

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/395530701>

A rapid method for displacement evaluation of piled raft foundations in cohesive soils

Conference Paper · June 2025

CITATIONS

0

READS

4

5 authors, including:



Matteo Corigliano

Politecnico di Milano

12 PUBLICATIONS 27 CITATIONS

SEE PROFILE



Matteo Zerbi

Politecnico di Milano

17 PUBLICATIONS 23 CITATIONS

SEE PROFILE



Luca Flessati

Delft University of Technology

85 PUBLICATIONS 413 CITATIONS

SEE PROFILE

Un metodo speditivo per le verifiche SLU e SLE di fondazioni miste platee su pali poste su terreni coesivi

M. Corigliano, M. Zerbi, C.G. di Prisco
Politecnico di Milano (IT)

P. Bongio
Tecne – Gruppo Autostrade per l'Italia (IT)

L. Flessati
Technische Universiteit Delft (NL)

ABSTRACT: Molti tratti della rete autostradale italiana sono stati realizzati negli anni '60 e '70, si rende quindi necessaria una verifica delle strutture delle opere d'arte principali (viadotti, ponti) tenendo conto delle disposizioni contenute nei più recenti testi normativi di riferimento, soprattutto in campo sismico. Nella prassi progettuale ordinaria si adottano metodi di verifica delle fondazioni su pali basate su ipotesi semplificative e generalmente conservative, che non consentono di sfruttare in maniera razionale e completa le reali marginalità di sicurezza che le fondazioni stesse sono in grado di offrire. L'uso di analisi numeriche non lineari può superare queste limitazioni; tuttavia, l'onere computazionale richiesto è incompatibile con la necessità di prendere in considerazione in tempi ragionevoli il larghissimo numero di fondazioni di viadotti italiani attualmente in uso. A questo scopo, è stato sviluppato un metodo rapido e affidabile per la verifica geotecnica (in questa memoria non è considerata la verifica strutturale riguardante pali e platea) negli spostamenti di fondazioni su pali, basato sulla definizione di un modello costitutivo generalizzato. Il modello sviluppato, ispirato alla teoria del macroelemento, consiste in un legame costitutivo non lineare che, considerando l'interazione platea-pali-terreno, mette in relazione le forze applicate sulla fondazione e gli spostamenti indotti, tenendo conto dell'accoppiamento fra le componenti di carico stesse. Il modello è stato sviluppato e calibrato attraverso l'utilizzo di un'ampia campagna di analisi numeriche agli elementi finiti, eseguite su palificate poste su strati di terreno coesivo e sollecitate in condizioni non drenate. Il metodo sviluppato è stato poi impiegato per la verifica di sicurezza di fondazioni, caratterizzate da pali di lunghezza pressoché coincidente con la dimensione maggiore della platea.

INTRODUZIONE

Le fondazioni a platea su pali (PR, “piled raft”) sono ampiamente usate per sostenere pile di ponti e viadotti posti su terreni soffici. Devono resistere a carichi inclinati ed eccentrici indotti da esercizio e sisma, in modo da evitare il collasso e spostamenti eccessivi che ne pregiudichino l'operatività.

Nella pratica comune (NTC2018), le verifiche di PR si basano su ipotesi semplificate: (i) disaccoppiando le direzioni di carico, e (ii) trascurando l'interazione tra platea e terreno. Tuttavia, studi numerici e sperimentali dimostrano che l'interazione platea-pali-terreno influisce sulla risposta del sistema, specialmente nel caso di platee di fondazione di dimensioni elevate (Mandolini, 2005 e Corigliano et al., 2023), dove i pali sono più corti rispetto alla dimensione maggiore della platea ($L_P/L < 1$, Fig. 1a).

Per lo studio di fondazioni profonde, vengono eseguite prove in piccola scala in centrifuga o analisi numeriche. Le prime permettono la modellazione fisica su scala ridotta, ma sono costose. Le analisi numeriche richiedono notevoli risorse computazionali e accurata calibrazione, che le rendono onerose per fasi di progetto preliminari.

