

STUDIO SPERIMENTALE DELLA RISPOSTA CICLICA DI PILE DA PONTE SOGGETTE A SCALZAMENTO DELLE FONDAZIONI

Andrea Ciacimino
Politecnico di Torino
andrea.ciacimino@polito.it

Sebastiano Foti
Politecnico di Torino
sebastiano.foti@polito.it

Ioannis Anastasopoulos
ETH Zurich
ioannis.anastasopoulos@igt.baug.ethz.ch

Sommario

Lo scalzamento localizzato di pile da ponte rappresenta una delle principali cause di collasso di strutture esistenti. I fenomeni erosivi comportano infatti un drammatico deterioramento delle prestazioni del sistema fondazionale, in particolar modo nei confronti di azioni orizzontali. La presente nota tratta i risultati di una serie di prove sperimentali in centrifuga, volte alla caratterizzazione della risposta di una fondazione soggetta a scalzamento localizzato e generalizzato. A tal proposito, è stata in primo luogo sviluppata una metodologia sperimentale capace di simulare entrambi gli aspetti (idraulico e meccanico) del fenomeno. Tale metodologia è stata quindi impiegata per valutare il comportamento ciclico di un pozzo di fondazione cilindrico in condizioni drenate. I risultati delle prove mostrano l'impatto dello scalzamento localizzato sulle prestazioni dell'opera, in particolar modo in termini di riduzione della rigidità rotazionale ciclica. Tale riduzione è ancor più marcata nel caso di scalzamento uniforme, che comporta in aggiunta un aumento del cedimento permanente accumulato.

1. Introduzione

I fenomeni di scalzamento delle fondazioni in alveo rappresentano una delle principali cause di collasso di ponti esistenti. Wardhana e Hadipriono (2000) riportano che il 48% dei crolli avvenuti negli USA tra il 1989 e il 2000 (503 casi in tutto) è avvenuto a seguito di scalzamento localizzato dovuto a fenomeni alluvionali. L'impatto del fenomeno idraulico sulle prestazioni del sistema fondazionale è particolarmente rilevante nel caso in cui si analizzi il comportamento dell'opera soggetta a carichi orizzontali. Diversi studi mostrano infatti come la vulnerabilità sismica di ponti esistenti aumenti significativamente a seguito di erosione localizzata (e.g. Wang et al., 2014).

Nonostante il processo di scalzamento sia stato estensivamente studiato da un punto di vista idraulico negli anni passati (e.g., Melville e Coleman, 2000), un numero limitato di studi si è concentrato sulla valutazione delle conseguenze meccaniche di tale processo (e.g., Qi et al., 2016). Nella pratica comune, i due aspetti del problema, *idraulico* e *meccanico*, sono infatti trattati separatamente: la profondità di scalzamento viene stimata mediante metodi numerici e correlazioni empiriche e viene poi utilizzata per valutare il deterioramento delle prestazioni del sistema resistente. Un simile approccio non consente però di associare le conseguenze meccaniche del fenomeno allo scenario idraulico che le ha prodotte. La reale geometria del problema è quindi di solito approssimata adottando una superficie di scalzamento idealizzata (un cono con pendenza pari all'angolo di stato critico del materiale) o, più frequentemente, trascurandola del tutto, simulando il processo attraverso la rimozione di strati di terreno di spessore costante (equiparando quindi erosione localizzata e generalizzata).

Recenti studi (Foti e Sabia, 2011; Chortis et al., 2020) mostrano però come la geometria e l'asimmetria della superficie di scalzamento possano risultare rilevanti in determinate condizioni.

La presente nota si inserisce in tale contesto, presentando i principali risultati di una serie di prove condotte in centrifuga. Al fine di studiare sperimentalmente mediante modellazione fisica entrambi gli aspetti del fenomeno, è stata sviluppata una nuova metodologia denominata *decoupled hybrid approach* (Ciancimino, 2021; Ciancimino et al. 2021). Tale metodologia è stata quindi applicata al fine di valutare gli effetti dello scalzamento sulle prestazioni cicliche di un pozzo di fondazione cilindrico. Nonostante lo studio si concentri prevalentemente sui fenomeni di scalzamento localizzato, gli effetti di un'eventuale erosione generalizzata dell'alveo sono stati ugualmente studiati al fine di identificare e quantificare le differenze tra le conseguenze indotte dai due differenti processi.

