



COMPORTAMENTO CICLICO DI FONDAZIONI SUPERFICIALI SU TERRENI SATURI: ANALISI E INTERPRETAZIONE ALLA SCALA MACRO

Giuseppe Lombardi
Sapienza Università di Roma
giuseppe.lombardi@uniroma1.it

Davide Noè Gorini
Sapienza Università di Roma
davideno.gorini@uniroma1.it

Luigi Callisto
Sapienza Università di Roma
luigi.callisto@uniroma1.it

Sommario

Il presente contributo descrive un macroelemento per fondazioni superficiali su terreni saturi sviluppato per simularne la risposta sotto azioni monotone e cicliche in condizioni drenate e non drenate. Il macroelemento rappresenta un'estensione dell'approccio TIM (Thermodynamic Inertial Macroelements) al caso di comportamento idro-meccanico accoppiato: il modello riproduce la risposta multi-assiale non-lineare del sistema terreno-fondazione portando in conto gli effetti derivanti dallo sviluppo di sovrappressioni interstiziali nel volume significativo di terreno al di sotto fondazione. A seguito di un breve richiamo della formulazione, viene illustrata una validazione del modello eseguita sulla base di analisi numeriche tridimensionali svolte in ambiente OpenSees.

1. Introduzione

Lo sviluppo di importanti sovrappressioni interstiziali indotte da un evento sismico rappresenta un rischio per strutture su fondazioni superficiali in terreni saturi. Sebbene sia stato studiato sia dal punto di vista sperimentale (Dashti et al., 2010) che numerico (Karamitros & Buckovalas, 2013), non sono tuttora disponibili metodi di progetto in grado portare in conto adeguatamente questo fenomeno nell'analisi delle opere. Infatti, valutazioni delle sovrappressioni interstiziali nelle condizioni di campo libero conducono a una risposta anche molto distante da quella effettiva (Rollins & Seed, 1990), mentre analisi numeriche dell'insieme terreno-fondazione-struttura nel dominio del tempo risultano eccessivamente onerose e dunque utilizzabili solo in casi particolari.

In letteratura vi è un'ampia evidenza di macroelementi per fondazioni superficiali per azioni monotone e cicliche (ad esempio, Cremer et al., 2002, Di Prisco et al., 2003; Chatzigogos et al., 2011), tuttavia concepiti esclusivamente per esibire una risposta drenata o non drenata in termini di tensioni totali. Il macroelemento sviluppato nel presente lavoro riproduce invece il comportamento del sistema terreno-fondazione per azioni monotone e cicliche portando in conto esplicitamente le diverse condizioni di drenaggio, come illustrato nelle prosieguo.

2. Caso di studio

Come elemento di confronto, è stato sviluppato in OpenSees (McKenna et al., 2010) il modello numerico tridimensionale di Figura 1, in cui una fondazione superficiale a base quadrata poggia su un deposito di terreno a grana grossa caratterizzato da un incremento monotono della velocità delle onde di taglio V_s con la profondità. Tra la fondazione e il terreno è interposto un sottile strato di materiale granulare con resistenza ridotta per simulare la presenza di un'interfaccia attrittiva. La quota piezometrica coincide con il piano campagna. Inoltre, in virtù della simmetria delle condizioni di carico analizzate, è stato considerato solo metà modello, per ridurre i tempi d'analisi.

La discretizzazione del dominio di terreno è stata generata attraverso un codice scritto in Matlab (MathWorks, 2023), impiegando elementi finiti a 8 nodi SSPbrickUP (McGann et al., 2015), caratterizzati da un singolo punto di integrazione e sviluppati secondo una formulazione mista spostamenti-pressioni (Biot, 1962; Zienkiewicz & Shiomi, 1984). La legge costitutiva adottata per descrivere il comportamento meccanico del terreno è costituita da un legame elasto-plastico con incrudimento cinematico, denominato PDMY (Yang et al., 2002). L'elemento di fondazione è stato invece suddiviso in elementi strutturali a 4 nodi, chiamati ShellMITC4 (Dvorkin & Bathe, 1984), a comportamento visco-elastico lineare.

