

Effetto della topografia sull'asincronismo del moto sismico della valle del fiume Lao in Calabria

E. Ausilio, G. Dente & S. Mirabelli
Università della Calabria, Rende (CS) Italia

M. G. Durante & P. Zimmaro
University of California Los Angeles, CA (USA)

ABSTRACT: Il comportamento di opere con sviluppo longitudinale significativo, come viadotti, lunghe condotte, argini fluviali e dighe, è fortemente influenzato dalla variabilità spaziale del moto sismico. Tra le componenti responsabili della variabilità spaziale del moto sismico, gli effetti topografici risultano spesso preponderanti. In questo studio viene esaminato il ruolo degli effetti topografici sull'asincronismo del moto sismico, e della sua variabilità spaziale, per la forra del fiume Lao, contraddistinta da una gola stretta e profonda attraversata dal Viadotto Italia dell'autostrada A3 Salerno – Reggio Calabria. Lo studio è condotto attraverso analisi numeriche con modelli alle differenze finite considerando inizialmente input armonici e poi un set di accelerogrammi spettro-compatibili. I risultati ottenuti sono analizzati e commentati con particolare riferimento al moto sismico in corrispondenza delle fondazioni delle quattro pile centrali. Essi mostrano che la funzione di amplificazione dipende dalla frequenza e che anche i parametri sintetici del moto sono differenti.

1 INTRODUZIONE

Le infrastrutture viarie presenti sul territorio italiano rappresentano un notevole patrimonio da preservare e da mantenere in efficienza per via del loro ruolo strategico. La manutenzione di queste infrastrutture dovrà tener conto, in futuro, di nuove valutazioni del loro comportamento sismico. La definizione della pericolosità sismica delle aree che ospitano queste infrastrutture, risulta quindi essenziale, in particolare per opere importanti o strategiche. In questi casi, è necessario ricorrere ad analisi ad-hoc, che tengano conto dei seguenti aspetti: (i) modellazione sito-specifiche delle sorgenti sismogenetiche, (ii) modelli di previsione adatti alla sismicità e a caratteristiche di attenuazione locali e/o regionali, (iii) valutazione delle incertezze relative agli elementi della modellazione. Queste analisi sono tipicamente definite analisi della pericolosità sismica sito-specifiche.

La risposta sismica di ponti, viadotti, dighe, ed infrastrutture distribuite sul territorio, rappresenta un tema molto studiato nell'ingegneria geotecnica sismica moderna, soprattutto per la complessità del problema. L'analisi strutturale può essere eseguita solo a valle di una accurata definizione dell'input sismico, che risulta importante, in particolare quando si ha a che fare con strutture con significativi sviluppi longitudinali e tracciati non rettilinei. In questi casi, un effetto significativo è la variabilità spaziale del moto dovuta alla combinazione di una serie di parametri: l'intensità e la frequenza del moto proveniente

dal semispazio, l'angolo di incidenza delle onde sismiche, la topografia, e le proprietà meccaniche del sottosuolo (Lupoi et al., 2005). I principali effetti della variabilità spaziale del moto sismico, consistono in una differenza in ampiezza, fase e contenuto in frequenza dei segnali registrati lungo una direttrice. Come descritto da Der Kiureghian (1996), le principali sorgenti della variazione del moto sono: (i) lo sfasamento del moto in ingresso in punti successivi per effetto della velocità di propagazione delle onde (effetto del passaggio delle onde), (ii) la perdita di coerenza, intesa come l'alterazione dei segni di somiglianza delle onde originate dalla stessa sorgente, a causa delle riflessioni, rifrazioni e diffrazioni che il moto incidente subisce lungo il percorso di propagazione (effetto di incoerenza), e (iii) la variazione della risposta per effetto della variabilità delle condizioni geomorfologiche e litologiche del sottosuolo che modificano le ampiezze e i contenuti in frequenza (effetti di sito). Uno dei primi modelli proposti per la valutazione della variabilità del moto risale a Vanmarcke (1983) che per primo introdusse metodi probabilistici; Luco e Wong (1986) proposero invece una formulazione semplificata per la generazione degli input successivi a partire da quello definito nel punto iniziale, mentre Zerva (2000) introdusse l'idea di utilizzare segnali aleatori come input per le analisi. L'Eurocodice 8 (EC8, 2005) e le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, Ministero delle Infrastrutture, 2008) prevedono la modellazione della variabilità spaziale del moto per opere estese (viadotti, pon-

ti, gallerie, condotte, etc) e forniscono una metodologia semplificata per la sua valutazione. In particolare, per i ponti, le norme suggeriscono di considerare delle sollecitazioni pseudo-statiche basate sul calcolo degli spostamenti per prefissate condizioni. Metodologie più sofisticate che prevedono una maggiore applicabilità e robustezza sono state sviluppate da Sextos e Kappos (2005) e Nuti e Vanzi (2005). La maggior parte delle metodologie riportate tengono conto degli effetti di passaggio delle onde e di incoerenza del moto, ma non degli effetti di sito. In alcuni casi (Sextos et al., 2003) sono state proposte metodologie per la valutazione della risposta sismica di ponti includendo nell'analisi della variazione del moto non solo gli effetti di sito (valutati con analisi monodimensionali) ma anche effetti di interazione terreno-struttura. Solo recentemente gli effetti topografici sono stati inclusi nelle analisi per la definizione di moti asincroni (Wu et al., 2016).

La tendenza a trascurare questo aspetto, riconosciuto dalla letteratura avere effetti non trascurabili, è da ricondurre alla difficoltà della sua implementazione in analisi semplificate. La risposta di sito dovuta ad effetti topografici varia a seconda delle categorie topografiche (rilievo isolato, pendio, valli) e del tipo di onde incidenti considerate. I primi studi della risposta sismica delle irregolarità topografiche sono dovuti a Trifunac (1973) per le onde piane di tipo SH e Wong (1982) per quelle di tipo P e SV. Entrambi gli autori hanno studiato la risposta di una valle semi-circolare con materiale elastico, omogeneo ed isotropo.

