

ANALISI PROBABILISTICA DEL COMPORTAMENTO SISMICO DI DIGHE IN TERRA

Regina Gianluca, Roberto Cairo

gianluca.regina@unical.it, roberto.cairo@unical.it

Paolo Zimmaro

Università della Calabria e University of California, Los Angeles

paolo.zimmaro@unical.it

Katerina Ziotopoulou

University of California, Davis

kziotopoulou@ucdavis.edu

Sommario

Nel presente studio è stato analizzato il comportamento sismico di due dighe in terra situate in Italia Meridionale, nello stesso contesto sismotettonico, mediante approcci probabilistici. L'input sismico è basato sui risultati di una analisi probabilistica della pericolosità sismica sito-specifica. Per entrambi i casi di studio: (1) la diga di Farneto del Principe e (2) la diga dell'Angitola, sono stati usati modelli costitutivi semplici (Mohr-Coulomb) e avanzati (PM4Sand) al fine di modellare meccanismi deformativi dovuti a vari fenomeni, inclusi possibili problemi di liquefazione. Le analisi dinamiche sono state condotte al fine di costruire funzioni di fragilità analitiche, mediante la procedura detta *Multiple Stripe Analysis*. Diverse funzioni di fragilità vengono presentate, per varie intensità di misura e meccanismi di danno. L'utilità delle funzioni di fragilità presentate è da ricercarsi nella possibilità di predire il livello di danneggiamento causato da terremoti di scenario e/o valutare la sicurezza di queste opere integrando questi risultati con sistemi di early-warning e di monitoraggio dell'azione sismica in tempo reale.

1. Introduzione

Le dighe in terra sono opere fondamentali per lo sviluppo economico e per la società. In Italia sono presenti 165 grandi dighe in terra, molte delle quali progettate e costruite nel secondo dopoguerra. Quasi tutte le dighe in terra presenti sul territorio nazionale sono in servizio da oltre 30 anni, pertanto rientrano nella fase di vecchiaia. Inoltre, molte delle dighe in terra esistenti sono state progettate senza considerare azioni sismiche, o attraverso approcci semplificati. Per questo motivo necessitano di studi di rivalutazione sismica. Oggi, la valutazione del comportamento di una diga in terra viene solitamente effettuata mediante un input sismico derivante da approcci probabilistici sito-specifici, quali l'analisi probabilistica della pericolosità sismica (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA). A valle di queste analisi, è possibile valutare il comportamento di queste opere attraverso analisi dinamiche che possono essere condotte mediante due approcci, accoppiato o disaccoppiato. Nel primo caso, la risposta viene valutata in maniera deterministica, seguendo la metodologia classica della *Performance-Based Design*. Si eseguono, cioè, analisi numeriche deterministiche basate su input sismici valutati a partire da spettri target derivanti da PSHA. Tale approccio presenta due limitazioni: (1) le informazioni raccolte durante la fase della PSHA restano confinate nell'analisi di pericolosità; (2) i risultati delle analisi deterministiche non possono essere utilizzati per la stima della fragilità e vulnerabilità, e quindi convertite in analisi di rischio sismico. Queste limitazioni vengono superate con l'utilizzo di un approccio accoppiato, totalmente probabilistico, che a partire da input basati su risultati di una PSHA permette di ricostruire le cosiddette funzioni di fragilità, le quali forniscono la probabilità che l'opera superi un certo stato limite per una data intensità. Attualmente, le funzioni di fragilità per dighe in terra disponibili in letteratura sono limitate e basate su input compatibili con spettri a pericolosità uniforme

(Bernier et al., 2016, Figura et al. 2020). In questo studio vengono mostrate funzioni di fragilità analitiche (basate su risultati di analisi numeriche) per due dighe in terra, basate su una PSHA sito-specifica (Zimmaro e Stewart, 2017) e su input sismici compatibili con lo spettro medio condizionato (*Conditional Mean Spectrum*, CMS, Baker, 2011).

