

Procedure per la valutazione del comportamento sismico di sistemi di argini fluviali

P. Zimmaro^{1*}, D.Y. Kwak², J.P. Stewart¹, S.J. Brandenburg¹, A. Balakrishnan³, R. Jongejan⁴, E. Ausilio⁵, G. Dente⁶, J. Xie⁷, A. Mikami⁸

*Autore Corrispondente: pzimmaro@ucla.edu

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, USA

²RMS Inc., Newark, USA

³Dept. of Water Resources, Sacramento, USA

⁴Jongejan RMC, Delft, Paesi Bassi

⁵Dip. di Ingegneria Civile, Università della Calabria, Rende, Italia

⁶Dip. di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica, Università della Calabria, Rende, Italia

⁷Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, Cina

⁸Dept. of Civil Engineering, Tokai University, Giappone

SOMMARIO: Gli argini fluviali sono importanti opere di ingegneria il cui danneggiamento o collasso può generare la perdita di vite umane ed ingenti danni economici. Di conseguenza, è essenziale la valutazione del comportamento delle arginature in condizioni sismiche. In questo articolo, vengono mostrati i passi di una procedura per la valutazione del comportamento sismico degli argini fluviali sia a livello di sezione (o sezioni trasversali rappresentative) che per un sistema. La procedura proposta si basa sull'analisi e la sintesi di normative e linee guida dei seguenti paesi: Italia, Canada (Columbia Britannica), Cina, Giappone, Nuova Zelanda, Paesi Bassi, e Stati Uniti d'America. L'approccio di analisi proposto prevede l'applicazione dei seguenti passi: (1) analisi preliminare, (2) caratterizzazione geotecnica dei materiali, (3) analisi di pericolosità, (4) valutazione del potenziale di fenomeni di collasso sismo-indotti, (5) definizione del comportamento post-sismico, (6) pianificazione di piani di mitigazione.

Parole chiave: Argini fluviali, comportamento sismico, liquefazione, linee guida.

1 INTRODUZIONE

Gli argini fluviali sono le opere di ingegneria più importanti per la difesa dalle inondazioni. La progettazione di queste opere è complessa anche a causa dell'estrema variabilità spaziale delle caratteristiche geotecniche dei materiali presenti in aree fluviali. Inoltre, nella analisi sismica degli argini, vanno tenuti in conto molti aspetti, non sempre di facile caratterizzazione

Nonostante la loro funzione critica, molti argini non sono stati adeguatamente progettati e spesso sono fondati su terreni di scarse caratteristiche meccaniche. Pertanto, come mostrato in figura 1, gli argini sono frequentemente danneggiati specialmente in seguito a terremoti di una certa intensità (Miller E.A. e Roycroft G.A., 2004; Sasaki, 2009; Sasaki et al., 2012; Green et al., 2011; Kwak et al., 2016a).

Gli argini sono elementi essenziali del patrimonio costruito esistente. Per tale motivo, la conservazione e manutenzione di queste opere dovrà necessariamente tenere conto, in futuro, di criteri di sicurezza almeno al passo con le norme vigenti. Inoltre, essendo spesso in opera da diversi decenni, gli argini, sono opere che richiedono una attenta analisi del rischio sismico connesso con il loro comportamento.

La recente sequenza sismica del 2012 in Emilia, ha mostrato che anche la pianura Padana, che ospita importanti sistemi di argini fluviali, è caratterizzata da una pericolosità sismica non trascurabile. Tale sequenza ha determinato il danneggiamento di alcuni argini fluviali (si veda ad esempio Tonni et al., 2015; Facciorusso et al., 2015; e Chiaradonna et al., 2016).

Come detto in precedenza, la progettazione degli argini è molto complessa in quanto coinvolge diversi aspetti, tra cui fattori idraulici, geotecnici, sismologici. Per tale motivo le procedure previste nelle normative tecniche per la progettazione sismica degli argini sono molto differenti nei vari paesi. Zimmaro et al. (2017) hanno analizzato le procedure previste nelle linee-guida e nelle normative tecniche specificamente sviluppate per gli argini in alcuni paesi sismicamente attivi. In particolare sono stati presi in considerazione i documenti tecnici usati nella regione canadese della Columbia Britannica (MFLNRO, 2014), in Cina (Ministry of Water Resources, 2005, 2008, 2013), in Giappone (MLIT, 2007, 2012), negli Stati Uniti d'America (USACE, 2000, 2014; CA-DWR, 2012, 2015), in Italia (Ministero delle Infrastrutture – Norme Tecniche per le Costruzioni NTC, 2008), in Nuova Zelanda

(NZSOLD, 2015) ed infine il manuale internazionale degli argini (CIRIA, 2013)



Figura 1. Collasso di un argine del fiume Shinano in Giappone a seguito del terremoto Niigata-ken Chuetsu-oki M6.6 del 2007 (da SWO, 2008).

I documenti esaminati hanno diversi livelli di applicazione che possono essere così distinti:

- **Rigorosi:** i documenti hanno il valore di legge e si applicano sia agli argini esistenti che a quelli di nuova realizzazione;
- **Intermedi:** i documenti hanno il valore di legge e si applicano ai nuovi argini o a quelli esistenti nei quali si devono realizzare modifiche significative;
- **Opzionali:** i documenti non hanno valore legale ma rappresentano informazioni che possono essere considerate dai tecnici a loro discrezione.