Il presente articolo mostra i risultati di un'analisi degli effetti topografici sulla risposta sismica della valle del fiume Lao attraversata dal viadotto Italia nel tratto calabrese dell'autostrada A3 Salerno – Reggio Calabria. Al fine di valutare il contributo della sola topografia sul moto asincrono, è stato realizzato un modello bidimensionale della valle utilizzando il codice alle differenze finite (Finite Difference Method, FDM) FLAC 2D (Itasca, 2005). Le ipotesi adottate per la modellazione numerica sono state prima verificate utilizzando irregolarità topografiche più semplici (valle semi-circolare e triangolare simmetrica) attraverso confronti con le soluzioni di letteratura disponibili per input armonici, poi applicate alla geometria reale, considerando accelerogrammi naturali. Le registrazioni naturali utilizzate sono state selezionate in modo da risultare spettrocompatibili, come previsto dalle norme vigenti in Italia (NTC, 2008). I risultati delle analisi svolte, sono presentati in termini di parametri caratteristici del moto nel dominio del tempo e delle frequenze lungo la superficie della valle in corrispondenza delle pile del Viadotto Italia. Questo studio mostra l'importanza degli effetti topografici nella definizione del moto asincrono alla base delle strutture da ponte. Tuttavia, l'approccio utilizzato nel presente studio, deve considerarsi come preliminare, necessa-

rio per la valutazione della sensibilità del modello ai diversi fattori che contribuiscono alla definizione di un adeguato input sismico. Future analisi includeranno la reale stratigrafia della valle del Lao e la modellazione dell'interazione terreno-struttura.

2 CASO DI STUDIO: LA VALLE DEL LAO

2.1 *Descrizione dell'opera: il Viadotto Italia*

Uno dei punti più impegnativi nella realizzazione dell'autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria, è il viadotto Italia (Fig. 1) nei comuni di Laino Castello (CS) e di Laino Borgo (CS), che, con i suoi 260 m circa di altezza della sede stradale rispetto all'alveo del Fiume Lao, ha detenuto per molti anni il primato di ponte più alto d'Europa. L'attraversamento della gola rocciosa a pareti sub-verticali ha imposto, infatti, ardui aspetti tecnici e costruttivi dovuti sia alle altezze considerevoli delle pile rispetto allo spiccato di fondazione sia alla necessità di una unica campata di grande luce nel tratto centrale del viadotto. Il tracciato originario si sviluppa parte in rettilineo e parte in curva per una lunghezza complessiva di 1160 m, con 19 campate poggiate su 17 pile e due spalle. La parte centrale dell'opera è stata realizzata con una travata continua in acciaio con luci di 125 m+175 m+125 m ed è del tipo a cassone autoportante mentre le restanti campate sono in cemento armato precompresso. I piloni sono realizzati mediante sezioni cave in calcestruzzo armato rastremate lungo l'altezza. Maggiori dettagli relativi al progetto del viadotto sono disponibili in Cestelli Guidi et al. (1965). Recentemente il viadotto è stato ammodernato al fine di migliorare l'andamento planimetrico, innalzando gli standard di sicurezza. Il nuovo tracciato ha comportato una variazione dei tratti finali, ora rettilinei, in luogo dei precedenti curvilinei. Il tratto centrale a campata unica con le relative pile non ha subito variazioni, mentre sono cambiati, sia in numero che in posizione, le pile e gli impalcati dei tratti terminali. La sezione della valle del fiume Lao, con il viadotto Italia ammodernato, sottoposta a calcolo è discussa nel paragrafo 4. La geometria e le condizioni al contorno, giustificano una modellazione bidimensionale.

2.2 *Descrizione del sito: la valle del Lao*

Dal punto di vista geologico, la forra del Lao si presenta costituita, partendo dal basso, dai calcari del Cretaceo Superiore, da Calcareniti trasgressive del Miocene su cui, in apparente continuità seguono depositi flisciodi con notevole componente argillosa e su cui sono poi sovrascorse le dolomie del Trias Superiore (Guerricchio A., 1982). Le formazioni affioranti, per effetto delle intense azioni tettoniche a cui sono state sottoposte e che hanno causato fratture e

dislocazioni dell'ammasso, si presentano suddivise in blocchi. L'area è caratterizzata da un insieme di faglie. Due sono i sistemi principali: (i) direttrici NE-SW e (ii) NW-SE. I contatti tra le varie unità presentano fasce cataclastiche e milonitiche modificate successivamente da processi metamorfici e dal fenomeno del carsismo, sotto forma di profonde cavità nella gola. Recentemente è stata eseguita una campagna di indagini che ha permesso di individuare le unità geologiche riportate in Figura 2. La roccia in sito presenta differenti livelli di compattezza strutturale e di degradazione secondo diverse classi di ammasso, ciascuno caratterizzato da parametri geomeccanici diversi. Le recenti indagini hanno accertato la presenza di una circolazione idrica variabile con il grado di fratturazione degli ammassi. Risulta quindi evidente che la situazione sismo-stratigrafica è caratterizzata da livelli di complessità elevati.



Figura 1 Vista aerea del viadotto Italia e della forra del fiume Lao

Come anticipato in precedenza, considerando che l'obiettivo del presente articolo è quello di valutare gli effetti topografici, nella modellazione della valle del Lao, si assumerà un deposito omogeneo con una velocità delle onde di taglio assunta pari a quella rappresentativa delle formazioni affioranti.