Un'alternativa valida è l'approccio del macroelemento (ME), basato su risultati sperimentali o numerici, che semplifica i problemi di interazione terreno-struttura (Nova & Montrasio, 1991) usando pochi gradi di libertà, riducendo drasticamente il numero di incognite. Il ME può essere sviluppato per riprodurre sia la risposta a carichi monotoni che ciclici. Può essere integrato in analisi agli elementi finiti della sovrastruttura per introdurre l'effetto di interazione terreno struttura (normalmente trascurato assumendo la base della sovrastruttura rigidamente incastrata) senza aumentare l'onere computazionale (non è necessario modellare la fondazione e il dominio di terreno interagente con essa).

Recentemente, sono stati sviluppati ME per gruppi di pali (Gorini & Callisto, 2023 e Iodice et al., 2024) che assumono la platea staccata dal terreno.

In questo lavoro, gli autori propongono un ME per grandi PR sotto carichi piani monotoni in argille sovraconsolidate in condizioni non drenate, considerando sia l'accoppiamento platea-terreno che tra le direzioni di carico. Il modello, ispirato al modello costitutivo per fondazioni superficiali proposto da Nova & Montrasio (1991), introduce molti elementi innovativi quali una superficie di snervamento di dimensione iniziale non nulla e due leggi di incrudimento accoppiate. Questo ME consente di calcolare rapidamente gli spostamenti per verifiche a stato limite ultimo (ULS) e a stato limite di esercizio (SLS) senza l'esecuzione di analisi numeriche, considerando la platea a contatto con il terreno.

In questo contributo, dopo una breve descrizione del ME proposto, si mostra come esso sia in grado di riprodurre gli spostamenti di una PR rappresentativa (Fig.1). Infine, il ME viene utilizzato per creare un abaco progettuale per ULS e SLS.

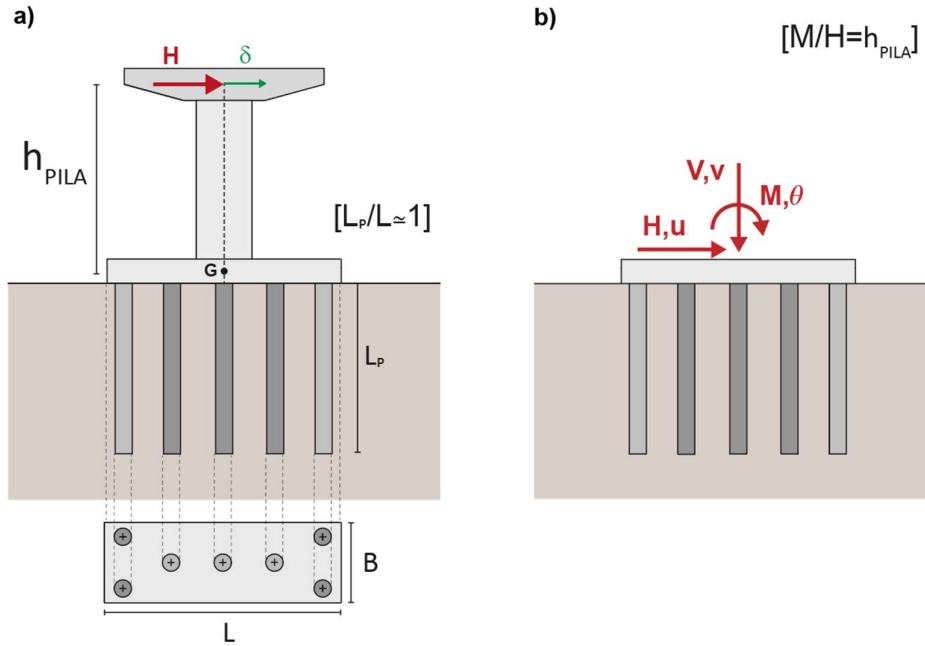


Figure 1. Pila tipica di viadotto costruito negli anni '60: (a) geometria e (b) schema carichi in fondazione.