2. I casi di studio

2.1 La diga di Farneto del Principe

La diga di Farneto del Principe è una grande diga in terra zonata situata nel comune di Roggiano Gravina, CS, (Latitudine: 39.6515°N - Longitudine: 16.1627°E), un'area sismicamente attiva caratterizzata da faglie superficiali e sismicità profonda relativa alla zona di subduzione dell'arco Calabro. La diga è stata progettata alla fine degli '60 e costruita negli anni '70 e '80 del secolo scorso e presenta un'altezza di circa 30m e uno sviluppo longitudinale di oltre 1200m. Il nucleo centrale è formato da argilla e limi e garantisce la tenuta idraulica, mentre la stabilità dei fianchi è affidata a dei contronuclei in materiale a grana grossa. Due filtri di spessore 1m ciascuno separano il nucleo dai rinfianchi ed hanno lo scopo di controllare e bloccare possibili fenomeni di erosione, limitando l'insorgenza di sovrappressioni neutre. L'opera è fondata su un materasso alluvionale (composto principalmente da ghiaia e sabbia) con una profondità variabile lungo lo sviluppo longitudinale della diga, con un massimo di circa 43m nella sezione centrale. Al di sotto è presente un letto di argille di notevole estensione, per cui l'esatta posizione della roccia di base non è nota. La tenuta idraulica nelle fondazioni è assicurata da un diaframma realizzato mediante fanghi bentonitici e da una doppia fila di pali in calcestruzzo di un metro di diametro, immersi nelle argille di base presenti. La caratterizzazione geotecnica della diga è stata eseguita sulla base di una campagna di indagini volta a determinare le proprietà dell'opera in campo statico e dinamico (Regina et al., 2021). In particolare, tramite prove di laboratorio ed in-situ è stato accertato che né i terreni di fondazione, né i terreni costituenti i rinfianchi sono suscettibili né vulnerabili alla liquefazione. Figure 1a e 2a mostrano la diga di Farneto del Principe, mentre in Tabella 1 vengono riportate le proprietà principali dei materiali.

2.2 La diga dell'Angitola

La diga dell'Angitola è una grande diga in terra zonata situata nei comuni di Maierato e Monterosso Calabro, VV, a circa 130 Km dalla diga di Farneto del Principe; i due casi di studio ricadono nello stesso contesto sismotettonico.

Tabella 1: Caratteristiche geotecniche principali della diga di Farneto del Principe.

Proprietà	Nucleo	Rinfianchi	Materiale alluvionale	Argilla di base
γ [kN/m ³]	20.2	24.1	24.1	21.1
c' [kPa]	16.5	0	0	180
φ' [°]	22.4	40	37.5	24
G [MPa]	G(z)	G(z)	G(z)	635

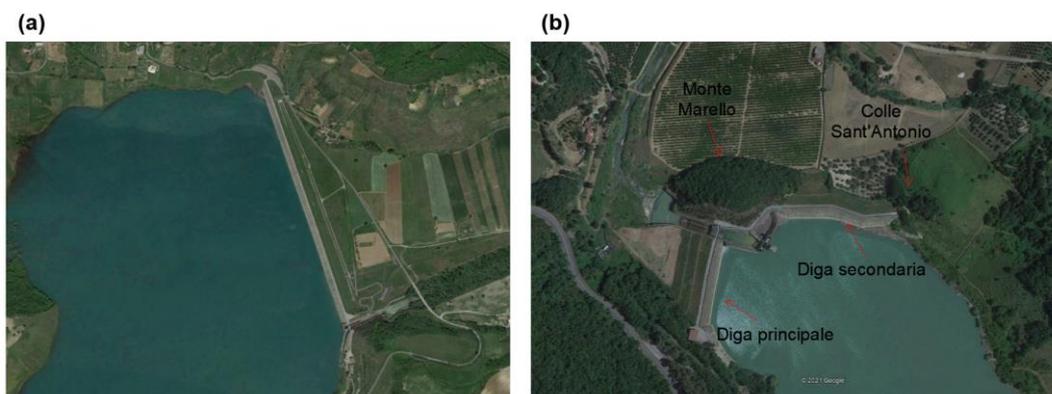


Figura 1: Diga di Farneto del Principe (a) e diga dell'Angitola (b).