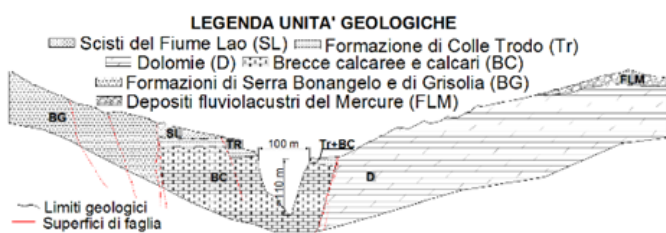


Figura 2 - Modello geologico strutturale della valle del fiume Lao lungo la direttrice N-S del viadotto Italia

3 MODELLO NUMERICO

Le analisi condotte in questo studio sono state effettuate con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC 2D. Nel caso in esame, sono state utilizzate le condizioni al contorno in campo dinamico di Lysmer e Kuhlemeyer (1969), in cui la riflessione delle onde dalla base del modello è stata eliminata utilizzando una serie di smorzatori in direzione normale e tangenziale alla base del deposito (quiet boundaries). Sui bordi laterali condizioni simili sono state ottenu-

te utilizzando dei contorni assorbenti (di tipo free-field). Le dimensioni totali del modello sono state determinate a partire dalla dimensione caratteristica dell'irregolarità topografica, mentre le dimensioni degli elementi della mesh sono state scelte garantendo una corretta propagazione delle onde (Kuhlemeyer L. e Lysmer J., 1973). A seguito di una opportuna ed accurata analisi parametrica (Mirabelli S., 2015), non riportata nel presente lavoro per brevità, è stata ottimizzata l'estensione laterale del modello in modo da ridurre il più possibile il costo computazionale delle analisi. Per una corretta applicazione dell'input, le onde di tipo SV sono state applicate alla base del modello come storie tensionali (Joyern W. e Chen A., 1975). La verifica del modello proposto è stata inizialmente eseguita con riferimento al caso di valle semicircolare, utilizzando le soluzioni di letteratura disponibili per input armonico con onde SV e materiale omogeneo ed elastico (Wong H., 1982). Una rappresentazione schematica delle condizioni al contorno e delle dimensioni del modello per il caso di valle semi-circolare sono riportate in Figura 3.

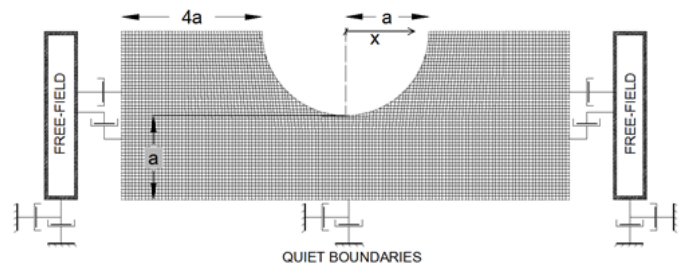


Figura 3 - Modello numerico della valle semi-circolare e condizioni al contorno dinamiche in FLAC 2D

Al fine di considerare una forma dell'irregolarità topografica più affine al caso reale analizzato, si è modellata anche la valle triangolare. Questa soluzione è stata confrontata con i risultati ottenuti da Godhino et al. (2009), con il metodo delle soluzioni fondamentali (MFS), assumendo le stesse condizioni di input sinusoidale e materiale elastico lineare ed omogeneo. La verifica dei modelli con geometrie semplificate è stata effettuata selezionando diversi valori della frequenza adimensionale (η):

$$K_1 = \left(1 - \frac{R^2 \tau}{c_a + v \tan \delta} \right)^4 k_1 \quad (1)$$

dove ω è la frequenza circolare dell'input armonico, V_s è la velocità delle onde di taglio nel mezzo, e a è la dimensione caratteristica dell'irregolarità topografica (assunta pari al raggio (R) per la valle semi-circolare e alla semi-larghezza della valle (a) per quella triangolare). I risultati sono riportati in termini di amplificazione del moto rispetto a quello in input per le componenti orizzontali e verticali lungo la superficie della valle, rappresentata in termini adimensionali (rapporto tra la progressiva e la dimensione caratteristica, X/a). Nel secondo caso, per meglio rappresentare la geometria della valle

triangolare è necessario introdurre il fattore di forma (SR) definito come il rapporto tra la semi-larghezza (a) e l'altezza (b) della valle. Le analisi sono state effettuate assumendo una dimensione caratteristica a pari a 25m e considerando un ampio intervallo di η per valli semi-circolari e triangolari, e diversi valori di SR per valli triangolari. Per brevità sono riportati, a titolo di esempio, solo due casi rappresentativi del buon funzionamento del modello numerico presentato. In Figura 4 è riportato il confronto tra le soluzioni di letteratura disponibili e quella del modello numerico sviluppato per la valle semicircolare, considerando $\eta=2$. In Figura 5 è invece riportato, il confronto tra le diverse soluzioni per la valle triangolare (SR=1), con $\eta=1$. Nelle Figure 4 e 5 sono anche riportati i risultati ottenuti con il metodo degli elementi di contorno (BEM, Ausilio et al., 2008). Questa tecnica evita l'introduzione di contorni fittizi e/o assorbenti e riduce la dimensionalità del problema rispetto alle altre tecniche numeriche. Il BEM è particolarmente efficiente per lo studio della propagazione delle onde ed è in grado di fornire risultati molto accurati.

Come è possibile notare, in entrambi i casi, il modello numerico è in grado di riprodurre in maniera accurata l'amplificazione topografica sia per la componente orizzontale che per quella verticale.

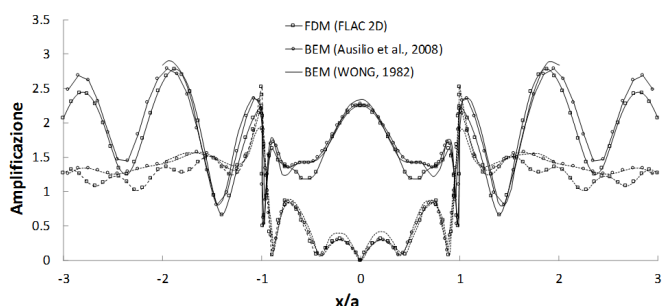


Figura 4 - Amplificazione delle componenti orizzontali e verticali del moto per valle semi-circolare ($\eta=2$).