2. Definizione del problema e Metodologia sperimentale

La struttura prototipo consiste in una pila da ponte snella, di altezza 6.9 m, supportata da una fondazione a pozzo cilindrica di diametro ed altezza 2 m, posta in uno strato omogeneo di sabbia fine silicea (Perth sand) caratterizzata da una un'elevata densità relativa $D_R = 80\%$ (Fig. 1a). Volendo valutare l'impatto dello scalzamento sulle prestazioni della fondazione, si è deciso di realizzare un modello strutturale della pila praticamente rigido e di assimilare l'impalcato soprastante ad una massa concentrata, definita al fine di ottenere un fattore di sicurezza verticale $FS_V = 8$ corrispondente ad una pila moderatamente caricata (si veda Ciancimino et al., 2021). I modelli realizzati per studiare la struttura prototipo sono rappresentati in Fig. 1b.

La metodologia sperimentale, sviluppata per studiare entrambi gli aspetti del fenomeno dello scalzamento, prevede in primo luogo lo studio dei processi idraulici che portano all'erosione localizzata intorno la fondazione (Fig.2-Step1). A tal proposito, è stata condotta una serie di prove idrauliche su modelli a scala ridotta in condizioni 1g mediante un apparato recente sviluppato all'ETH di Zurigo: il *Miniaturised Tidal Generator* (MTG, Jones e Anastasopoulos, 2021). Il fenomeno dello scalzamento localizzato è simulato ponendo il modello fisico nel canale principale dell'apparato, e sottoponendolo ad un flusso idraulico pseudo-stazionario generato da un sistema di serbatoi d'acqua in pressione. Il livello dei serbatoi e la profondità del flusso sono monitorati mediante sensori ultrasonici, così da poter ottenere i principali parametri caratteristici del flusso idraulico, quali la velocità e la portata media. La progressiva erosione del terreno è monitorata mediante una serie di foto di alta precisione scattate ad intervalli di tempo regolari. La superficie di scalzamento viene inoltre acquisita a diversi istanti del processo idraulico mediante l'utilizzo di uno scanner 3D (Fig.1-Step2).

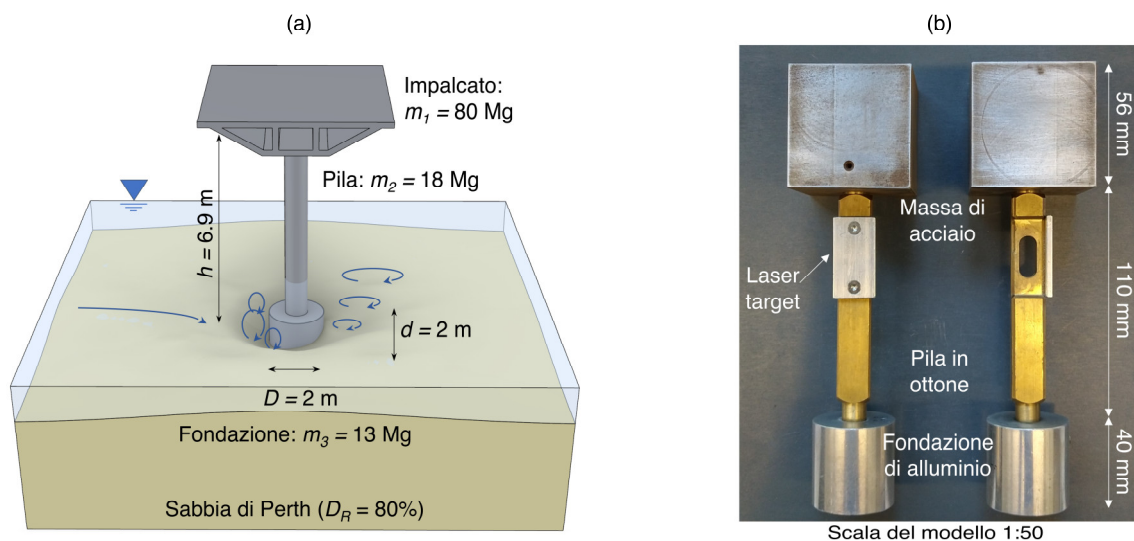


Fig 1. Definizione del problema: (a) prototipo di pila da ponte; (b) modello della struttura (modificata da Ciancimino et al., 2021).