1 MODELLO MATEMATICO

La legge costitutiva generalizzata, più ampiamente descritta in Corigliano et al., 2024b e in Appendice, assume come variabili statiche il carico verticale (V), il carico orizzontale (H) e il momento (M), mentre come variabili cinematiche il cedimento (v), lo spostamento orizzontale (u) e la rotazione (θ). Il modello costitutivo è elasto-plastico incrudente e assume: (i) una superficie di snervamento iniziale non nulla (f_0 in Fig.2), per tenere conto della reversibilità della risposta meccanica del sistema a bassi valori di carico, dovuta al comportamento elasticamente plastico assunto per l'argilla sovraconsolidata, (ii) una matrice di rigidezza simmetrica non diagonale (si noti però che i termini extradiagonali ottenuti numericamente sono molto piccoli

rispetto a quelli diagonali), (iii) una legge di flusso non associata (potenziale plastico g_0 in Fig.2), (iv) una superficie di snervamento non omotetica rispetto al dominio di interazione (F: GEO ID - Geotechnical Interaction Domain in Fig.2), questo implica una distorsione del luogo di plasticità durante il processo di carico e di conseguenza (v) due variabili di incrudimento che richiedono ciascuna una propria legge evolutiva. Si noti che f_0 è ipotizzata tangente ad F in $(-V_T, 0)$. Questo implica che, per semplicità, si è deciso di trascurare l'incrudimento strutturale che ha luogo nel caso di prove di pull-out, peraltro queste ultime di scarso interesse pratico.

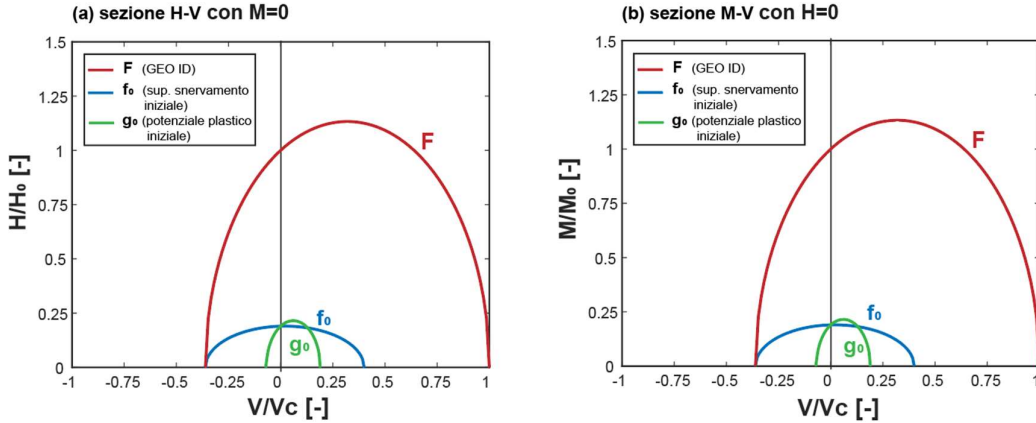


Figure 2. Rappresentazione non dimensionale (variabili non dimensionali definite in §Appendice) di GEO ID, superficie di snervamento iniziale e potenziale plastico iniziale.

La legge costitutiva proposta è stata calibrata utilizzando i risultati di analisi numeriche push-over in condizioni non drenate condotte con il metodo degli elementi finiti (FEM) su platee con pali. La superficie di rottura F ad ellissoide aperto differisce da quella ottenuta in Sakellariadis & Anastasopoulos 2022, Gorini & Callisto 2023, Iodice et al. 2024, relativa a gruppi di pali, in quanto, in questa memoria la platea è a contatto con il terreno e i pali sono assunti elastici e rigidamente incastrati ad essa.