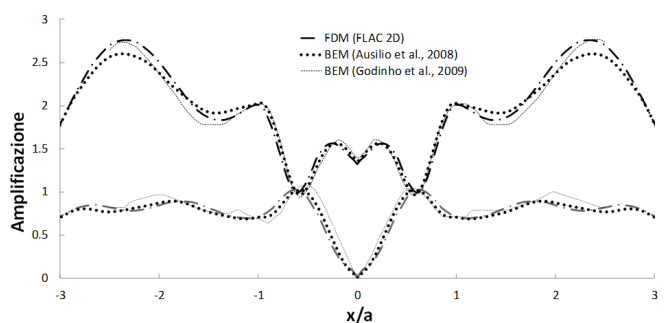


Figura 5 - Amplificazione delle componenti orizzontali e verticali del moto per valle triangolare ($\eta=1$, SR=1).

4 SIMULAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA DELLA VALLE DEL LAO

Partendo dalla sezione disponibile in corrispondenza del viadotto è stato realizzato un modello nu-

merico della valle del fiume Lao (Fig. 6). In una prima fase si è considerato un input dinamico caratterizzato da un treno di onde SV sinusoidale con direzione di propagazione verticale come nella sezione precedente. Il modello adottato non considera lo sfasamento dell'input alla base (l'input è assunto sincrono). In Figura 6 è anche riportato il modello strutturale del viadotto che però non è stato incluso nelle simulazioni numeriche. Per il caso studio si è assunta come dimensione caratteristica della valle, la profondità della gola centrale ($a=100m$) e il modello della valle si estende per $2a$ al di sotto della stessa. La dimensione massima degli elementi è 5 m, in modo da assicurare una propagazione delle onde ottimale fino ad una frequenza pari a 25 Hz.

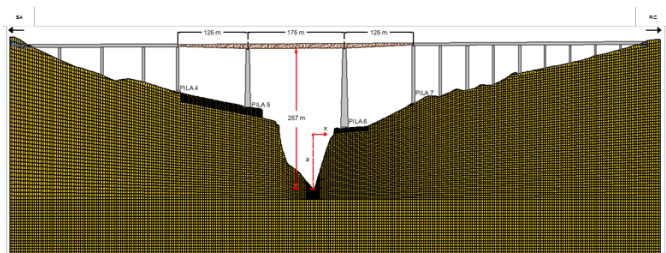


Figura 6 - Profilo longitudinale del Viadotto Italia e griglia di discretizzazione della valle del Lao.

Come discusso nella sezione precedente, al fine di ridurre gli oneri computazionali delle analisi, si è scelto di limitare le estensioni laterali, applicando le condizioni free-field lungo le verticali in corrispondenza delle spalle del viadotto. Tale scelta risulta avere una ridotta influenza sui risultati ottenuti in corrispondenza delle quattro pile centrali del viadotto (pile 4, 5, 6 e 7) che sono quelle su cui si è posta l'attenzione nel presente lavoro.

Il deposito omogeneo è stato modellato considerando un comportamento visco-elastico con velocità delle onde di taglio (V_s) pari a 1300 m/s, un rapporto di Poisson (ν) pari a 0.25 e uno smorzamento viscoso alla Rayleigh pari al 2% con frequenza centrale valutata a partire dalla frequenza dell'input. La risposta del modello numerico è stata verificata con quella ottenuta da analisi BEM con input armonici. Nelle Figure 7, 8 e 9 sono riportati i confronti tra le soluzioni BEM e quelle ottenute dal modello numerico per il caso studio, per frequenza adimensionale (Eq. 1) pari a $\eta=0.1$ (Fig. 7) e $\eta=2$ (componente orizzontale e verticale rispettivamente in Fig. 8 e 9). Il confronto tra i due codici mostra un buon accordo, soprattutto nella zona centrale del modello che, rappresenta la priorità del presente articolo.

Dall'analisi della forma dell'amplificazione per entrambi le componenti, si nota che per valori di frequenza adimensionalizzata bassi ($\eta=0.1$, Fig. 7), ovvero per lunghezze d'onda comparabili con l'irregolarità topografica, la forma dell'amplificazione segue l'andamento della topografia della valle, mentre risulta via via più irregolare al crescere di η (Fig. 8 e 9) e quindi al crescere dei

fenomeni di risonanza tra la valle e l'input, generando sollecitazioni molto differenti alla base di ogni pila del viadotto.

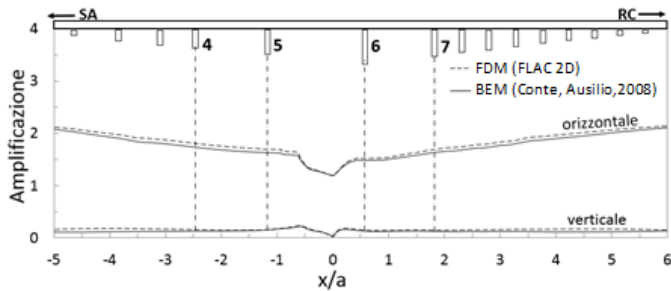


Figura 7 - Amplificazione delle componenti orizzontali e verticali del moto e posizione delle pile studiate ($\eta=0.1$).

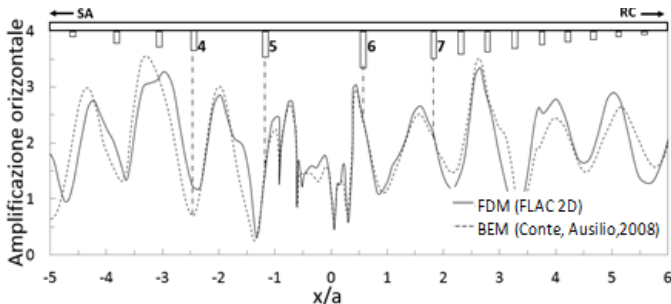


Figura 8 - Amplificazione della componente orizzontale del moto per il caso di studio ($\eta=2$).