Lo step successivo consiste nel riprodurre la geometria del problema in modelli fisici che possano essere testati in centrifuga. La morfologia del terreno acquisita al termine del processo di scalzamento (in condizioni di equilibrio) viene quindi regolarizzata e stampata in 3D, al fine di produrre calchi della superficie di scalzamento (Fig.2-Step3). Le prestazioni della fondazione sono infine studiate sperimentalmente mediante prove condotte nella centrifuga geotecnica dell'ETH di Zurigo (Fig.2-Step4) su modelli in scala 1:N soggetti ad un'accelerazione centrifuga pari a Ng , così da ottenere uno stato tensionale del materiale coerente con quello del prototipo a scala reale.

La presente nota tratta soltanto i risultati delle prove meccaniche condotte per analizzare il comportamento ciclico della fondazione in condizioni drenate. Per ulteriori dettagli riguardo lo studio si faccia riferimento a Ciancimino (2021) e Ciancimino et al. (2021).

Le prove sono state effettuate in controllo di spostamento, applicando in un dato punto della struttura uno spostamento orizzontale mediante un attuttore meccanico a vite. Il protocollo di carico consiste in 8 serie di cicli caratterizzate da ampiezze di spostamento crescenti. Per ogni ampiezza sono applicati 10 cicli di carico, di conseguenza la struttura è sottoposta ad un totale di 80 cicli.

L'attuttore è collegato alla pila attraverso una cerniera appositamente progettata per consentire alla pila di ruotare e cedere liberamente. Lungo il braccio dell'attuttore è presente una cella di carico utilizzata per misurare la forza orizzontale necessaria a produrre lo spostamento imposto. A partire da tale forza è possibile ricavare il momento applicato come:

$$M = H \cdot h_{act} \quad (1)$$

dove h_{act} è l'altezza del punto di applicazione della forza, misurata rispetto la base della fondazione. Il moto nel piano della struttura è monitorato mediante un sistema composto da tre laser ottici, che permette di definire la rotazione θ e il cedimento w della pila.

3. Risultati e discussione

In Fig.3 sono riportati i risultati delle prove cicliche condotte per i diversi scenari idraulici analizzati: (i) fondazione non scalzata; (ii) fondazione soggetta a scalzamento localizzato; (iii) fondazione soggetta a scalzamento uniforme (profondità di scalzamento pari 1 m, equivalente alla profondità misurata in condizioni di erosione localizzata).