Il modello richiede quattro parametri (V_c , V_T , H_0 , M_0) per definire il dominio di interazione, quattro parametri elastici (k_v , k_h , k_m , $k_{hm}=k_{mh}$), un parametro (R_0) per descrivere l'incrudimento e i due valori iniziali delle variabili di incrudimento (ρ_{c0} , β_0).

I primi quattro parametri rappresentano rispettivamente la capacità portante della fondazione sottoposta a carichi verticali centrati di compressione e trazione, orizzontale e puro momento. Tali parametri, dipendenti dal rapporto L_p/L e dalla resistenza non drenata del terreno, non richiedono l'esecuzione di analisi numeriche e sono determinati attraverso l'equilibrio limite e semplici formule di capacità portante seguendo l'approccio descritto in Corigliano et al., 2024 e 2025 e validato utilizzando i risultati di analisi numeriche agli elementi finiti.

L'approccio, al variare della geometria, è in grado di fornire una definizione del dominio di interazione, affidabile per lunghezze di pali minori o uguali alla dimensione maggiore della platea. Si noti che i quattro parametri sono determinati assumendo che la rottura possa avvenire solamente nel terreno (si trascura ad esempio la formazione di cerniere plastiche nei pali, che governa la non simmetria del dominio di interazione nel piano H-V in Gorini & Callisto, 2022).

I restanti parametri rappresentano rispettivamente le componenti della matrice elastica del sistema, i due valori iniziali non nulli delle variabili di incrudimento e la rigidità plastica iniziale. Uno studio parametrico estensivo, non riportato in dettaglio per brevità, ha evidenziato come questi parametri siano influenzati sia dalla rigidità relativa tra pali e terreno, sia dal rapporto L_p/L .

In Tabella 1 si riportano i valori dei parametri utilizzati in §Prestazioni del modello dove si applica il ME ad un caso studio. Lo studio ha consentito la costruzione di abaci dedicati, che permettono di trovare tali parametri per una rapida ed efficace applicazione del ME.

Tabella 1. Parametri del modello utilizzati in §2.

Parametro	Valore	[UdM]
V_C	138	[MN]
V_T	118	[MN]
H_0	66	[MN]
M_0	583	[MNm]
k_v	1300	[MN/m]
k_h	700	[MN/m]
k_m	70000	[MN/rad]
$k_{hm}=k_{mh}$	-1500	[MN/m]
ρ_{C0}	0.48	[-]
β_0	0.10	[-]
R_0	2	[MN/m]

2 PRESTAZIONI DEL MODELLO

Le capacità predittive del modello sono state valutate utilizzando i risultati di analisi numeriche non drenate agli elementi finiti di palificate poste in strati argillosi uniformi. Le fondazioni sono state sottoposte a carichi combinati V-H-M: dopo l'applicazione di un carico verticale iniziale, M e H sono stati incrementati monotonamente mantenendo costante il rapporto M/H, corrispondente all'altezza della pila ($M/H=4$ m; 10 m; 16,5 m; 22 m). Sono state effettuate varie analisi, ciascuna corrispondente a un carico verticale iniziale diverso.

In Figura 3 si mostra il confronto fra predizione del modello (linee continue) e risultati e numerici FEM (linea tratteggiata) per un set di analisi a $V=25$ MN (rappresentativo del peso dell'impalcato). L'accordo tra i risultati del ME e quelli ottenuti con l'analisi FEM è molto soddisfacente.