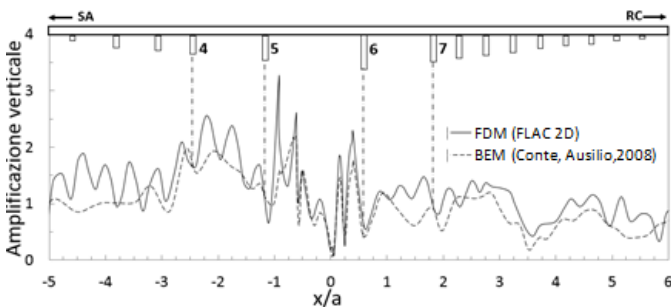


Figura 9 - Amplificazione della componente verticale del moto per il caso di studio ($\eta=2$).

A seguito dell'ulteriore fase di verifica del modello sviluppato in FLAC 2D con il codice BEM, è stata analizzata la risposta sismica della valle sottoposta a sette accelerogrammi reali spettrocompatibili.

La selezione dei sette accelerogrammi è stata effettuata utilizzando il sito del PEER, contenente il database NGA West 2 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://ngawest2.berkeley.edu>). Lo spettro target utilizzato è il cosiddetto spettro a pericolosità uniforme definito dalle norme tecniche per le costruzioni (NTC, 2008) per un periodo di ritorno pari a 2475 anni (probabilità di superamento dell'azione sismica del 2% in 50 anni) e con coefficiente di smorzamento strutturale convenzionale del 5%. Per la verifica di compatibilità spettrale, gli accelerogrammi naturali selezionati, sono stati opportunamente scalati linearmente nel dominio del tempo. Il fattore di scala massimo utilizzato è pari a 10. In accordo con i criteri consigliati dalle NTC (2008), lo scarto in difetto utilizzato per questa analisi, tra lo spettro medio del set e lo spettro target è pari al

10%. In assenza di una accurata valutazione del periodo naturale del viadotto, la verifica è stata eseguita nell'intervallo di periodi 0.2s – 1s. Tale intervallo è stato scelto sulla base delle raccomandazioni contenute nella circolare americana rilasciata dall'Istituto Nazionale degli Standards e delle Tecnologie (National Institute of Standards and Technology, NIST 2011). Lo spettro di risposta medio del set di registrazioni utilizzate è compatibile con lo spettro target rappresentativo del terremoto di progetto per il sito considerato. L'ampio range utilizzato dovrebbe consentire di cogliere effetti del sistema analizzato, sia a basse che ad alte frequenze. Ulteriori dati di input richiesti per la selezione dei segnali sono i parametri che determinano la pericolosità sismica del sito. In questo studio sono stati utilizzati magnitudo e distanza epicentrale. Nel caso in esame, i valori limite di queste grandezze, sono stati ottenuti utilizzando i risultati della disaggregazione della pericolosità sismica di Spallarossa e Barani (2007), per il sito di interesse (www.essel-gis.mi.ingv.it). I sette accelerogrammi selezionati (tabella I) sono stati registrati su affioramento rigido (velocità delle onde di taglio nei primi 30 m (V_{S30}) > 800 m/s). Nel modello numerico FLAC 2D, l'input è stato assegnato, senza essere ulteriormente trasformato, assumendo base deformabile, seguendo i criteri definiti da Stewart et al. (2008).

Tabella I. – Accelerogrammi reali selezionati

Evento	Nome evento	Stazione	V_{S30} (m/s)	M	T_M (s)	PGA (g)
ID 1	Kobe 1995	Kobe University	1043	6.9	1.04	0.2290
ID 2	Loma Prieta 1989	Los Gatos Lexington Dam	1070	6.93	0.89	0.2236
ID 3	Iwate 2008	IW010	825	6.9	0.57	0.2966
ID 4	Whittier Narrows 1987	Pasadena CIT Kresge Lab	969	5.99	0.46	0.2504
ID 5	Parkfield 2004	Parkfield Turkey Flat	906	6	0.37	0.1221
ID 6	Nothridge 1994	LA Wonderland Ave	1222	6.69	0.32	0.2737
ID 7	Landers 1992	Lucerne	1369	7.28	0.31	0.4425

M = magnitudo; PGA = accelerazione di picco.

In Figura 10 sono mostrati gli spettri di risposta dei sette accelerogrammi selezionati insieme allo spettro medio del set.

A titolo di esempio nelle Figure 11, 12 e 13 si riportano i risultati dell'analisi dinamica della valle del Lao sottoposta al solo accelerogramma dell'evento Kobe (1995), stazione Kobe University (ID 1), in corrispondenza delle fondazioni delle pile 4, 5, 6 e 7. Dall'analisi dei risultati nel dominio del tempo (Fig. 11, sovrapposizione degli accelerogrammi calcolati) e delle frequenze (Fig. 12, ampiezza spettrale di Fourier degli accelerogrammi calcolati) è evidente la variazione sia in termini di ampiezza che di fase per ogni pila riportata per effetto della sola risposta topografica del sito.

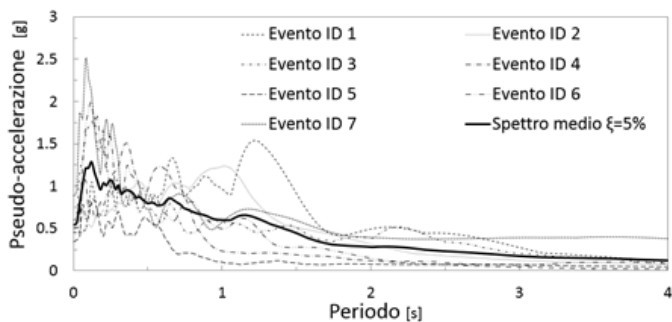


Figura 10 - Accelerogrammi usati per le analisi dinamiche e spettro medio del set

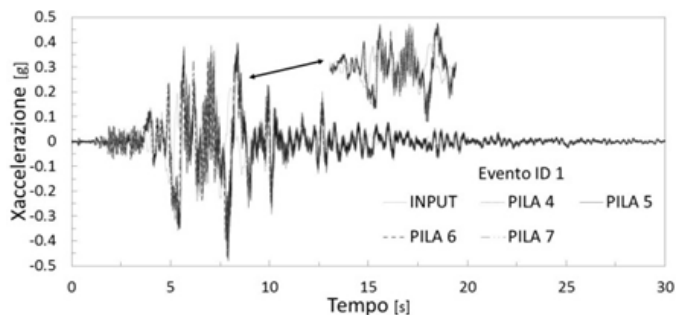


Figura 11 - Storie di accelerazione orizzontale calcolate in corrispondenza delle pile 4, 5, 6 e 7 per l'input ID 1.