L'opera è stata costruita negli anni '60 attorno il monte Marello e Colle Sant'Antonio, ed è costituita da due sbarramenti (Figura 1b). Solo la diga di destra (denominata diga secondaria) è fondata su terreni potenzialmente suscettibili alla liquefazione ed è stata oggetto di studio. La diga è alta 27.75m, con uno sviluppo longitudinale di circa 195m, ed è costituita da un nucleo limoso e da rin fianchi a grana grossa, separati da due filtri. La tenuta idraulica in fondazione è assicurata da un diaframma di spessore e profondità variabile lungo lo sviluppo longitudinale della diga; ciò è dovuto all'estrema variabilità dei terreni di fondazione, dove è possibile individuare quattro litotipi diversi. A valle è presente uno strato di sabbia alluvionale spesso circa 5m, sovrastante un vecchio strato alluvionale composto da materiale ghiaioso. Al di sotto della diga è presente un banco di argilla pliocenica con spessore variabile lungo la sezione da valle verso monte. Questi tre strati poggiano su uno strato eterogeneo sabbioso derivante dall'alterazione del sottostante gneiss, che risulta essere fessurato per una decina di metri. In Figura 2b è riportata la sezione trasversale dell'opera sottoposta a calcolo, mentre in Tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche geotecniche dell'opera.

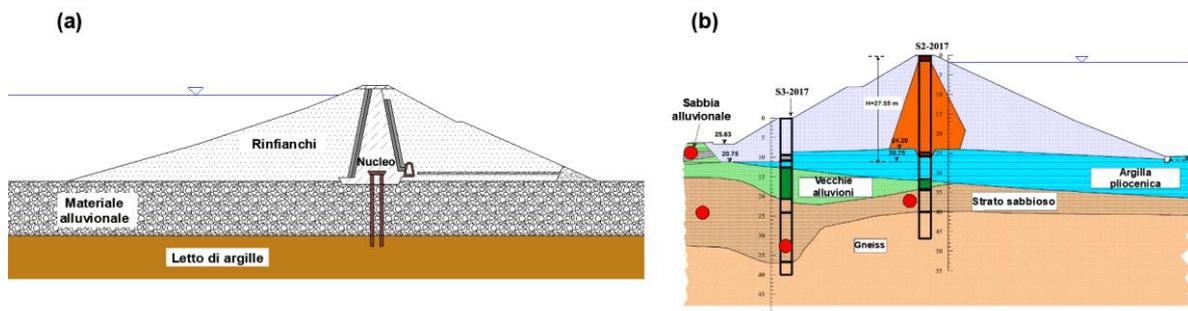


Figura 2: Sezioni trasversali della diga di Farneto del Principe (a) e dell'Angitola (b).

Tabella 2: Caratteristiche geotecniche della diga dell'Angitola.

Proprietà	Nucleo	Rin fianchi	Argilla pliocenica	Vecchie alluvioni	Strato sabbioso di alterazione	Alluvioni sabbiose	Roccia fessurata
γ [kN/m^3]	20.36	21.92	18.25	18.5	18.5	19.5	25.5
c' [kPa]	10	0	48	0	0	0	-
φ' [$^\circ$]	26	40	24	35	34.5	36	-
G [MPa]	$G(z)$	$G(p')$	$G(p')$	$G(p')$	$G(p')$	$G(p')$	1880