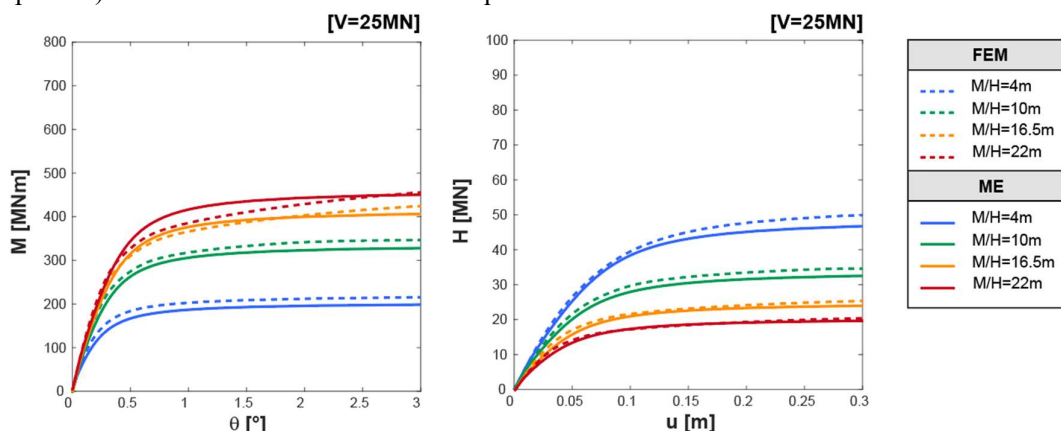


Figura 3. Prestazioni del modello nel riprodurre le curve push-over di fondazioni su pali a carico V-H-M.

3 APPLICAZIONE PRATICA

Una volta calibrato, il modello ME proposto rappresenta uno strumento semplice per la progettazione preliminare delle fondazioni dei ponti. Il modello ME permette di calcolare rapidamente l'evoluzione degli spostamenti del sistema fino al collasso, per percorsi di carico monotoni combinati. Può essere utilizzato sia per verifiche allo SLE che allo SLU.

In questo contributo, il modello ME è stato utilizzato per costruire un abaco di progetto per le verifiche sia allo SLU che allo SLE (Fig.4a), applicato al caso studio di una fondazione su pali (Fig.1b) per pila di ponte soggetta a un carico verticale permanente fisso proveniente dalla

sovrastuttura ($V=25\text{ MN}$) e a M e H concordi con un rapporto costante $M/H = h_{PILA}$. È stato assunto un intervallo significativo di valori $4\text{ m} < h_{PILA} < 28\text{ m}$.

Per ogni percorso di carico, il modello ME permette di calcolare l'evoluzione degli spostamenti della fondazione alla base della pila. Noti gli spostamenti della fondazione, la freccia orizzontale della testa della pila (δ in Fig.1) viene calcolata, trascurando la deformabilità della pila, come segue:

$$\delta = u + h_{PILA} \tan(\theta) \quad (1)$$

dove u e θ rappresentano rispettivamente lo spostamento orizzontale e la rotazione del sistema di fondazione. Le linee verdi nella zona bianca del grafico rappresentano le linee iso- δ : il livello di carico su ciascuna di queste linee induce la stessa freccia orizzontale alla testa della pila.

Il grafico può essere utilizzato per le verifiche (SLU e SLE).

Il GEO ID (linea rossa) definisce i limiti del dominio geotecnico ammissibile. Le zone in grigio scuro indicano livelli di carico non ammissibili. Le zone in grigio chiaro indicano livelli di carico a rapporti M/H qui non considerati. Per semplicità, in questa analisi non è stato applicato alcun fattore di sicurezza. La resistenza definita dall'involuppo di rottura del GEO ID viene raggiunta solo asintoticamente, richiedendo spostamenti o rotazioni molto grandi (come mostrato nelle curve carico-spostamento in Fig.4b), generalmente incompatibili con i requisiti di sicurezza della sovrastruttura associata. Di conseguenza, il GEO ID rappresenta un limite superiore della resistenza della fondazione, irraggiungibile da un punto di vista pratico. L'abaco permette una stima più realistica della resistenza disponibile per la verifica allo SLU, prescrivendo un valore di freccia che rispetti le limitazioni strutturali dell'impalcato.