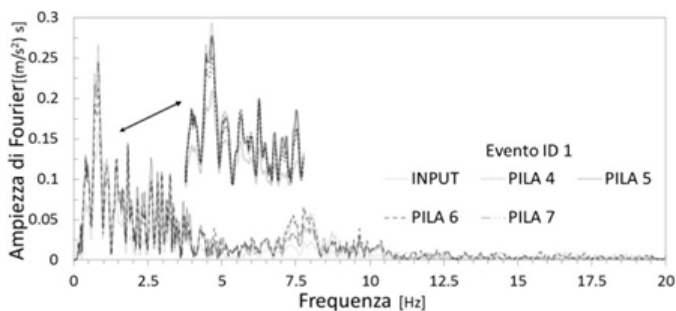


Figura 12 - Ampiezza spettrale di Fourier degli accelerogrammi calcolati in corrispondenza delle pile 4, 5, 6 e 7 per l'input ID 1

Gli effetti di amplificazione del moto risultano più evidenti in Figura 13, in cui sono riportate le funzioni di amplificazione regolarizzate attraverso l'algoritmo di Savitzky-Golay, mentre le differenze di fase dei segnali sono riportate nel dominio della frequenza in Figura 14. La differente risposta ottenuta in corrispondenza di ogni pila è da attribuire non solo alla trasmissione delle onde, ma anche ai fenomeni di diffrazione e focalizzazione, che provocano una variazione della risposta. Al fine di valutare l'amplificazione in termini di accelerazione del segnale, in Figura 15 sono riportati, in riferimento ai tre segnali considerati più rappresentativi (ID 1, ID 2, ID 4), i profili lungo la valle, in termini di PGA (peak ground acceleration), di rapporti tra componente orizzontale e verticale del moto in output, e di componente orizzontale in output rispetto a quella orizzontale in input. In Figura 16 è riportata una stima dei tempi di ritardo nell'arrivo del segnale (valutato con il metodo della cross correlation) in corrispondenza delle pile considerate, per tutti gli eventi selezionati, assunti sincroni alla base del modello numerico. Come è possibile notare, per effetto della

sola irregolarità topografica, i segnali presentano un significativo ritardo nell'arrivo del segnale in corrispondenza di ogni pila, che rappresenta quindi un contributo importante nella valutazione del moto asincrono alla base del viadotto. Un parametro utile alla misura della severità del moto sismico è l'intensità spettrale di Housner (IH) (Housner G., 1952); esso è correlato al danno potenziale atteso per effetto del terremoto per i ponti (Karim e Yamazaki, 2003). Come è possibile notare dalla Figura 17, dove l'intensità di Housner adimensionalizzata rispetto quella alla base, è riportata lungo il profilo della valle, per tutti gli eventi considerati segue il profilo topografico, e raggiunge i massimi valori per l'input ID 1, che risulta essere quello con uno spettro di risposta definito in un intervallo di periodi più ampio (Fig. 10).

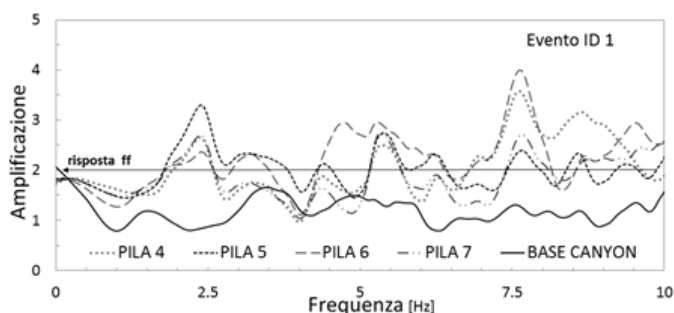


Figura 13 - Funzione di amplificazione calcolata in corrispondenza delle pile 4, 5, 6 e 7 per l'input ID 1.

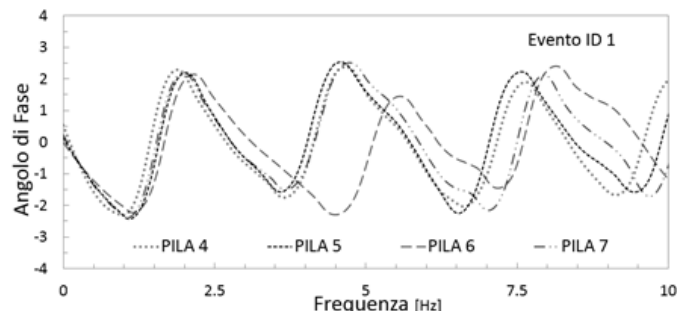


Figura 14 - Ritardo di fase dei segnali simulati in corrispondenza delle pile 4, 5, 6 e 7 per l'input ID 1

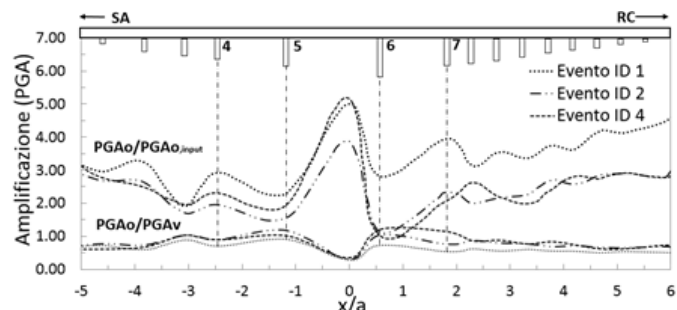


Figura 15 - Profili di PGA lungo la valle

In Figura 18 sono riportati gli spettri risposta medi, calcolati alla base delle quattro pile considerate. L'effetto di spostamento delle frequenze e di amplificazione del segnale dovuto al solo effetto topografico risulta evidente. In Figura 19, è mostrato l'andamento del periodo medio TM (Rathje et al., 1998), confrontato con le registrazioni di input. Questo pa-

rametro, fornisce una rappresentazione diretta delle ampiezze di un accelerogramma. In Figura 19 è inoltre apprezzabile anche l'effetto della topografia sul moto sismico valutato per le varie pile rispetto all'input.