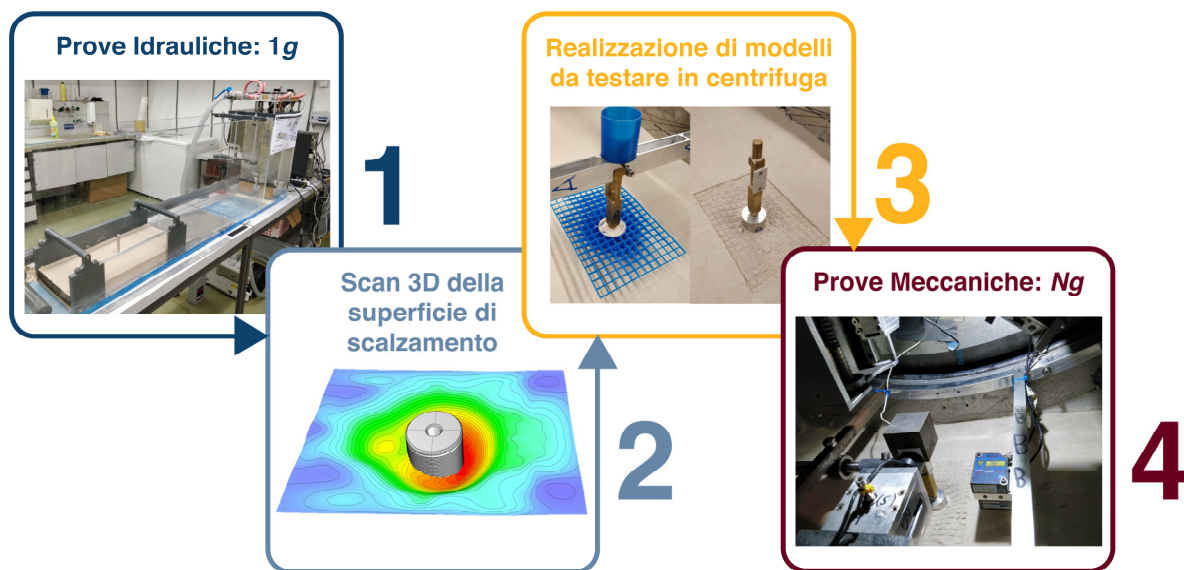


Fig 2. Metodologia sperimentale: (1) studio del processo idraulico di scalzamento mediante il MTG; (2) scan 3D della superficie di scalzamento; (3) stampa 3D dei calchi utilizzati per riprodurre la geometria della superficie; (4) studio del problema meccanico mediante prove in centrifuga.

I cicli momento rotazione $M - \theta$ sono confrontati con le curve di pushover monotono in Fig. 3a. Si noti che i risultati rappresentati nel caso di fondazione soggetta a scalzamento uniforme comprendono soltanto i primi sei pacchetti di cicli; gli ultimi due, condotti ad ampiezze elevate, sono infatti stati rimossi poiché la risposta della fondazione è risultata essere eccessivamente asimmetrica, probabilmente a causa delle eccessive deformazioni raggiunte.

Il confronto tra le risposte ottenute per i diversi scenari idraulici mostra come l'impatto dello scalzamento modifichi le prestazioni della fondazione. In particolare, il momento massimo (definito sulla base dei risultati delle prove di pushover monotono, curve in nero in Fig. 3a) decresce significativamente nel caso di scalzamento localizzato. Tale impatto è ancor più evidente nel caso di erosione uniforme, con una riduzione della capacità pari a circa il 50%.

Le differenze precedentemente esposte sono apparentemente meno marcate nel caso di prove cicliche. I cicli $M - \theta$ presentano infatti una notevole sovra resistenza se confrontati con le corrispondenti curve monotone. Tale sovra resistenza può essere quantificata mediante l'*overstrength ratio* r_M , definito come rapporto tra l'incremento di momento resistente ciclico rispetto alla corrispondente capacità monotona (Kokkali et al., 2015). Nella prova condotta su fondazione non scalzata, il valore di r_M ottenuto è pari al 120%, mentre è pari al 135% in caso di fondazione soggetta a scalzamento localizzato. Infine, r_M è pari a circa il 210% nel caso di fondazione soggetta ad erosione uniforme. Come suggerito da Kokkali et al. (2015), la sovra resistenza è data da due differenti meccanismi: da un lato la progressiva densificazione (e il conseguente irrigidimento della risposta) della sabbia al di sotto della fondazione; dall'altro l'aumento dell'approfondimento della fondazione dovuto all'accumulo di cedimenti permanenti. Quest'ultimo meccanismo è particolarmente rilevante nel caso di fondazione soggetta a scalzamento generalizzato, che è inizialmente caratterizzata da un approfondimento pari a 1 m.

In Fig. 3b è rappresentato il cedimento permanente accumulato dalla fondazione in funzione del numero di cicli applicati. Nei primi due pacchetti di cicli, condotti a basse ampiezze, la risposta della fondazione non sembra essere influenzata particolarmente dallo scenario idraulico considerato.