L'abaco può essere utilizzato anche per le verifiche a SLE, valutando il valore atteso di freccia orizzontale per un percorso di carico M - H prescritto. In Figura 4b è rappresentata la curva push-over della fondazione sottoposta ad un carico a rapporto $M/H=16.5\text{ m}$ a $V=25\text{ MN}$ fissato. In Figura 4b sono anche riportati i valori del momento che rispettino le verifiche strutturali e geotecniche (come in Corigliano et al., 2023), eseguite a partire da risultati numerici FEM. In questo caso specifico il vincolo di spostamento sull'impalcato (δ) sembra essere più restrittivo di quanto lo siano le verifiche strutturali (Corigliano et al., 2023) sui pali (M_{STRU}) e la verifica geotecnica relativa al meccanismo di rottura globale del sistema ($M_{GEO}=M_{Lim}/\gamma$ con $\gamma=2.3$, NTC2018).

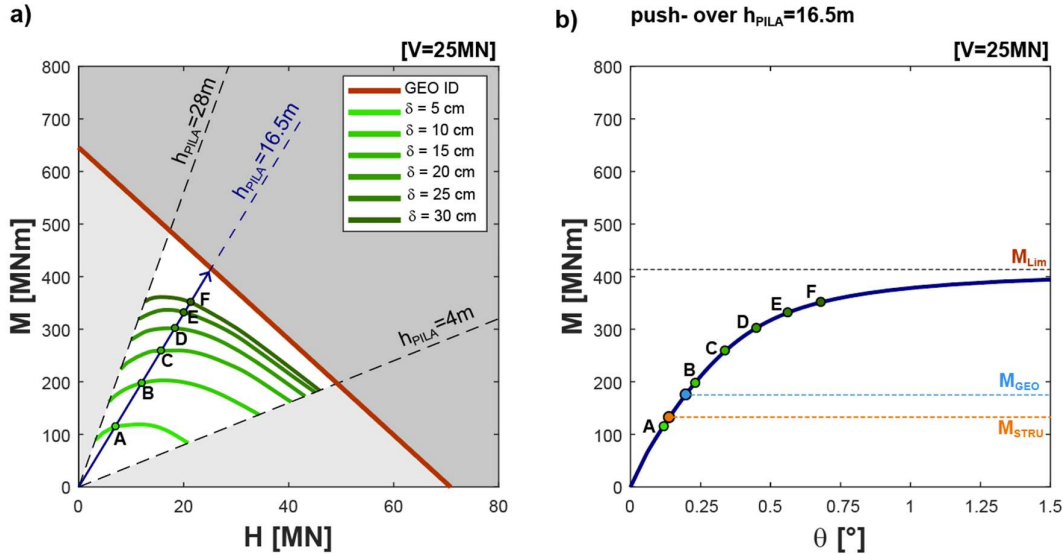


Figure 4. (a) Abaco di progetto per pila di ponte posta su PR in terreno argilloso e (b) curva push-over della fondazione nel caso di $M/H=16.5\text{ m}$.

4 CONCLUSIONI

Lo studio presentato dimostra l'efficacia di un metodo innovativo e speditivo per la verifica geotecnica delle fondazioni su pali, sviluppato per rispondere alle esigenze legate alla valutazione della sicurezza dei numerosi viadotti autostradali italiani ormai giunti al termine della loro vita utile. Il modello proposto, basato sulla teoria del macroelemento, consente di superare le limitazioni dei metodi semplificati attualmente in uso, che spesso portano a sottostime della sicurezza e a non sfruttare appieno le capacità offerte dal sistema di fondazione, offrendo una soluzione affidabile e computazionalmente efficiente per valutazioni su larga scala.

Il modello considera l'interazione tra platea, pali e terreno, cogliendo l'accoppiamento tra le componenti di carico e spostamento. Un'ampia serie di analisi agli elementi finiti su fondazioni in terreni coesivi in condizioni non drenate ha confermato la validità del metodo nel riprodurre il comportamento delle fondazioni su pali.