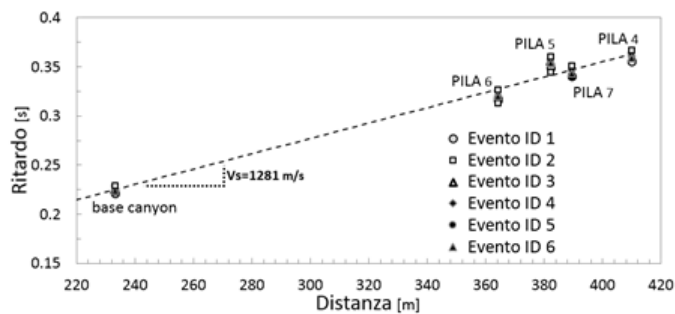


Figura 16 – Stima del tempo di ritardo mediante cross correlation dei segnali.

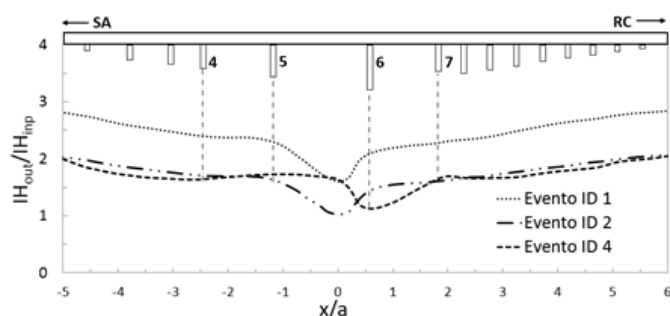


Figura 17 – Profili dell'intensità di Housner normalizzata

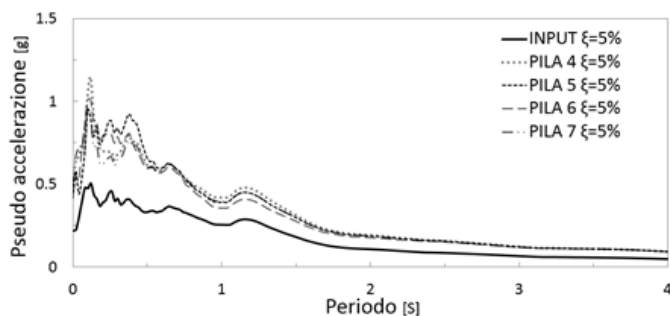


Figura 18 – Spettro di risposta medio degli accelerogrammi calcolati in corrispondenza delle pile 4,5,6 e 7.

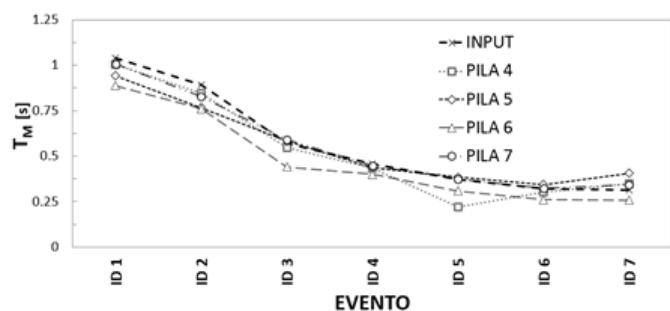


Figura 19 –Variazione del periodo medio (TM) valutato alla base di ogni pila per tutti e sette gli accelerogrammi utilizzati.

5 CONCLUSIONI

Gli effetti topografici hanno un'importanza notevole sulla variabilità del moto sismico. In questo articolo tali effetti sono stati indagati per il caso di studio della valle del fiume Lao. Tale valle, caratterizzata da una gola stretta e profonda e da un assetto geolo-

gico-strutturale complesso, è attraversata dal viadotto Italia dell'autostrada A3 Salerno – Reggio Calabria. Le analisi sono state condotte con un metodo numerico alle differenze finite. La fase di verifica del modello numerico è stata effettuata con geometrie elementari ed input armonici. La simulazione numerica della risposta sismica della valle del fiume Lao è stata condotta inizialmente considerando input armonici e successivamente un set di sette accelerogrammi reali spettro-compatibili. I risultati ottenuti sono analizzati e mostrati con particolare riferimento al moto sismico in corrispondenza delle fondazioni delle quattro pile centrali. Dall'analisi dei risultati sia nel dominio del tempo che della frequenza, è ben evidente la differenza della risposta in corrispondenza delle diverse pile. Infatti, la funzione di amplificazione, che più di ogni altro parametro evidenzia i fenomeni di variazione del moto, assume valori compresi tra 1 e 4 al variare della frequenza e della posizione del punto. La differenza della risposta è evidente anche in termini di parametri sintetici del moto, e di parametri correlati al danno potenziale delle strutture.