In questo articolo, vengono mostrati i passi di una procedura per la valutazione del rischio sismico degli argini fluviali sia a livello di sezione che per un sistema, proposta da Zimmaro et al, (2017). La procedura che si basa sull'analisi e la sintesi delle normative e delle linee guida nei paesi indicati precedentemente, prevede sei passi successivi:

I. Fase di screening preliminare per identificare i siti che non richiedono un'analisi dettagliata, sulla base di condizioni simiche, idrauliche, geologiche e geotecniche e di importanza dei manufatti;

II. Caratterizzazione del sito attraverso indagini geologiche, geotecniche, idrogeologiche e idrauliche;

III. Caratterizzazione della pericolosità. Questo passo include: (a) la definizione della pericolosità sismica di base per condizioni di sito di riferimento (analisi effettuata, tipicamente, per un determinato periodo di ritorno dell'azione sismica, T_E), (b) la definizione della risposta sismica dell'insieme argine-fondazione tenendo conto delle reali condizioni di sito, e (c) la definizione del periodo di ritorno del livello idrico da utilizzare in combinazione con l'azione sismica (analisi effettuata per un determinato periodo di ritorno, T_F , più basso rispetto a quello per l'azione sismica).

IV. Valutazione del potenziale di fenomeni di collasso sismo-indotti, inclusi perdita di resistenza causata da fenomeni di liquefazione di terreni sabbiosi e rammollimento ciclico di terreni a grana fine;

V. Valutazione del comportamento post-sismico con analisi delle deformazioni sismo-indotte; e

VI. Pianificazione di piani di mitigazione di rischio e risposta emergenziale post-sismica.

I passi da utilizzare per applicare la procedura proposta sono riassunti nel diagramma di flusso riportato in figura 2.

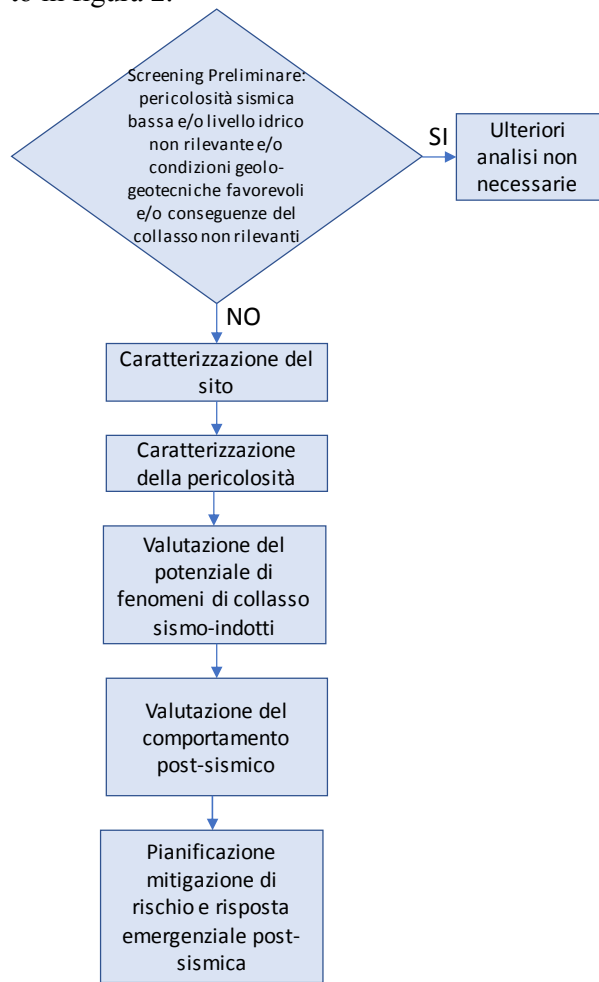


Figura 2. Diagramma di flusso della procedura proposta.

2 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA PER L'ANALISI SISMICA DI ARGINI FLUVIALI

La procedura consta, come visto nell'introduzione, di sei passi successivi. Nel seguito di questo paragrafo, i sei passi proposti sono descritti approfonditamente. L'analisi si concentra su sezioni trasversali significative, ma può essere estesa all'analisi sismica di sistemi di arginature fluviali. Questo passaggio necessita della valutazione della variabilità spaziale del moto (azioni) e delle caratteristiche geotecniche dell'insieme argine-fondazione (resistenze). Jongejan R.B. e Maaskant B. (2015), Zimmaro et al. (2017), Kwak et al. (2016b) e Stewart et al. (2017)

discutono nel dettaglio queste metodologie, chiarendo anche l'effetto della correlazione spaziale di resistenze e azioni.

2.1 Screening preliminare

Lo screening preliminare ha l'obiettivo di identificare siti che non necessitano di una accurata analisi sismica. Esso si basa sull'esame preliminare dei seguenti aspetti: (a) pericolosità sismica di base, (b) livello idrico "ordinario", (c) condizioni geologiche-geotecniche del sito, (d) conseguenze delle eventuali rotture sismo-indotte.