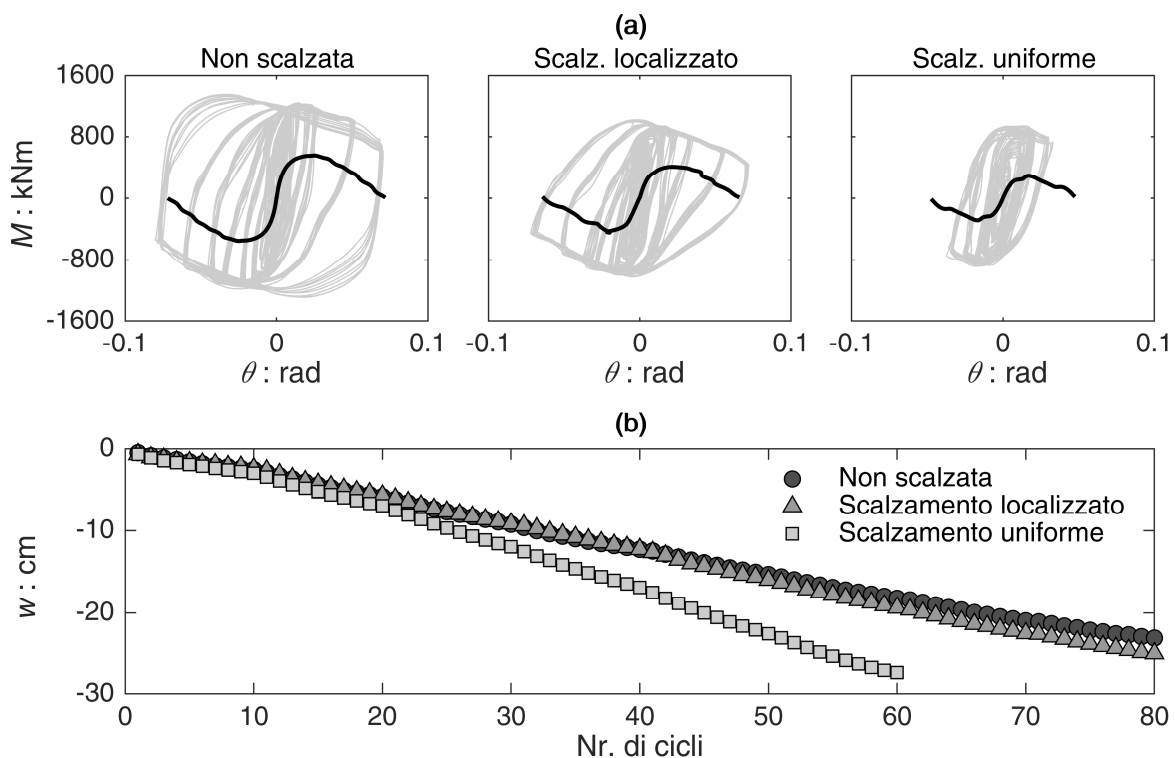


Fig 3. (a) Confronto tra cicli $M - \theta$ e curve di pushover ottenute per carico monotono. (b) Accumulo di cedimento permanente in funzione del numero di cicli (modificata da Ciancimino et al., 2021).

All'aumentare dell'ampiezza di rotazione applicata, il comportamento della fondazione soggetta ad erosione uniforme tende però a discostarsi. Mentre le risposte della fondazione non scalzata e soggetta a scalzamento localizzato tendono a stabilizzarsi, l'entità del cedimento ciclico (dovuto a un singolo ciclo di carico) accumulato dalla fondazione soggetta ad erosione uniforme continua ad aumentare.

Le precedenti considerazioni possono essere analizzate alla luce dei parametri ciclici caratteristici del comportamento nonlineare della fondazione. In Fig. 4 è riportata l'evoluzione della rigidezza rotazionale $K_{r,c}$ e del cedimento w_c (prodotto da un singolo ciclo di carico) per il primo e il terzo pacchetto di cicli. Si noti che la rigidezza $K_{r,c}$ è stata calcolata in riferimento ai cicli $M+P\delta - \theta$, considerando quindi il momento aggiuntivo dovuto agli effetti del secondo ordine, rilevanti in caso di strutture snelle.

Il progressivo irrigidimento della risposta ciclica è ben visibile nel primo pacchetto, ed in particolar modo nei primi 5 cicli di carico (Fig. 4a). Tale irrigidimento è principalmente dovuto alla densificazione del terreno sottostante la fondazione, sottoposto a diversi cicli di carico-scarico. Osservando l'evoluzione di w_c si notano infatti valori relativamente elevati di cedimento, che tendono però a stabilizzarsi rapidamente. Si nota inoltre come, effettivamente, lo scenario idraulico non modifichi significativamente l'entità di w_c per basse ampiezze di rotazione.