3. Modellazione numerica

Le analisi numeriche dei casi di studio sono state condotte mediante il software commerciale FLAC 2D (Itasca, 2019), la cui formulazione è basata sul metodo delle differenze finite esplicito per risolvere le equazioni del moto. Le dimensioni della griglia sono scelte in funzione della velocità delle onde di taglio e dei dettagli geometrici delle dighe (e.g. filtri), mentre per le condizioni al contorno si sono utilizzati i vincoli *free-field* (ai lati del modello) e *quiet-boundary* (alla base del modello) implementati nel software. Tale scelta è legata alla necessità di rappresentare il semispazio elastico presente ai lati e al di sotto del modello numerico. Il modello costitutivo adottato per i materiali non suscettibili alla liquefazione è quello alla Mohr-Coulomb (MC) accoppiato con la formulazione isteretica dello smorzamento (Itasca, 2019), mentre per i terreni suscettibili alla liquefazione è stato usato il modello PM4Sand V3.1 (Boulanger e Ziotopoulou, 2017); quest'ultimo è basato sulla *bounding surface plasticity* e sulla compatibilità con la teoria dello stato critico. I parametri del modello sono stati calibrati mediante simulazione su singoli elementi della mesh e verificando che la risposta numerica fosse in accordo con risultati empirici di letteratura (e.g. curve di riduzione del modulo di taglio per sabbie). La curva di resistenza alla liquefazione simulata dal modello, inoltre, deve interpolare il valore di resistenza ricavato mediante procedure semi-empiriche (Boulanger e Idriss, 2014). Per entrambi i modelli costitutivi e per entrambe le dighe, è stato usato uno smorzamento alla Rayleigh dello 0.5% per rimuovere le componenti ad alta frequenza del moto e smorzare il sistema per bassi livelli deformativi.

3.1 Scelta degli input sismici

La scelta degli accelerogrammi è stata condotta rispetto uno spettro target del tipo condizionato (CMS, Baker, 2011), costruito a partire dai risultati della PSHA sito-specifica e dalla disaggregazione della pericolosità sismica. Il CMS è lo spettro medio atteso condizionato rispetto un valore del periodo di vibrazione (solitamente quello corrispondente al periodo fondamentale dell'opera). Al fine di catturare le incertezze legate alla variabilità del moto, sono stati usati da 7 a 10 input, per ognuno dei sei periodi di ritorno analizzati (75, 475, 710, 1460, 1950 e 2475 anni).

4. Funzioni di fragilità ottenute

Le funzioni di fragilità (FF) rappresentano la probabilità che una struttura superi un certo danno o stato limite (DM) per un dato livello di intensità sismica (IM). Solitamente vengono espresse mediante una funzione di ripartizione lognormale, caratterizzata da un valore mediano θ e dalla deviazione standard β . In questo lavoro vengono considerate solo FF analitiche (cioè basate su risultati di simulazioni numeriche), costruite mediante l'approccio delle *Multiple Stripe Analyses* (MSA, Baker, 2015) basato sul metodo della massima verosimiglianza. La peculiarità di tale approccio è lo scalamento degli input sismici ad uno stesso valore di IM; tale valore è stato scelto sulla base delle analisi di disaggregazione, in quanto è quello che contribuisce di più alla pericolosità sismica di un sito per un certo valore del periodo di ritorno. Per la diga di Farneto del Principe sono state costruite FF usando come IM l'accelerazione di picco al suolo (*Peak Ground Acceleration*, PGA), la velocità di picco al suolo (*Peak Ground Velocity*, PGV) e l'intensità di Arias (*Arias Intensity*, AI), mentre per la diga dell'Angitola sono state considerate anche la velocità assoluta cumulata (*Cumulative Absolute Velocity*, CAV) e la CAV₅ con la soglia di accelerazione di 5 cm/s². Tra i meccanismi di danno analizzati rientrano lo spostamento dei filtri, l'instabilità globale, la riduzione del franco, la classe di danno secondo la metodologia empirica di Fell et al. (2014) e il cedimento normalizzato della cresta secondo Swaisgood (2014); per la diga dell'Angitola, inoltre, è stato considerato come DM anche il rapporto di sovrappressione neutra r_u . Le soglie oltre le quali si verifica il collasso o non è più rispettato lo stato limite sono state prese da indicazione di letteratura e dalle condizioni locali della diga (e.g. spostamento massimo dei filtri pari allo spessore dei filtri stessi). In Figura 3 vengono riportate risultati tipici ottenuti dalle MSA e le funzioni di fragilità per la diga di Farneto del Principe usando la PGA come IM. È interessante notare come all'aumentare della PGA non si osservano necessariamente danni maggiori, in quanto la PGA non è un indicatore ottimale del contenuto energetico dell'accelerogramma. Confrontando le FF per lo stesso livello di IM, inoltre, è possibile individuare lo stato limite che ha maggiore probabilità di essere superato (Figura 4a). Per la diga di Farneto di Principe, ad esempio, è possibile notare come il DM che ha minore probabilità di essere raggiunto è il cedimento del coronamento, mentre lo spostamento dei filtri e l'instabilità globale presentano la stessa probabilità. In Figura 4c-e vengono mostrate le FF ottenute per il rapporto di sovrappressione neutra in alcuni punti significativi dello strato di fondazione (riportati in Figura 2b) in funzione della PGV. È importante notare come solo in alcune zone si sia verificata una insorgenza di sovrappressioni neutre positive (al di sotto della diga e nel punto più depresso dello strato di sabbia alterato) mentre in condizioni di campo libero e in superficie il comportamento del terreno è risultato dilatante. In generale, quindi, è possibile costruire FF analitiche ben definite per la liquefazione solo se il terreno possiede un comportamento contraente. La diga dell'Angitola presenta solo piccole istanze di liquefazione (i.e. r_u maggiore del 95%), perciò i meccanismi deformativi rispetto quelli trovati con il modello costitutivo alla MC differiscono solo in fondazione. Per tale motivo, le FF ricavate mediante il modello PM4Sand e MC risultano simili tra loro (Figura 5f-j). Come per la diga di Farneto del Principe, confrontando le FF a parità di IM è possibile individuare gli stati limite che hanno più possibilità di essere raggiunti. Per la diga dell'Angitola, per ogni IM, la DM risulta essere quella di Swaisgood, seguita dall'instabilità globale. CAV e CAV₅ producono il valore minore di deviazione standard β , seguite dalla PGA e PGV; tuttavia, non è possibile individuare un trend ben definito, poiché la IM migliore dipende anche dal meccanismo di danno analizzato. In Tabella 3 vengono riportati i valori di θ e β per le FF relative allo stato limite del collasso.