Le raccomandazioni proposte prevedono l'esclusione di ulteriori analisi nei casi in cui l'altezza del livello idrico sia non rilevante, le condizioni geotecniche dell'insieme argine-fondazione siano favorevoli, il livello di pericolosità sismica sufficientemente basso, e le conseguenze di un eventuale collasso non rilevanti. I concetti di "non rilevante", "favorevoli", e "sufficientemente basso", andrebbero stabiliti caso per caso, tenendo presenti condizioni specifiche del sito in esame. Queste condizioni sito-specifiche, indicheranno, inoltre, quali e quanti degli aspetti di esclusione devono essere considerati.

Questo primo livello di analisi non è presente nelle NTC (2008), ed è incluso, tra quelli analizzati, solo nei documenti tecnici del Giappone, Cina e USACE. A titolo di esempio, le linee guida statunitensi USACE (2014), non richiedono ulteriori analisi se l'accelerazione di picco al suolo (peak ground acceleration, PGA) è $PGA < 0.1$ g. Nel caso di argini caratterizzati da carico idraulico frequente (cioè se l'altezza del livello idrico del fiume è maggiore di 30 cm, rispetto al piede dell'argine almeno una volta al giorno per più di 36 giorni all'anno) e materiali di fondazione sciolti, il limite diventa $PGA < 0.05$ g. Le linee guida del Giappone (MLIT, 2012) considerano, invece, la procedura di screening composta di due fasi successive. La prima è legata all'altezza del livello idrico (il livello idrico avente un periodo di ritorno di 0,37 anni deve essere inferiore ad un quarto dell'altezza dell'argine). Qualora questo requisito non sia soddisfatto, la seconda fase è legata alle caratteristiche del materiale di fondazione. Le linee guida CA-DWR (2015) prevedono l'analisi in condizioni sismiche solo per argini posizionati in zone intensamente antropizzate caratterizzate dalla presenza di almeno 10.000 abitanti.

2.2 Caratterizzazione del sito

A causa delle eterogeneità laterali nei materiali caratterizzanti il sistema argine-fondazione (in direzione normale alla direzione dell'andamento del fiume), l'uso di almeno tre cone penetration tests (CPTs) è da considerarsi auspicabile. E' consigliato di utilizzare una distanza minima tra le sezioni trasversale

indagate (in direzione longitudinale rispetto al corso del fiume) pari a $L=500$ m. Ovviamente, questa distanza, così come la profondità delle indagini in sito (Z), dovrà essere stabilita tenendo conto di aspetti sito-specifici legati alla geologia del sito e all'ambiente deposizionale. In figura 3 è mostrato lo schema della distribuzione spaziale delle indagini, per un argine con forma tipica. Le informazioni acquisite da indagini geognostiche precedenti devono (possono) essere tenute in conto per definire le stratigrafie preliminari e per elaborare un adeguato piano delle indagini. Per i terreni contenenti materiali a grana fine è consigliata la caratterizzazione dei materiali attraverso prove di laboratorio i cui risultati possono anche essere utilizzati nella definizione del potenziale di liquefazione o rammollimento ciclico.

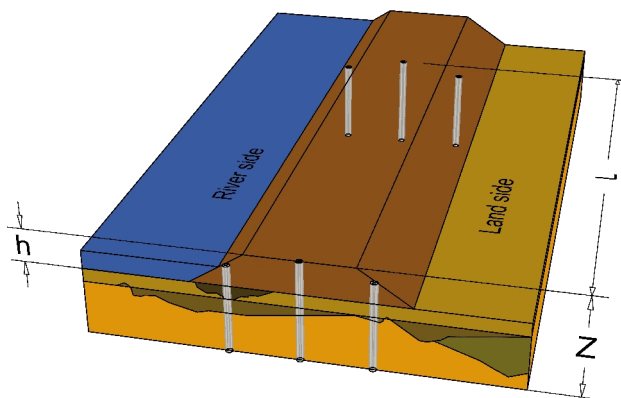


Figura 3. Schema di argine fluviale con definizione della distribuzione spaziale delle indagini in-situ da eseguire (da Zimmaro et al., 2017).

2.3 Caratterizzazione della pericolosità del sito

La caratterizzazione della pericolosità sismica per un sito nel quale ricade un argine fluviale, consta di tre fasi: (1) caratterizzazione del moto sismico per condizioni geotecniche di riferimento (tipicamente suolo rigido); (2) analisi della risposta sismica locale per valutare la variazione del moto sismico dalle condizioni di riferimento a quelle specifiche del sito in esame; e (3) valutazione del livello idrico da considerare in combinazione con l'azione sismica.