Passando dal primo al terzo pacchetto di cicli, l'incremento di ampiezza di rotazione comporta una diminuzione della rigidezza $K_{r,c}$ dovuta alla risposta fortemente non lineare del terreno. I valori di $K_{r,c}$ ottenuti nel terzo pacchetto sono infatti notevolmente inferiori rispetto ai precedenti (Fig. 4b). D'altra parte, il comportamento della fondazione tende a stabilizzarsi all'aumentare del numero di cicli applicati, e la rigidezza $K_{r,c}$ diviene pressoché costante.

La maggiore ampiezza di rotazione applicata comporta anche un incremento del cedimento medio w_c osservato, dovuto alla mobilitazione del meccanismo di capacità portante al di sotto della fondazione. Tale cedimento tende progressivamente a ridursi all'aumentare del numero di cicli, ma con una pendenza decisamente inferiore rispetto al primo pacchetto di cicli. In tali condizioni, l'erosione uniforme dell'alveo ha un impatto sul comportamento verticale della fondazione, portando ad un incremento di w_c di circa il 50%. Al contrario, lo scalzamento localizzato non ha un effetto particolarmente rilevante.

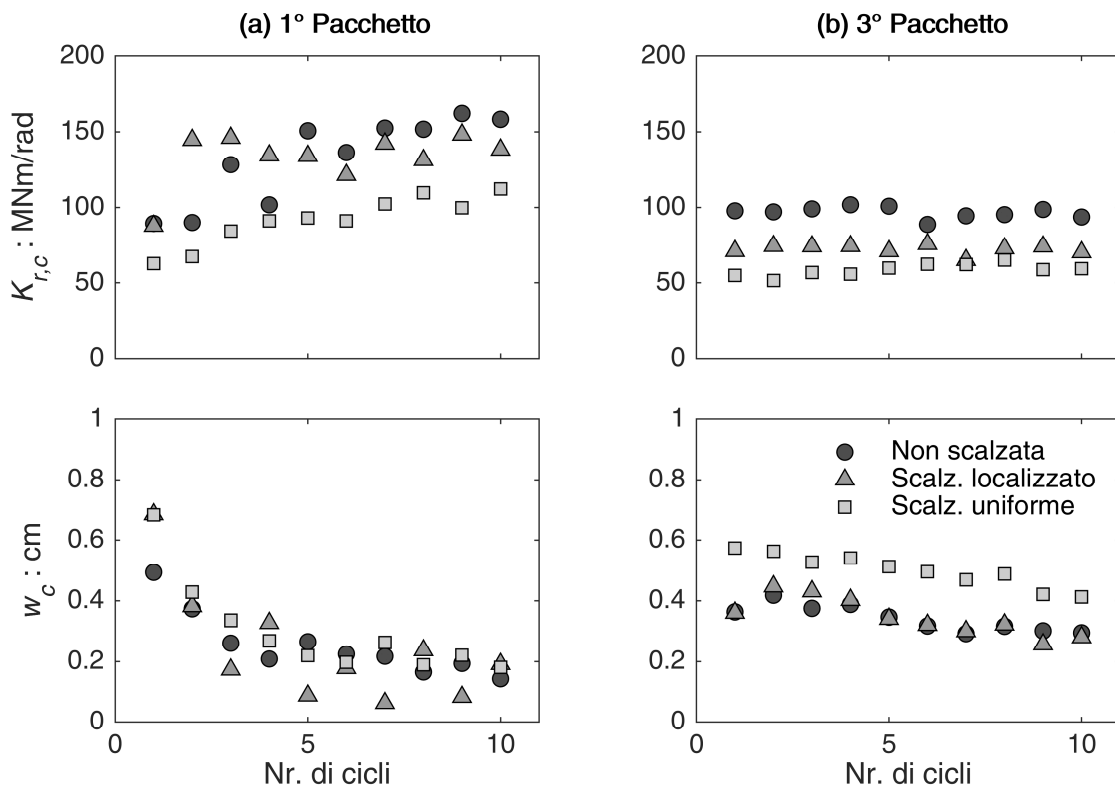


Fig 4. Confronto tra rigidezza rotazionale e cedimento ciclico (prodotto da un singolo ciclo di carico) ottenuti per (a) il primo e (b) il terzo pacchetto di cicli.