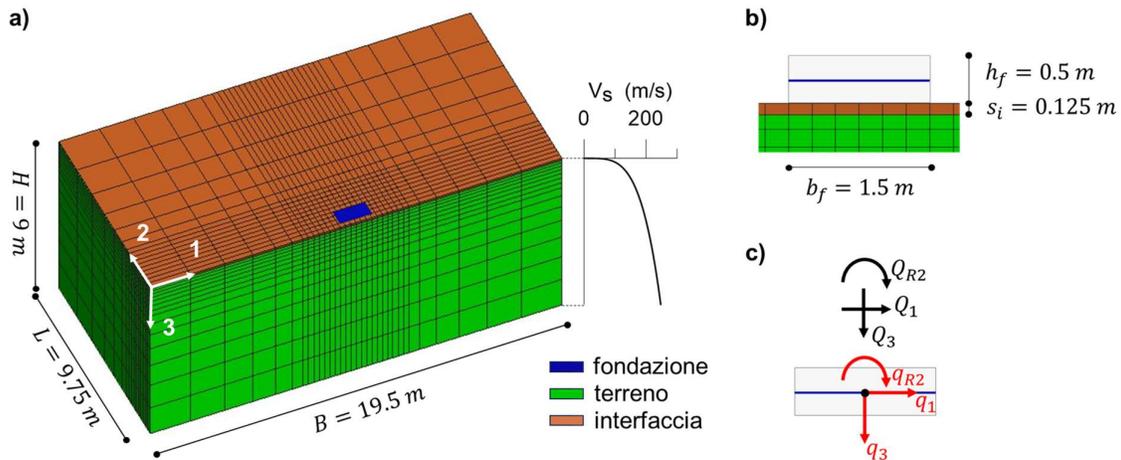


Figura 1: a) e b) modello numerico del caso di riferimento, c) componenti di carico e corrispondenti spostamenti in relazione alla fondazione presi in esame nelle analisi

3. Formulazione del macroelemento

Il macroelemento, denominato TIM-UP, consiste in un legame costitutivo incrementale tra i carichi generalizzati scambiati tra la struttura in elevazione e la fondazione, \mathbf{Q} , e i corrispondenti spostamenti e rotazioni, \mathbf{q} (Figura 1c). Il legame è descritto incrementalmente da un tensore del secondo ordine \mathbb{H} , che costituisce la matrice di rigidità elasto-plastica tangente, tale che $\dot{\mathbf{Q}} = \mathbb{H}\dot{\mathbf{q}}$. La risposta incrementale è derivata secondo l'approccio formale della classe di macroelementi termodinamici noti come TIM (Gorini et al. 2023, Gorini and Callisto 2023, Gorini 2024). Pertanto, la risposta del TIM-UP è sviluppata nell'ambito della plasticità multi-superficie con incrudimento cinematico secondo una formulazione termodinamica completamente definita da due potenziali, le funzioni energia libera e dissipazione. Nel TIM-UP, i potenziali dei TIM sono generalizzati mediante delle variabili interne aggiuntive, per portare in conto l'evoluzione delle condizioni di drenaggio nel terreno di fondazione e la degradazione ciclica della risposta alla scala macroscopica.

La risposta non drenata consta di due diversi contributi:

- il primo, denominato "disaccoppiato", o U0, considera soltanto l'effetto macroscopico delle

variazioni di pressione interstiziale legate, alla scala meso, alla variazione della tensione totale media;

- il secondo, denominato “accoppiato”, o UC, porta in conto alla scala macroscopica gli effetti di degradazione ciclica derivanti, alla scala meso, dall’accoppiamento deviatorico-volumetrico.

Nel presente lavoro, si fa riferimento solo agli effetti derivanti dal contributo disaccoppiato U0.

Per il caso di studio in Figura 1, il vettore dei carichi è così definito $\mathbf{Q} = \{Q_1, Q_3, Q_{R2}\}$, in cui Q_1 e Q_3 sono rispettivamente il carico orizzontale e verticale (quest’ultimo positivo se rivolto verso il basso) mentre Q_{R2} è la coppia nel piano di applicazione di Q_1 , e $\mathbf{q} = \{q_1, q_3, q_{R2}\}$ contiene le componenti di spostamento coniugate. Per omogeneità dimensionale, la coppia e la rotazione sono stati normalizzati rispetto la base della fondazione b_f : $Q_{r2} = Q_{R2}/b_f$ e $q_{r2} = q_{R2}b_f$.

4. Calibrazione

L’identificazione del TIM-UP richiede la definizione di due ingredienti principali, ossia un dominio ultimo, luogo dei carichi di collasso, e la rigidezza iniziale.

La superficie ultima, $y^{(N)} = 0$, è stata ottenuta attraverso l’utilizzo dell’analisi limite in simulazioni agli elementi finiti utilizzando il codice OPTUM G3 (OptumCE, 2021). In questo modo sono state ottenute diverse combinazioni delle componenti di \mathbf{Q} corrispondenti al collasso della fondazione in condizioni drenate (indicate con l’apice D). I risultati sono stati interpolati attraverso la seguente equazione, che descrive la superficie di un iper-uovo (Gorini e Callisto 2023, Gorini 2024):

$$y^{(N)} = \left(\frac{Q_1^2}{a_1^{(N,D)^2}} + \frac{Q_{r2}^2}{a_{r2}^{(N,D)^2}} \right) \left(\frac{(r^{(N,D)} - 1)Q_3^{(+,D)} - 2Q_3}{Q_3^{(+,D)}} \right)^2 + \left(\frac{2Q_3 - Q_3^{(+,D)}}{Q_3^{(+,D)}} \right)^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

dove $Q_3^{(+,D)}$ è il carico limite verticale a compressione in condizioni drenate, $a_1^{(N,D)}$, $a_{r2}^{(N,D)}$ sono parametri di calibrazione che determinano la semi ampiezza della superficie nel piano Q_1 - Q_{r2} per un dato Q_3 ed $r^{(N,D)}$ è un coefficiente che descrive la forma della superficie.