Il moto sismico di riferimento può essere valutato con approcci deterministici, o più tipicamente tramite l'uso di analisi probabilistiche della pericolosità sismica (o probabilistic seismic hazard analysis, PSHA; McGuire R.K., 2004). Questo approccio considera tutte le sorgenti sismogenetiche presenti nell'area, attraverso la distribuzione spaziale e magnitudo di tutti i possibili eventi che possono generare, tenendo conto della loro probabilità di accadimento. I risultati di una PSHA sono di solito forniti in termini di accelerazione o velocità di picco (PGA o PGV) e periodo di ritorno medio (T_E) utilizzato nell'analisi. Il valore di T_E è definito tenendo conto dell'importanza dell'opera. Zimmaro et al. (2017)

raccomandano di eseguire l'analisi di pericolosità sismica utilizzando approcci probabilistici. Il periodo di ritorno dell'azione sismica, così come stabilito anche nelle NTC (2008), va definito in funzione dell'importanza dell'argine e delle possibili conseguenze associate al suo danneggiamento e/o collasso. Per questo motivo, non viene suggerito l'uso di un singolo valore di T_E , che va valutato caso per caso, tenendo conto di aspetti sito-specifici dell'opera analizzata.

Spesso i risultati di analisi di risposta sismica locale sono utilizzati come fattori moltiplicativi della misura di intensità utilizzata per descrivere il moto sismico (come detto in precedenza tipicamente PGA o PGV). Quasi tutte le linee guida analizzate forniscono fattori moltiplicativi funzione della stratigrafia dipendenti da classi o valori continui della velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30m, V_{S30} (calibrabili con modello mono-dimensionali) e della topografia (che richiedono modellazioni bi- o tri-dimensionali). La figura 4 riassume questi fattori, definiti coefficienti stratigrafici dalle NTC (2008). L'approccio appena descritto è comunemente chiamato metodo ibrido, in quanto prevede la combinazione di fattori stratigrafici deterministici con moto al suolo probabilistico. Zimmaro et al. (2017) mostrano nel dettaglio i problemi legati all'uso di questo approccio, principalmente legati al fatto che il moto al suolo definito utilizzando il metodo ibrido non rispetta, di fatto, il livello di pericolosità definito a priori attraverso T_E . Questo problema, produce nella maggior parte dei casi, risultati non a vantaggio di sicurezza. Per tale motivo, è suggerito per argini considerati di importanza strategica, l'utilizzo di approcci di risposta sismica locale non ergodici. Questo tipo di analisi prevede l'implementazione di risultati di analisi numeriche (o di dati empirici) direttamente nell'integrale di pericolosità di una PSHA. Maggiori dettagli su questa metodologia sito-specifica e totalmente probabilistica sono forniti da Stewart et al. (2017).

L'altezza di piena da utilizzare in combinazione con le azioni sismiche, va valutata con riferimento al periodo di ritorno T_F e corrisponde all'intervallo di tempo medio trascorso il quale quel valore di altezza d'acqua è superato. Il valore di T_F in questo contesto è più basso del periodo di ritorno dell'azione sismica, T_E .

Il valore di T_F deve essere sicuramente più basso rispetto al periodo di ritorno del livello idrico (o di piena) da utilizzare in campo statico (di solito lungo decine e centinaia di anni). Tuttavia non si può definire in maniera universale, ma deve essere calibrato secondo criteri sito-specifici.

2.4 Valutazione del potenziale di fenomeni di instabilità sismo-indotti

Vari meccanismi deformativi possono produrre fe-

nomeni di instabilità sismo-indotti: (1) liquefazione di materiali non coesivi saturi (e.g. sabbie, ghiaie, limi non plastici) (Idriss I. M. e Boulanger R. W., 2008), (2) instabilità delle sponde (Blake et al., 2002), (3) cedimenti di consolidazione secondaria in materiali organici (Shafiee et al., 2015), (4) compressione sismica di rilevati in condizione di parziale saturazione (Duku et al., 2008; Yee et al., 2014), (5) rammollimento ciclico in materiali a grani fine (Boulanger R. W. e Idriss I. M., 2007). Questi meccanismi possono anche manifestarsi in maniera concomitante. Per esempio fenomeni di liquefazione e/o rammollimento ciclico, associati con la perdita di resistenza al taglio dei materiali coinvolti, possono produrre instabilità delle sponde.

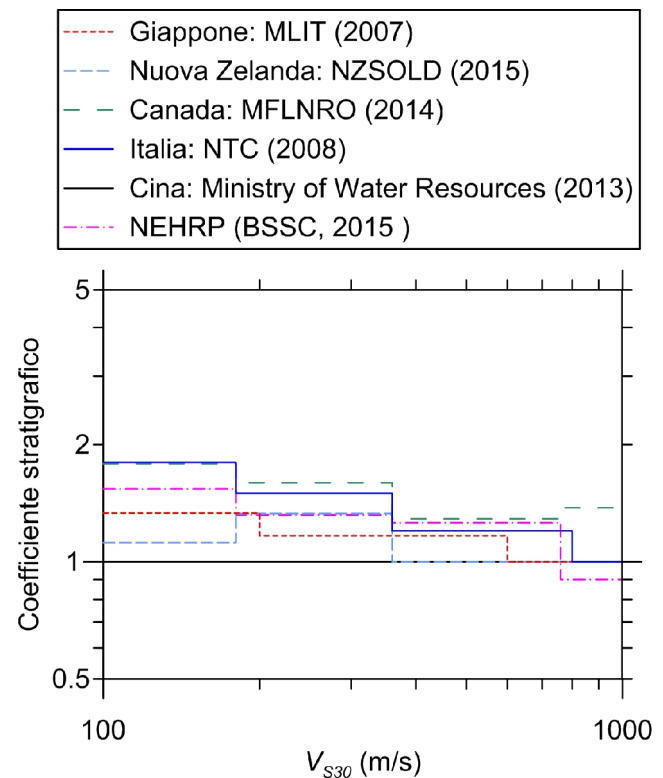


Figura 4. Coefficienti stratigrafici al variare di V_{S30} per le linee guida e normative considerate in questo studio (adattata da Zimmaro et al., 2017).