Il modello è stato applicato con successo alla verifica di fondazioni di viadotti realizzati negli anni '60, ipotizzate sotto carico pseudo-statico combinato per rappresentare le condizioni sismiche. I risultati evidenziano che il metodo può rappresentare uno strumento prezioso per verificare, secondo le norme sismiche attuali, le fondazioni di viadotti stradali e ferroviari, permettendo in molti casi di ottimizzare gli interventi di adeguamento o ricostruzione. Questo approccio rappresenta un significativo passo avanti nella gestione del patrimonio infrastrutturale esistente, offrendo una soluzione pratica ed efficace per affrontare le sfide legate alla sicurezza dei viadotti in contesti sismici.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato supportato da Tecne – Gruppo Autostrade per l'Italia, dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) Partenariato Esteso RETURN “Multi-Risk sciEnce for resilientT commUnities undeR a changiNg climate” e Progetto Dipartimento della Protezione Civile “ReLUIs 2024-2026” WP3 Task 3.3 “Vulnerabilità ai pericoli geo”.

APPENDICE

Il modello matematico è formulato in termini di forze generalizzate adimensionali $\mathbf{Q}$ e di spostamenti generalizzati coniugati $\mathbf{q}$ (da Nova & Montrasio, 1991):

$$\mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} \xi \\ h \\ m \end{Bmatrix} = \frac{1}{V_c} \begin{Bmatrix} V \\ H/\mu \\ M/(\psi L) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \eta \\ \epsilon \\ \zeta \end{Bmatrix} = V_c \begin{Bmatrix} v \\ \mu u \\ \psi B \theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ove V_c è il carico limite verticale, $\mu = H_0/V_c$ e $\psi = M_0/LV_c$ sono parametri costitutivi adimensionali mentre v , u e θ sono rispettivamente lo spostamento verticale, lo spostamento orizzontale e la rotazione del centro della platea (G) (Fig.1).

La relazione incrementale:

$$d\mathbf{Q} = \underline{\underline{C}} d\mathbf{q}, \quad (3)$$

ove $\underline{\underline{C}}$ rappresenta la matrice di cedevolezza del sistema, è ottenuta imponendo:

(i) l'additività degli incrementi di spostamento generalizzati:

$$d\mathbf{q} = d\mathbf{q}^{el} + d\mathbf{q}^{pl}, \quad (4)$$

(ii) una matrice di cedevolezza elastica non diagonale:

$$\underline{\underline{\mathbf{C}^{el}}} = \begin{bmatrix} k_\xi & 0 & 0 \\ 0 & k_h & k_{hm} \\ 0 & k_{mh} & k_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(iii) una superficie di rottura (F) coincidente con il dominio di interazione definito in Corigliano et al., 2024a:

$$F(\mathbf{Q}) = \left(\frac{\xi}{A} + 1\right)(\xi - 1) + (h + m)^2 = 0 \quad (6)$$

(iv) una superficie di plasticità (f):

$$f(\mathbf{Q}, \rho_c) = \left(\frac{\xi}{A} + 1\right)(\xi - \rho_c) + \frac{1}{\beta}(h + m)^2 = 0 \quad (7)$$

ove $A = V_T/V_C$ con V_T capacità portante della fondazione soggetta a carico verticale verso l'alto, ρ_c e β variabili di incrudimento,

(v) due leggi di incrudimento tra loro accoppiate:

$$\frac{d\rho_c}{d\mathbf{q}} = \frac{(1 - \rho_c)^2}{(1 - \rho_{c0})^2} \frac{R_0}{V_c^2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1/\mu \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{d\beta}{d\mathbf{q}} = \frac{d\beta}{d\rho_c} \frac{d\rho_c}{d\mathbf{q}} = \frac{(1 - \beta_0)}{(1 - \rho_{c0})} \frac{d\rho_c}{d\mathbf{q}} \quad (9)$$

ove R_0 è un parametro costitutivo del modello, mentre ρ_{c0} e β_0 sono i valori iniziali delle variabili di incrudimento,

(vi) un potenziale plastico definito in analogia alla superficie di snervamento:

$$g(\mathbf{Q}, \rho_c) = \left(\frac{\xi}{A} + \rho_g\right)(\xi - \rho_g) + (h + m)^2 = 0. \quad (10)$$

Le espressioni utilizzate per F, f e g definiscono luoghi aperti, definiti nelle variabili di carico generalizzate e valide unicamente per percorsi di carico con h ed m concordi.

