6 a-b). Tale effetto non si riesce più a riprodurre se, a parità di modello geometrico 3D e di materiali, l'analisi sismica viene ripetuta utilizzando un input unico (con le diverse componenti di moto) al tetto del *bedrock*, come tipicamente si procede nell'approccio tradizionale (Figura 6c).

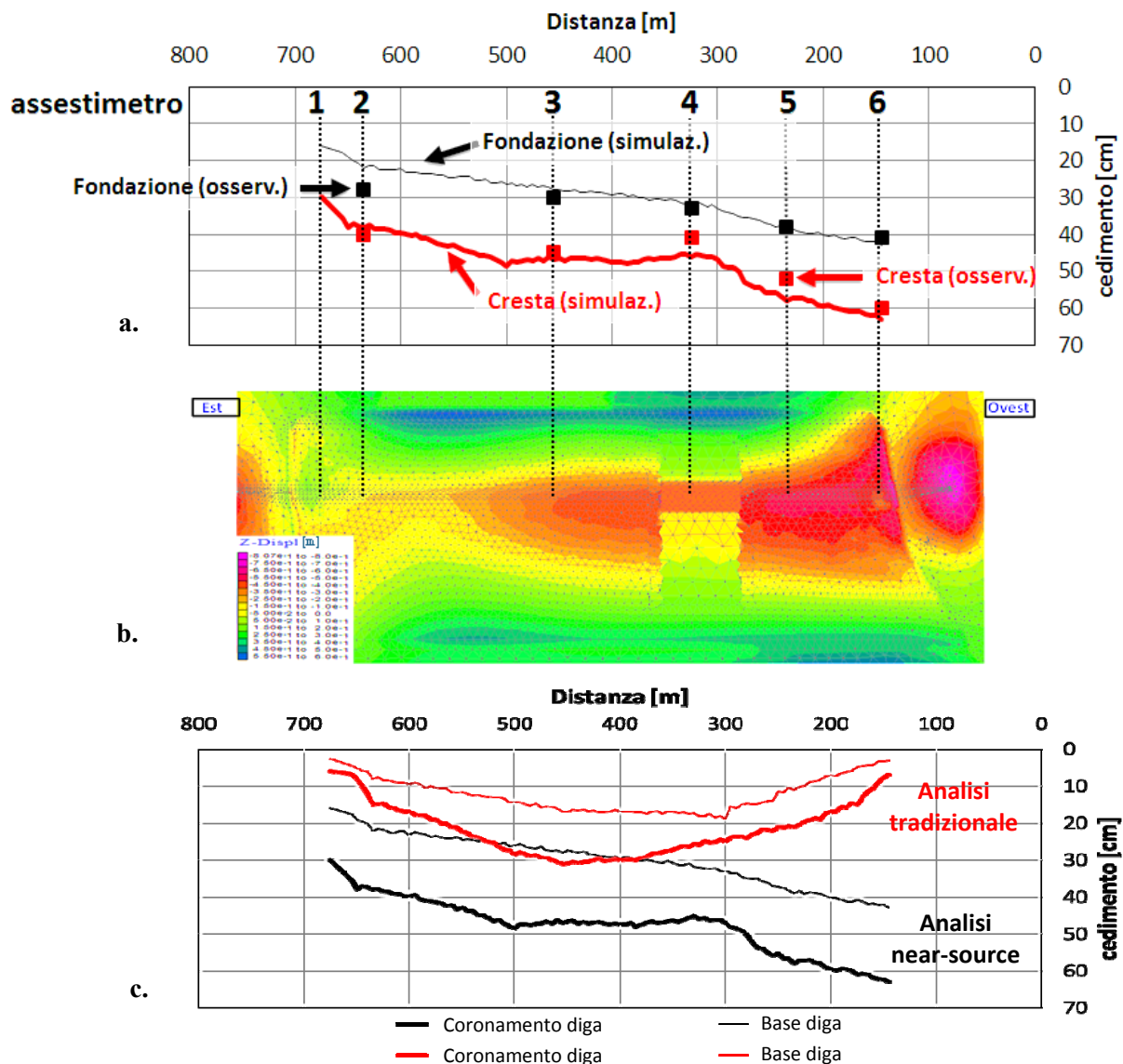


Fig 6. Risultati delle analisi: (a) confronto tra cedimenti misurati (indicatori) e calcolati (linee continue) con la procedura DRM lungo l'asse longitudinale della diga per effetto del sisma del 1980; (b) contour dei cedimenti permanenti calcolati con la procedura DRM; (c) confronto tra le previsioni ottenute con la procedura DRM (curve nere) e con l'approccio tradizionale (curve rosse).