Per la valutazione del potenziale di fenomeni di collasso sismo-indotti è consigliata l'analisi di tutti i possibili meccanismi di instabilità elencati in questo paragrafo. Per quanto riguarda l'analisi del potenziale di liquefazione, è raccomandato l'utilizzo di un approccio che preveda tre fasi distinte: suscettibilità, innesco, ed effetti della liquefazione. È consigliabile eseguire la valutazione della suscettibilità a liquefazione tenendo conto che materiali con comportamenti guidati dalla frazione argillosa non sono suscettibili di liquefazione. La valutazione del comportamento prevalente del materiale può essere eseguita utilizzando la composizione granulometrica e proprietà indici dei terreni (come ad esempio l'indice di plasticità). Questo approccio, però, per alcuni materiali, potrebbe non risultare adeguato, per cui, è consigliato l'utilizzo di prove di laboratorio

(prove monotoniche per la valutazione della resistenza al taglio in condizioni non drenate). In particolare, il comportamento del materiale può essere definito valutando la normalizzazione della resistenza al taglio con la tensione efficace verticale che differenzia terreni argillosi (non-suscettibili) da terreni sabbiosi (suscettibili). Una ulteriore importante considerazione ai fini della suscettibilità è la valutazione di grandezze idrauliche, come l'altezza del livello del fiume che possono fornire indicazioni sulle condizioni di saturazione dei materiali di cui è costituito l'argine.

Per materiali a grana grossa saturi, è consigliabile eseguire la valutazione del potenziale di liquefazione, utilizzando modelli semi-empirici che permettano di tenere conto degli effetti di magnitudo, tensioni efficaci, e tensioni tangenziali statiche preesistenti. Gli effetti più critici della liquefazione sugli argini fluviali, sono la perdita di resistenza al taglio e i cedimenti post-sismici. È consigliato di tenere in considerazione entrambe, con particolare attenzione a situazioni in cui il livello dell'acqua nell'argine è elevato. In questi casi infatti, le conseguenze relative alla rottura, o al sormonto dell'argine, possono essere particolarmente rilevanti. La ricerca sulle analisi del potenziale di liquefazione e del suo innesco, si è evoluta con estrema rapidità negli ultimi anni. Anche a causa di questa costante evoluzione, non è raccomandato un singolo metodo specifico da utilizzare, ma l'utilizzo del metodo, o dei metodi più aggiornati ed accettati dalla comunità scientifica.

Se si prevede l'innesco di fenomeni di liquefazione, il valore della resistenza al taglio non drenata dei materiali coinvolti, da utilizzare è definito come resistenza post-liquefazione (C_{u-liq}). Per la valutazione di C_{u-liq} è consigliato l'utilizzo di modelli empirici che permettano di tenere in conto l'effetto delle tensioni efficaci verticali (σ'_{v0}) sui valori di resistenza normalizzati (C_{u-liq}/σ'_{v0}) (e.g. Kramer S. L. e Wang C. H., 2015). Anche nei casi in cui non si preveda l'innesco di fenomeni di liquefazione, una parziale riduzione della resistenza dei materiali, dovuta all'insorgenza di sovrappressioni neutre indotte dal moto sismico, è possibile. In questi casi, è utile valutare le deformazioni di taglio massime (Cetin et al. 2009) e stimare il livello di sovrappressioni neutre indotte attraverso modelli semi-empirici (Cetin K. O. e Bilge H. T., 2012). Per materiali argillosi, se si prevedono fenomeni di rammollimento ciclico, il valore massimo delle resistenze non drenate dei materiali coinvolti può essere ridotto di una aliquota del 20% (Boulanger R. W. and Idriss I. M., 2007).

2.5 Analisi degli effetti deformativi sismo-indotti

Nel caso in cui si preveda una diminuzione sostanziale della resistenza a taglio a seguito di fenomeni di liquefazione sismo-indotti, si consiglia di eseguire

analisi post-sismiche (statiche) all'equilibrio limite, utilizzando C_{u-liq} per i materiali coinvolti. Nel caso in cui questi fenomeni non si verifichino, è consigliato di eseguire analisi pseudo-statiche di stabilità delle sponde, seguite dalla valutazione delle eventuali deformazioni post-sismiche. Nei metodi pseudo-statici classici, l'effetto che le forze inerziali orizzontali esercitano sul volume potenzialmente instabile è rappresentato da un coefficiente sismico (k), valutato come $f_{eq} \cdot PGA/g$ (dove f_{eq} è un fattore adimensionale che nelle NTC, 2008 è funzione del tipo di terreno e del livello di accelerazione sismica atteso al suolo). Il valore di f_{eq} per applicazioni sito-specifiche, andrebbe valutato tenendo conto della magnitudo del terremoto atteso, della distanza sito-sorgente e del valore massimo di spostamento ammissibile. Dettagli sull'applicazione di metodologie sito-specifiche sono presenti in Stewart et al., (2003) e Blake et al., (2002). Nell'esecuzione delle analisi pseudo-statiche dovrebbero essere considerate anche le eventuali fessurazioni dovute a forze di trazione. I dettagli sul calcolo dell'entità di queste fessure sono discussi da Duncan et al. (2014). Zimmaro et al. (2017) ne mostrano l'impatto per un esempio applicativo. Se il fattore di sicurezza delle analisi pseudo-statiche supera una certa soglia (è consigliato l'unità), non sono necessarie ulteriori analisi.