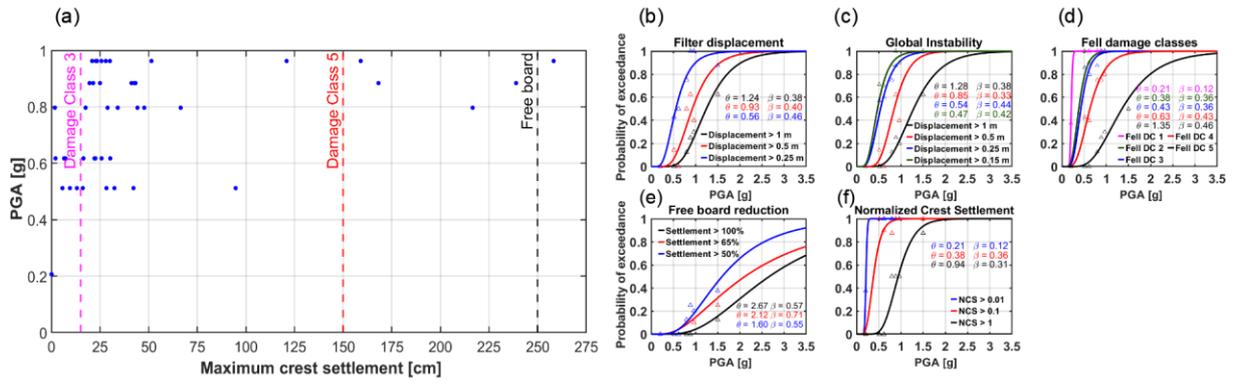


Figura 3: Risultati tipici delle MSA (a) e funzioni di fragilità per la diga di Farneto del Principe usando la PGA come IM.