Considerazioni finali

Lo studio della risposta sismica locale in condizioni *near-source* non può prescindere dalla simulazione del meccanismo sorgente e del processo di propagazione delle onde elastiche nella roccia di base. Nel presente studio si è utilizzata la metodologia DRM, che richiede due modelli separati: il primo, contenente la sorgente e una schematizzazione semplificata del mezzo di propagazione; il secondo, di dettaglio, costituito soltanto dal sito e dall'opera oggetto di studio. Alla scala regionale è stata effettuata una calibrazione del modello 1D di velocità del mezzo di propagazione interposto tra sito e sorgente, mediante l'utilizzo di funzioni di Green empiriche. Alla scala del sito lo studio ha evidenziato che la diversificazione dell'input sismico alla base di una diga in terra può causare un incremento dei cedimenti sismo-indotti e una non uniforme distribuzione degli stessi lungo lo sviluppo longitudinale del corpo diga.

Ringraziamenti

Si ringraziano i proff. A. Zollo, R. De Matteis e il Dott. S. Del Gaudio per il contributo sugli aspetti sismologici dello studio; il prof. L. Pagano per l'interpretazione dei dati di monitoraggio della diga di Conza e per aver evidenziato gli effetti prodotti sul corpo diga dal sisma del 1980; il prof. S. Rampello in qualità di coordinatore del WP2 (Dighe in Terra) del progetto ReLUIs.

Bibliografia

- Amato A., Selvaggi G. (1993). "Aftershock location and P-wave velocity structure in the epicentral region of the 1980 Irpinia earthquake". *Ann. Geofis.*, 36(1), 3-15.
- Bernard P., Zollo A. (1989). "The Irpinia (Italy) 1980 earthquake: detailed analysis of a complex normal fault". *Journal of Geophysical Research*, 94, 1631-1648.
- Bielak J., Loukakis K., Hisada Y., Yoshimura C. (2003). "Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions. Part I: theory". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 817-824.
- Brigante A. (2010). "Dighe in terra: Previsione e monitoraggio degli effetti sismo indotti". PhD Thesis, Università Federico II di Napoli.
- Chiarabba C., Jovane L., Di Stefano R. (2005). "A new view of Italian seismicity using 20 years of instrumental recordings". *Tectonophysics*, 395, 251-268.
- Cocco M., Pacor F. (1993). "The rupture process of the 1980 Irpinia, Italy, earthquake from the inversion of strong motion waveforms". *Tectonophysics*, 218, 157-177.
- Coutant O. (1989). "Program de simulation numerique AXITRA". In Rapport LGIT. Université Joseph Fourier, Grenoble, 1989.
- De Matteis R., Romeo A., Pasquale G., Iannaccone G., Zollo, A. (2010). "3D tomographic imaging of the southern Apennines (Italy): a statistical approach to estimate the model uncertainty and resolution". *Stud. geophys. Geod.*, 54, 367-387.
- Dello Russo A. (2015). "Seismic response of soil embankments in near-source conditions". PhD Thesis. University of Naples Federico II.
- Improta L., Iannaccone G., Capuano P., Zollo A., Scandone P. (2000). "Inferences on the upper crustal structure of Southern Apennines (Italy) from seismic refraction investigations and subsurface data". *Tectonophysics*, 317, 273-297.
- Lancieri M., Zollo A. (2009). "Simulated shaking maps for the 1980 Irpinia earthquake, Ms 6.9: Insightson the observed damage distribution". *Soil Dynamic sand Earthquake Engineering*, 29 1208-1219.
- Madariaga R. (1976). "Dynamics of an expanding circular fault". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66: 639-666.
- Maggi C., Frepoli A., Cimini G.B., Console R., Chiappini, M. (2009). "Recent seismicity and crustal stress field in the Lucanian Apennines and surroundings areas (Southern Italy): seismotectonic implications". *Tectonophysics*, 463, 130-144.
- Matrullo E., De Matteis R., Satriano C., Amoroso O., Zollo A. (2013). "An improved 1-D seismic velocity model for seismological studies in the Campania–Lucania region (Southern Italy)". *Geophys. J. Int.*, 195, 460–473.
- Scandella L. (2007). "Numerical eavaluation of transient ground strains for the seismic analysis of underground structures". PhD Thesis. Politecnico di Milano.