BIBLIOGRAFIA

- Nova, R., & Montrasio L. 1991. Settlements of shallow foundations on sand. *Géotechnique* 41, 2, 243–256.
- Mandolini, A., Russo, G., & Viggiani, C. 2005. Pile foundations: experimental investigations, analysis and design. In *Proceedings of the XVI International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2018. Norme tecniche per le costruzioni (NTC2018), *Decreto Ministeriale 17/01/2018*, 1–198.
- Sakellariadis, L. & I. Anastasopoulos, I. 2022. On the Mechanisms Governing the Response of Pile Groups Under Combined VHM Loading’, *Geotechnique*
- Gorini, D. N. & Callisto, L. 2023. A multiaxial inertial macroelement for deep foundations. *Computers and Geotechnics*, 155.
- Corigliano, M., Flessati, L., Bongio, P., D’Angelantonio, M., & di Prisco, C. G. 2023. Numerical push-over analysis of a bridge piled foundation: geotechnical and structural verification. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 57, 3–15.
- Iodice, C., Iovino, M., Di Laora, R., de Sanctis, L. & Mandolini, A. 2024. A strain-hardening macroelement model for pile groups under vertical-horizontal-moment loading. *Acta Geotechnica*.
- Corigliano, M., Flessati, L., Marveggio, P., Bongio, P., di Prisco, C.G. 2024a. Interaction domains for the seismic safety assessment of piled foundations accounting for piles-raft-soil coupling. *World Conference of Earthquake Engineering 2024*. Milano (IT).
- Corigliano, M., Zerbi, M., Flessati, di Prisco, C.G. 2024b. Un macroelemento per palificate poste su terreni puramente coesivi. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica (LARG2024)*. Gaeta (IT).
- Corigliano, M., Flessati, L., Marveggio, P., di Prisco, C.G. 2025. Interaction domains for large piled rafts under undrained conditions. *Under preparation*.

A RAPID METHOD FOR DISPLACEMENT EVALUATION OF PILED RAFT FOUNDATIONS IN COHESIVE SOILS

Keywords: piled raft foundations, macroelement, undrained response

Many sections of the Italian motorway network were constructed in the 1960s and 1970s, making it necessary to assess the structures of the main civil engineering works (viaducts, bridges) in accordance with the provisions of the most recent reference regulations, particularly in the seismic field. In standard design practice, methods for verifying pile foundations are used based on simplifying and generally conservative assumptions, which do not allow for the rational and complete exploitation of the real safety margins that the foundations themselves can provide. The use of nonlinear numerical analyses can overcome these limitations; however, the computational effort required is incompatible with the need to assess, within a reasonable timeframe, the large number of pile foundations of Italian viaducts currently in use.

A fast and reliable method for geotechnical verification (structural verification of piles and slabs is not considered in this paper) of pile foundation displacements has been developed, based on the definition of a generalized constitutive model. The developed model, based on macroelement theory, consists of a nonlinear constitutive relation that, by considering the interaction between the raft, piles, and soil, links the forces applied to the foundation with the induced displacements, considering the coupling between the load components themselves. The model was developed and calibrated using an extensive campaign of finite element numerical analyses conducted on piled foundations placed on cohesive soil layers and subjected to undrained conditions.

The developed method was then used for the safety verification of foundations characterized by piles whose length is approximately equal to the larger dimension of the slab, for viaducts built in the 1960s. The foundations were assumed to be subjected to a combined pseudo-static load to account for potential seismic forces.