4. Conclusioni

I fenomeni di scalzamento localizzato e generalizzato delle fondazioni di pile da ponte poste in alveo hanno un notevole impatto sulle prestazioni orizzontali dell'opera. Nella presente nota, tali fenomeni sono stati analizzati mediante una serie di prove sperimentali volte a caratterizzare il comportamento orizzontale monotono e ciclico di una fondazione a pozzo cilindrica. La metodologia sperimentale sviluppata ha permesso di studiare gli effetti meccanici dei due tipi di scalzamento tenendo debitamente conto dei differenti scenari idraulici che li hanno prodotti.

I risultati mostrano innanzitutto una significativa riduzione della capacità e della rigidità rotazionale della fondazione, dovuta prevalentemente alla riduzione del momento resistente esercitato dal terreno posto ai lati della fondazione. Tale riduzione è più pronunciata in caso di erosione uniforme dell'alveo. Quest'ultima induce anche un significativo aumento del cedimento permanente accumulato sotto carichi ciclici.

Il confronto tra i risultati delle prove cicliche e le corrispondenti curve di pushover monotono mostra come l'applicazione di un elevato numero di cicli di carico in condizioni drenate comporti un progressivo irrigidimento della risposta della fondazione. Tale irrigidimento, quantificato mediante l'*overstrength ratio* r_M , è risultato molto più marcato nel caso di fondazione soggetta a scalzamento uniforme. In tale condizione, infatti, l'effetto di densificazione del terreno al di sotto della fondazione è accompagnato da un progressivo approfondimento del pozzo dovuto all'accumularsi di cedimenti permanenti.

Le differenze precedentemente esposte evidenziano l'importanza della geometria del problema, che deve necessariamente essere definita in funzione dello scenario idraulico di progetto. La comune assunzione di scalzamento uniforme è sicuramente (e talvolta eccessivamente) cautelativa in condizioni statiche, ma non necessariamente in condizioni dinamiche. La ridotta capacità della fondazione comporta infatti una riduzione (a sfavore di sicurezza) delle azioni inerziali trasmesse dal pozzo alla sovrastruttura, ed al contempo un incremento sostanziale dei cedimenti, e delle eventuali rotazioni, permanenti accumulate dalla pila.

Bibliografia

- Chortis G., Askarinejad A., Prendergast L., Li Q., Gavin K. (2020). "Influence of scour depth and type on p-y curves for monopiles in sand under monotonic lateral loading in a geotechnical centrifuge", *Ocean Engineering*, 197, 106838.
- Ciancimino A. (2021). "Performance of caisson foundations subjected to flood-induced scour", Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 1-251.
- Ciancimino A., Jones L., Sakellariadis L., Anastasopoulos I., Foti S. (2021). "Experimental assessment of the performance of a bridge pier subjected to flood-induced foundation scour", *Géotechnique*, 1-18, doi:<http://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.230>.
- Foti S., Sabia D. (2010). "Influence of foundation scour on the dynamic response of an existing bridge", *Journal of bridge engineering*, 16, 295-304.
- Jones L., Anastasopoulos I. (2021). "Miniaturised Tsunami Generator to model the Interaction of Tsunamis with Coastal infrastructure", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 21(3), 135-149, doi:10.1680/jphmg.19.0002.
- Kokkali P., Anastasopoulos I., Abdoun T., Gazetas G. (2014). "Static and cyclic rocking on sand: centrifuge versus reduced-scale 1g experiments", *Géotechnique*, 64(11), 865-880.
- Melville B.W., Coleman S.E. (2000). Bridge scour. Water Resources Publication, Highlands Ranch, CO, USA.
- Qi W.G., Gao F., Randolph M.F., Lehane B.M. (2016). "Scour effects on p-y curves for shallowly embedded piles in sand", *Géotechnique*, 66, 648-660.
- Wang Z., Dueñas-Osorio L., Padgett J.E. (2014). "Influence of scour effects on the seismic response of reinforced concrete bridges", *Engineering structures*, 76, 202-214.
- Wardhana K., Hadipriono F.C. (2003). "Analysis of recent bridge failures in the United States Journal of performance of constructed facilities", *J. Perform. Constr. Facil.*, 17(3), 144-150.