BIBLIOGRAFIA

- Ausilio E., Conte E., Dente G., 2008. *Seismic Response of Alluvial Valleys to SH Waves*. Seismic Engineering Conference, AIP Conference Proceedings, 2008.
- Cestelli Guidi C., De Miranda F., Pellegrino Gallo C., 1965, *Il progetto del viadotto sul fiume Lao dell'Autostrada Salerno-Reggio Calabria*. Acciaio e Costruzioni Metalliche, 6, 454-458.
- Eurocodice 8, 2005. EN 1998-1: *Design of structures for earthquake resistance*. European Committee for Standardization, Management Centre: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels.
- Der Kiureghian, A., 1996. *A coherency model for spatially varying ground motions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 99-111
- Godinho L., et al., 2009. *Numerical Simulation of Ground Rotations along 2D Topographical Profiles under the Incidence of Elastic Plane Waves*, Bulletin of the Seismological Society of America, 99(2B), 1147-1161.
- Guerricchio A., 1982. *Aspetti geologico-applicativi nell'attraversamento con il viadotto Italia della profonda gola in rocce carbonatiche carsificate del Fiume Lao (Calabria Settentrionale)*, Geologia applicata e Idrogeologia, XVII, 269-296
- Housner G.W. 1952. *Spectrum intensity of strong-motion earthquakes*. In: Proceedings of symposium on earthquakes and blast effects on structures. EERI, UCLA.
- Itasca, 2005. *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua – Version 5.0. User's Guide*. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Joyner W.B., Chen A.T.F., 1975. *Calculation of nonlinear ground response in earthquakes*, Bull. Seism. Soc. Am., 65 (5), 1315-1336.
- Karim, K.R., Yamazaki, F., 2003. *A Simplified Method of Constructing Fragility Curves for Highway Bridges*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 32, (10), 1603-1626.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'ANAS S.p.A. Ufficio per l'Autostrada SA/RC, per aver consentito l'accesso al cantiere del viadotto Italia e per aver fornito i dati del modello geologico della forra del Lao.

ABSTRACT

EFFECT OF TOPOGRAPHY ON THE ASYNCRONISM OF SEISMIC GROUND MOTION IN THE LAO RIVER VALLEY IN CALABRIA

Keywords: spatial variability of earthquake ground motion, asynchronism of earthquake ground motion, Viadotto Italia, topographic effects.

The seismic behavior of distributed infrastructure such as bridges, levees, pipelines, and dams, is influenced by spatial variability of earthquake ground motion. The spatial variability of the motion, is typically related to the presence of two- and three-dimensional topographic features such as slopes, ridge, and valleys/canyons.

In this study, the role of topographic effects on asynchronism and spatial variability of seismic ground motion for the Lao river valley in Calabria (southern Italy), is investigated. This case study is particularly relevant because the valley is crossed by one of the most critical highway bridges of the whole country: the so-called *Viadotto Italia*. This study presents a comprehensive numerical investigation, using the finite difference method. The numerical analyses are preceded by a verification phase in which results of this study are compared with analytical solutions and boundary element method analyses, for two simple topographic features.

After the verification phase, several numerical analyses are shown for the case study. Seven acceleration time-series selected and linearly scaled in the time domain were used. The choice of the time-series involved site-specific considerations on the tectonic setting of the area.

Main results of this study are presented in term of response of four critical locations corresponding to the foundations of the central piers of the *Viadotto Italia*. This study shows that: (1) topographic effects in isolation, strongly contribute to the spatial variability of ground motion, (2) asynchronism of the motion is relevant for the four locations analyzed, (3) the amplification of the motion, in this case, can be as high as four times the input, and (4) in the frequency domain, topographic effects modify both phase angles and amplitudes.

- Kuhlemeyer R.L., Lysmer J., 1973. *Finite Element Method accuracy for wave propagation problems*, J Soil Mech Found, ASCE, 99, (SM5), 421-427.
- Luco J.E., Wong H.L., 1986. *Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, 891-908.
- Lupoi A., Franchin P., Pinto P.E., Monti G., 2005. *Seismic Design of Bridges Accounting for Spatial Variability of Ground Motion*, J. Earthquake Eng. & Struct. Dyn., 34, 327-348.
- Lysmer J., Kuhlemeyer L., 1969. *Finite dynamic model for infinite media*. Journal of the Engineering Mechanics Division, pp. 859-877.
- Ministero delle Infrastrutture, 2008. *Norme tecniche per le costruzioni*, 14 January 2008, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana No. 29, Roma.
- Mirabelli S., 2015 Effetti topografici della forra del Lao sul moto asincrono del viadotto Italia, Tesi non pubblicata Dipartimento di Ingegneria Civile Università della Calabria.
- Nuti C., Vanzi I., 2005. *Influence of earthquake spatial variability on differential soil displacements and SDF system response*. Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 34, 133-1374.
- NIST, 2011. *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*, NIST GCR 09-917-2, Prepared for U.S. Dept of Commerce Nat Institute of Standards and Technology
- Rathje E.M., Abrahamson N., Bray, J.D., 1998. *Simplified Frequency Content Estimates of Earthquake Ground Motions*, Journal of Geotechnical Engineering, 124, (2), 150-159.
- Sextos A.G., Ptilakis K. D. e Kappos A. J., 2003 "Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil structure interaction phenomena. Part 1: Methodology and analytical tools," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (32) pp. 607 627
- Sextos A.G., Kappos A.J., 2005. *Evaluation of the new Eurocode 8-Part 2 provisions regarding asynchronous excitation of irregular bridges*, 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures, Thessaloniki, Aug. 2005 Paper n4.
- Spallarossa D, Barani S., 2007. *Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε*. Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>
- Stewart, J.P., Kwok, A.O., Hashash, Y.M.A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., and Yang, Z., 2008. *Benchmarking of nonlinear geotechnical ground response analysis procedures*. Report PEER 2008/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Trifunac M.D., 1973. *Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1, 267-281.
- Vanmarcke E.H., 1983. *Random Fields: Analysis and Synthesis*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Wong H.L., 1982. *Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves*. Bulletin of the Seismological Society of America, 72, 1167-1183.
- Wu, Y., Gao, Y., Zhang, N., & Li, D. (2016). Simulation of Spatially Varying Ground Motions in V-shaped Symmetric Canyons. Journal of Earthquake Engineering, 20, (6), 992-1010
- Zerva A., 2000. *Spatial Variability of Seismic Motions Recorded Over Extended Ground Surface Areas, in Wave Motion in Earthquake Engineering*, Volume in the Series Advances in Earthquake Engineering, E. Kausel and G.D. Manolis, WIT Press, 1999.