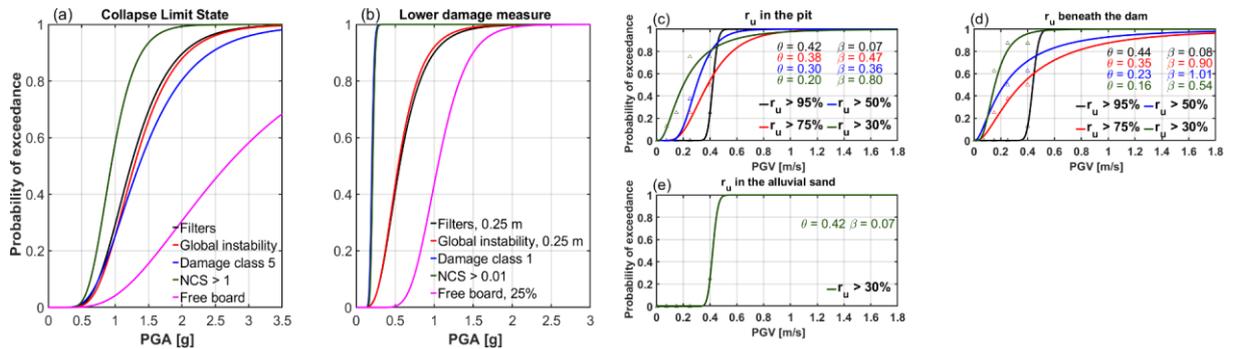


Figura 4: Confronto tra funzioni di fragilità (a-b) e funzioni di fragilità per il rapporto di sovrappressione neutra (c-e).

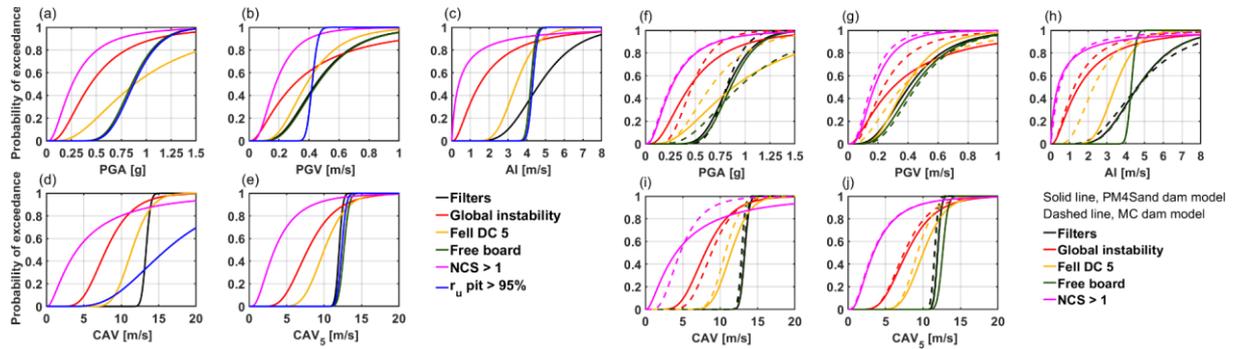


Figura 5: Funzioni di fragilità per la diga dell'Angitola (a-e) e confronto tra i due modelli costitutivi (f-j).

Tabella 3: Valori mediani e deviazione standard delle funzioni di fragilità ottenute allo stato limite del collasso.

Farneto del Principe										
IM	Filtri		Instabilità globale		Riduzione del franco		Classe di danno massima di Fell		Cedimento normalizzato di Swaisgood	
	θ	β	θ	β	θ	β	θ	β	θ	β
PGA [g]	1.24	0.38	1.28	0.38	2.67	0.57	1.35	0.46	0.94	0.31
AI [m/s]	26.33	0.68	22.97	0.64	n.a.	n.a.	31.96	0.67	8.93	0.48
PGV [m/s]	0.97	0.28	0.89	0.41	1.76	0.05	1.20	0.57	0.63	0.31
Angitola										
PGA [g]	0.88	0.24	0.44	0.70	0.88	0.24	0.88	0.67	0.26	0.80
AI [m/s]	4.69	0.35	1.50	0.95	4.31	0.05	3.44	0.27	0.38	1.70
PGV [m/s]	0.45	0.47	0.30	1.00	0.45	0.47	0.38	0.47	0.18	0.63
CAV [m/s]	13.33	0.04	8.00	0.35	n.a.	n.a.	11.45	0.18	4.11	1.05
CAV ₅ [m/s]	12.00	0.03	7.84	0.38	12.64	0.04	10.02	0.23	3.41	0.72