Nel caso in cui il fattore di sicurezza di analisi pseudo-statiche sia inferiore all'unità, è necessario il calcolo degli spostamenti sismo-indotti attesi attraverso analisi con il metodo di Newmark o con quelli da esso derivati. Gli argini fluviali sono strutture che andrebbero analizzate con modelli quantomeno bidimensionali. Per tale motivo, analisi degli spostamenti basate su modelli monodimensionali (e.g. Bray J. D. e Travasaru T., 2007) possono non essere affidabili. La definizione sito-specifica delle sollecitazioni sismiche da utilizzare derivante da analisi 2D dovrebbe pertanto essere più affidabile. Anche l'utilizzo di modelli numerici avanzati è accettabile, purché si utilizzino modelli costitutivi avanzati validati e presenti nella letteratura scientifica internazionale. Linee guida per la definizione degli input sismici da utilizzare in questo tipo di analisi sono fornite da Athanasopoulos-Zekkos A. e Saadi M. (2012), Stewart et al. (2014), e Athanasopoulos-Zekkos et al. (2016).

2.6 Pianificazione di piani di mitigazione di rischio e risposta emergenziale post-sismica

Le linee guida analizzate propongono due approcci differenti per la pianificazione di piani di mitigazione:

I. Interventi di mitigazione *ex-ante* non previsti, ma pianificazione di dettaglio della risposta emergenziale con stoccaggio di materiali utili per l'immediata ricostruzione nelle vicinanze delle opere. Questo approccio è utilizzato da USACE e

CA-DWR per argini tipicamente asciutti.

II. Mitigazione del rischio sismico da effettuare *ex-ante*.

Entrambe le opzioni sono accettabili. La scelta della metodologia da applicare andrebbe condizionata al livello medio del fiume ed all'importanza dell'argine. Inoltre, nell'effettuare tale scelta, è necessario tenere conto del livello di rischio connesso al sistema di argini analizzato.

3 CONCLUSIONI

In questo articolo è presentata una metodologia per l'analisi del comportamento sismico di arginature fluviali, recentemente proposta da Zimmaro et al. (2017). Dopo avere analizzato le linee guida e le normative sismiche utilizzate in vari paesi, viene mostrato l'approccio che si compone di sei passi fondamentali: (1) screening preliminare, (2) caratterizzazione del sito attraverso indagini geologiche, geotecniche e idrauliche, (3) caratterizzazione della pericolosità del sito, (4) valutazione del potenziale di fenomeni di instabilità sismo-indotti, (5) analisi degli effetti deformativi sismo-indotti, e (6) piani di mitigazione di rischio e risposta emergenziale post-sismica.

La fase di screening ha l'obiettivo di identificare siti che non necessitano di una accurata analisi sismica in base ad aspetti legati alla pericolosità sismica, alle condizioni idrauliche, geologiche e geotecniche e alle conseguenze di eventuali rotture degli argini.

Le raccomandazioni presenti in questo articolo prevedono la caratterizzazione geotecnica del sito attraverso prove *in-situ* e di laboratorio. Si raccomanda inoltre che l'analisi della pericolosità sismica di base sia definita attraverso approcci probabilistici sito-specifici combinati con effetti di sito attraverso approcci non ergodici. Al fine di evitare approcci troppo cautelativi, il tempo di ritorno delle piene da utilizzare per le analisi sismiche dovrà essere sostanzialmente più basso non solo di quello dell'azione sismica ma anche di quello da utilizzare in campo statico. Il presente approccio prevede anche una analisi del potenziale di liquefazione attraverso una procedura in tre fasi: suscettibilità, innesco, conseguenze. L'analisi di altri possibili fenomeni di instabilità è fortemente consigliata. Per la valutazione della stabilità delle sponde degli argini, possono essere utilizzate varie metodologie con livelli di dettagli crescenti: analisi pseudo-statiche, calcolo degli spostamenti con metodi alla Newmark, modellazioni numeriche avanzate. La pianificazione di interventi in fase di emergenza riveste una importanza elevata. Per tale motivo, è necessario analizzarne le modalità tenendo conto dell'importanza del sistema di argini analizzato e delle possibili conseguenze innescate da fenomeni di collasso.