5. Conclusioni

In questo lavoro sono stati mostrati i risultati ottenuti dall'analisi sismica di due dighe in terra mediante approcci probabilistici. L'input sismico è stato scelto sulla base di una PSHA sito specifica, mentre la risposta dinamica è stata valutata mediante funzioni di fragilità per diverse intensità di misura e meccanismi di danno. La diga di Farneto del Principe non ha presentato problemi di liquefazione né di rammollimento ciclico, mentre la diga dell'Angitola, fondata su terreni potenzialmente liquefacibili, è suscettibile di potenziali meccanismi di deformazione dovuti all'insorgenza di sovrappressioni neutre. L'analisi delle funzioni di fragilità ha consentito di stabilire, per le dighe studiate, il meccanismo di danno che ha maggior probabilità di essere superato; per entrambi i casi, la CD risulta quella derivante dalla metodologia di Swaisgood (2014), seguita dallo spostamento permanente dei rinfiocchi e dei filtri. Tra le diverse IM, invece, quella che fornisce la minore deviazione standard β dipende dalla CD, ma tutte le IM basate sulla velocità hanno fornito valori minori. Le funzioni di fragilità illustrate possono essere utilizzate per una stima rapida della sicurezza a seguito di un evento sismico di elevata intensità. Se l'intensità sismica è nota (tramite sistemi di monitoraggio o mediante l'uso di mappe di scuotimento) è possibile ricavare la probabilità di osservare un certo danno, e quindi stabilire un grado di sicurezza. Inoltre, la fragilità di dighe in terra simili a quelle analizzate in questo studio potrà essere stimata, in prima istanza, mediante le funzioni di fragilità presentate. Ciò risulta vero soprattutto per opere che ricadono in aree con sismicità elevata e con meccanismi deformativi attesi comparabili con quelli della diga di Farneto del Principe e dell'Angitola.

6. Ringraziamenti

Si ringrazia il Consorzio di Bonifica Tirreno-Catanzarese, l'Ing. Cimbalo e il Prof. Lanzo per i dati riguardanti la caratterizzazione geotecnica della diga dell'Angitola.

Bibliografia

- Baker, J.W. (2011). Conditional mean spectrum: tool for ground motion selection. *ASCE, J. Struct. Eng.*, 137(3): 322–333.
- Baker J.W. (2015). Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis. *Earthquake Spectra*: February 2015, Vol. 31, No. 1, pp. 579-599.
- Bernier C., Monteiro R., Paultre P. (2016). Using the Conditional Spectrum Method for Improved Fragility Assessment of Concrete Gravity Dams in Eastern Canada. *Earthquake Spectra*, 32, 1449-1468
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Rep. No. UCD/CGM-14/01, Univ. of California, Davis, CA.
- Boulanger R.W., Ziotopoulou K. (2017). PM4Sand (Version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Report No. UCD/CGM-17/01 University of California, Davis, CA.
- Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G., Foster M. (2014). *Geotechnical engineering of dams*, 2nd edition. Taylor & Francis Group.
- Figura F., Foti S., Cosentini R.M., Passeri F. (2020). Comportamento dinamico della diga in terra nel comune di Briaglia: definizione delle curve di fragilità. Politecnico di Torino.
- Itasca (2019) - *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua – Version 8.1, User's Guide*, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Regina G., Cairo R., Zimmaro P. (2019). Ground response analyses for a zoned earth dam site in Southern Italy. 7th Italian National Congress of Geotechnical Researchers (CNRIG2019), Lecco (Italy), July 3-5. *Lecture Notes in Civil Eng.* 40, 148-154.
- Regina G., Ausilio E., Dente G., Zimmaro P. (2021). A critical overview of geophysical investigation and laboratory test results used in the seismic re-evaluation of the Farneto del Principe dam in Italy. 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization.
- Swaisgood J. R. (2014). Behavior of embankment dams during earthquake, *Journal of Dam Safety*, ASDSO.
- Zimmaro P., Stewart J.P. (2017). Site-specific seismic hazard analysis for Calabrian dam site using regionally customized seismic source and ground motion models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94, 179-192.