4 BIBLIOGRAFIA

- Athanasopoulos-Zekkos, A., Saadi M., 2012. Ground Motion Selection for Liquefaction Evaluation Analysis of Earthen Levees, *Earthq Spectra*, 28, 1331-1351.
- Athanasopoulos-Zekkos, A., Pence, H., Lobbetael, A., 2016. Ground Motion Selection for Seismic Slope Displacement Evaluation of Earthen Levees, *Earthq Spectra*, 32, 217-237.
- Blake, T. F., Hollingsworth, R. A., Stewart, J. P., editors, 2002. Recommended procedures for implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines for analyzing and mitigating landslide hazards in California, Southern California Earthquake Center, Los Angeles, CA.
- Boulanger, R. W., Idriss, I. M., 2007. Evaluation of cyclic softening in silts and clays, *J Geotech Geoenviron Eng*, 133, 641-652.
- Bray, J. D., Travarou, T., 2007. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *J Geotech Geoenviron Eng*, 133, 381-392.
- Building Seismic Safety Council (BSSC), 2015. NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Cetin, K. O., Bilge, H. T., 2012. Cyclic large strain and induced pore pressure models for saturated clean sands, *J Geotech Geoenviron Eng*, 138, 309-323.
- Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., Seed, R. B., 2009. Probabilistic models for cyclic straining of saturated clean sands, *J Geotech Geoenviron Eng*, 135, 371-386.
- Chiaradonna, A., Tropeano, G., d'Onofrio, A., Silvestri, F., 2016. A simplified method for pore pressure buildup prediction: from laboratory cyclic tests to 1D soil response analysis in effective stress conditions, 6th Italian Conference of Researchers in Geotechnical Engineering, CNRIG 2016; Auditorium of Department of Arts of the Alma Mater Studiorum Bologna, *Procedia Engineering*, 158, 302-307.
- CIRIA, 2013. The International Levee Handbook, CIRIA, US Army Corp of Engineers, French Committee for Dams and Hydraulic Works, CIRIA C731.
- Department of water resources of the State of California (CA-DWR), 2012. Urban Levee Design Criteria, May 2012.
- Department of water resources of the State of California (CA-DWR), 2015. Guidance document for geotechnical analyses. Prepared for by URS Corporation California Dept. of Water Resources, Sacramento, CA.
- Duku, P. M., Stewart, J. P., Whang, D. H., Yee, E., 2008. Volumetric strains of clean sands subject to cyclic loads, *J Geotech Geoenviron Eng*, 134, 1073-1085.
- Duncan, J.M., Wright, S.G., Brandon, T.L., 2014. Soil Strength and Slope Stability, 2nd Edition, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.
- Facciorusso, J., Madiati, C., Vannucchi, G. 2016. The 2012 Emilia earthquake (Italy): Geotechnical characterization and ground response analyses of the paleo-Reno river levees. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 86, 71-88.

- Green, R. A., Allen, J., Wotherspoon, L., Cubrinovski, M., Bradley, B., Bradshaw, A., Cox, B., Algie, T., 2011. Performance of Levees (Stopbanks) during the 4 September 2010 Mw 7.1 Darfield and 22 February 2011 Mw 6.2 Christchurch, New Zealand, Earthquakes, *Seismol Res Lett*, 82, 939-949.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), MNO-12. Oakland, CA.
- Japan Institute of Country-ology and Engineering (JICE), 2007. Guidance of maximum water level calculation at normal time for inspection of seismic performance for river structures, JICE (in Japanese).
- Jongejan, R. B., Maaskant, B., 2015. Quantifying flood risks in the Netherlands, *Risk Analysis*, 35, 252-264.
- Kramer, SL and Wang C, 2015. Empirical model for estimation of the residual strength of liquefied soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 141, 04015038-1-15.
- Kwak, D. Y., Stewart, J. P., Brandenburg, S. J., Mikami, A., 2016a. Characterization of seismic levee fragility using field performance data, *Earthq Spectra*, 32, 193-215.
- Kwak, D. Y., Stewart, J. P., Brandenburg, S. J., Mikami, A., 2016b. Seismic levee system fragility considering spatial correlation of demands and component fragilities, *Earthq Spectra*, 32, 2207-2228.
- McGuire, R. K., 2004. Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), MNO-10, Oakland, California.
- Miller, E. A., Roycroft, G. A., 2004. Seismic performance and deformation of levees: four case studies, *J. Geotech. & Geoenviron. Eng.*, 130, 344-354.
- Ministero delle Infrastrutture - Italia, 2008. Norme tecniche per le costruzioni, Decreto Ministeriale, 14 January 2008, *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* No. 29, Roma.
- Ministry of Forests, Lands, and Natural Resource Operations (MFLNRO) - British Columbia, 2014. Seismic Design Guidelines for Dikes, Flood Safety Division, 2nd Edition, February 2014.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) - Japan, 2012. Inspection manual of seismic levee performance regarding Level 2 earthquake (in Giapponese).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) - Japan, 2007. Inspection guideline for seismic performance of river structures (in Giapponese).
- Ministry of Transport, Public Works and Water Management – The Netherlands, 2009. Water Act.
- Ministry of Water Resources - China, 2005. Code of geological investigation of levee project (SL188-2005). China water power press, Beijing (in Chinese).
- Ministry of Water Resources - China, 2008. Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower (GB50487-2008). China planning press, Beijing (in Chinese).
- Ministry of Water Resources - China, 2013. Code for design of levee project (GB50286-2013). China planning press, Beijing (in Chinese).
- New Zealand Society on Large Dams (NZSOLD), 2015. New Zealand dam safety guidelines.
- Sasaki, Y., 2009. River dike failures during the 1993 Kushiro-oki Earthquake and the 2003 Tokachioki Earthquake, Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design, T. Kokusho (editor), 131-157.
- Sasaki, Y., Towhata, I., Miyamoto, K., Shirato M., Narita, A., Sasaki, T., Sako S., 2012. Reconnaissance report on damage in and around river levees caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, 52, 1016-1032.
- Shafiee, A., Stewart, J. P., Brandenburg, S. J., 2015. Reset of secondary compression clock for peat by cyclic straining, *J Geotech Geoenviron Eng*, 141, 02815001.
- Shinano River Work Office (SWO), 2008. Log of the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake by Shinano River Work Office, Nagaoka, Niigata (in Giapponese).
- Stewart, J. P., Afshari, K., Goulet C. A., 2017. Non-ergodic site response in seismic hazard analysis, *Earthq Spectra*, in press.
- Stewart, J. P., Afshari, K., Hashash, Y. M. A., 2014. Guidelines for Performing Hazard-Consistent One-Dimensional Ground Response Analysis for Ground Motion Prediction, PEER Report No. 2014/16, Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, CA.
- Stewart, J. P., Blake, T. M., Hollingsworth, R. A., 2003. A screen analysis procedure for seismic slope stability, *Earthq Spectra*, 19, 697-712.
- Tonni L., Gottardi G., Amoroso S., Bardotti R., Bonzi L., Chiaradonna A., d’Onofrio A., Fioravante V., Ghinelli A., Giretti D., Lanzo G., Madiati C., Marchi M., Martelli L., Monaco P., Porcino D., Razzano R., Rosselli S., Severi P., Silvestri F., Simeoni L., Vannucchi G. 2015. “Analisi dei fenomeni deformativi indotti dalla sequenza sismica emiliana del 2012 su un tratto di argine del Canale Diversivo di Burana (FE)”, *Rivista Italiana di Geotecnica* (2), p. 28-58
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2000. Design and construction of levees, EM 1110-2-1913, USACE Washington, DC.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2011. Design of I-walls, Appendix I: Length effects in levee system reliability, Washington DC.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2014. Draft document, Guidelines for seismic evaluation of levees, ETL 1110-2-580, USACE Washington, DC.
- Yee, E., Duku, P. M., Stewart, J. P., 2014. Cyclic volumetric strain behavior of sands with fines of low plasticity, *J Geotech Geoenviron Eng*, 140, 04013042.
- Zimmaro, P., Kwak, D.Y., Stewart, J.P., Brandenburg, S.J., Balakrishnan, A., Jongejan, R., Ausilio, E., Dente, G., Xie, J., Mikami, A. 2017. Procedures from international guidelines for assessing seismic risk to flood control levees. Submitted for publication, *Earthq Spectra*, in press.

RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato supportato dal California Department of Water Resources (CA-DWR) con numero di contratto 4600008849. Ogni opinione, risultato, e conclusione o raccomandazione presente in

questo articolo sono esclusiva responsabilità degli autori e non riflettono necessariamente quelle del CA-DWR e FOREM. Ringraziamo Grant Lovell, Tonkin and Taylor per le informazioni sulle linee guida in Nuova Zelanda. Ringraziamo anche Derek Wilshire, segretario della New Zealand society of large dams (NZSOLD), per avere fornito accesso alle New Zealand dam safety guidelines (2015). Ringraziamo inoltre Steve Mahnke, CA-DWR, Leslie F. Harder, Jr., HDR Inc., Vlad G. Perlea e George Hu, U.S. Army Corps of Engineers (USACE) per i loro utili consigli come membri dell'expert review panel per questo progetto.

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF FLOOD-CONTROL LEVEES

Keywords: Levee systems, seismic performance, site-response, risk mitigation.

ABSTRACT:

Drawing upon best practices identified from the review of existing guidelines for flood control levees, we recommend detailed step-by-step framework for levee risk assessment at the section-level and for levee systems. We depart from the analysis of engineering procedures for estimating the seismic performance of major flood control levees as given in guidelines documents and design codes from Canada (British Columbia), China, Italy, Japan, New Zealand, the Netherlands, and the United States of America (USA). Some guidelines carry the weight of law whereas compliance is optional for others. The proposed framework comprises six steps. We define methodologies for preliminary screening and site-levee characterization. We then propose a comprehensive hazard assessment in which probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) is combined with water level assumed to be present during design seismic event. For critical levee systems, we recommend the use of site-specific PSHA that incorporates non-ergodic site response. We recommend to consider all viable mechanisms for ground failure assessment, including liquefaction, cyclic softening, seismic compression, permanent shear deformations/landsliding, and post-cyclic accelerated volume change in peat. Liquefaction analysis should be carefully considered using procedures with distinct stages of analysis related to susceptibility, triggering, and effects. The proposed procedure is directed toward risk assessment for individual levee segments. We also discuss the extension of this framework to assess risk for a levee system comprised of many segments. Finally, we recommend strategies for post-earthquake response and risk mitigation strategies.