Per le condizioni non drenate (apice U0), il dominio ultimo è stato ottenuto in via approssimata, valutando la resistenza non drenata equivalente S_u di un elemento di terreno posto al di sotto della fondazione ad una profondità pari a $b_f/2$, sotto i carichi di esercizio applicati alla fondazione, e determinando il carico limite verticale esprimendo la resistenza in tensioni totali. I rimanenti parametri della superficie sono stati ricavati in via iterativa, mantenendo costante il rapporto di forma della superficie ($r^{(N,D)} = r^{(N,U0)}$), in modo da ottenere il luogo ultimo non drenato come una contrazione omotetica di quello drenato. Un confronto tra le due superfici per il caso in esame è riportato in Figura 2a.

La risposta incrudente del TIM-UP è controllata da n di superfici di plasticizzazione e si sviluppa a partire dal raggiungimento della superficie di prima plasticizzazione ($n = 1$), che racchiude il nucleo elastico, fino alle condizioni ultime ($n = N$). Assunta un’estensione del dominio elastico lungo l’asse Q_3 pari al 10% del dominio ultimo per entrambe le condizioni di drenaggio, e mantenendo la condizione di omotetia e lo stesso rapporto di forma, le rimanenti superfici sono determinate attraverso una legge di variazione lineare dei rimanenti parametri dell’Equazione (1). Una rappresentazione delle superfici nel piano $Q_{r2} = 0$ è mostrata in Figura 2b per $N = 5$.

Quando il vettore \mathbf{Q} raggiunge l’ennesima superficie si attiva l’ennesimo flusso plastico e la matrice di rigidezza elasto-plastica tangente del sistema III viene aggiornata. Dalle analisi numeriche svolte OpenSees si è osservato che le relazioni fra le diverse componenti delle azioni e i corrispondenti spostamenti sono ben approssimate da una relazione iperbolica del tipo:

$$Q_i = \frac{q_i}{a + \frac{q_i}{b}} \quad \text{con } i = 1, r2, 3 \quad (2)$$

in cui $a = 1/H_{ii}^{(0)}$ è l’inverso della rigidezza a piccole deformazioni per il grado di libertà considerato,

anch'essa ottenuta a partire dalle analisi numeriche, mentre b è un coefficiente di calibrazione.

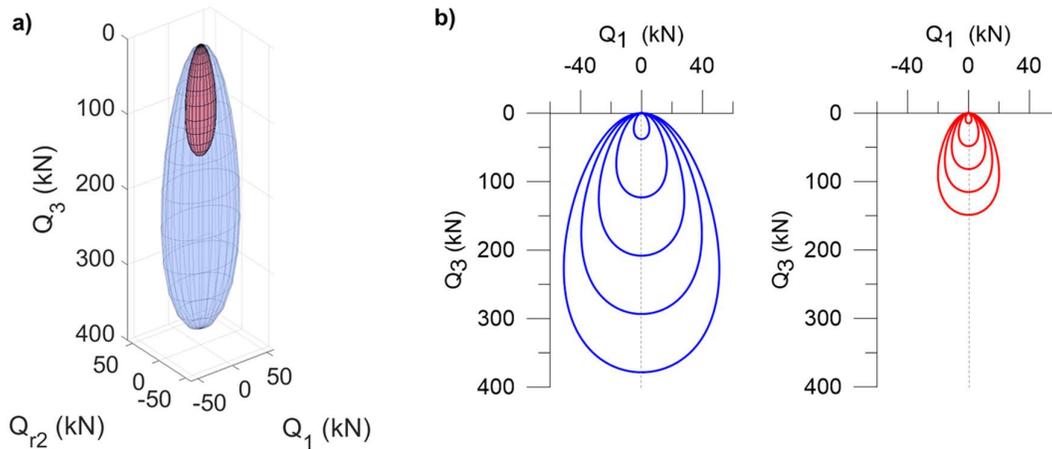


Figura 2: a) dominio ultimo e b) distribuzione delle superfici di plasticizzazione nel piano $Q_{r2} = 0$ per $N = 5$ a confronto per il caso drenato (in blu) e il caso non drenato disaccoppiato (in rosso).

Sulla base di tale relazione sono state ricavate le matrici di rigidezza $\mathbb{H}^{(n)}$ corrispondenti a ciascuna delle n superfici. La matrice di rigidezza associata al nucleo elastico (\mathbf{Q} interno alla superficie di prima plasticizzazione) è pertanto il secondo ingrediente costitutivo, che può essere alternativamente ricavato mediante le numerose soluzioni elastiche di letteratura per le fondazioni superficiali.

5. Comportamento ciclico

Il TIM-UP è stato implementato in Matlab. Nel seguito si propone un confronto tra le previsioni del macroelemento e i risultati ottenuti con il modello completo di Fig. 1 in corrispondenza di sollecitazioni cicliche incrementali in direzione 1 (orizzontale), limitatamente alle condizioni drenate (D) e non drenate con disaccoppiamento del comportamento deviatorico-volumetrico del PDMY (U0). Per entrambi i casi viene simulata una prima fase che intende riprodurre le azioni statiche, nella quale si applicata in condizioni drenate una forza verticale Q_3 corrispondente a $0.3Q_3^{(+,D)}$. Successivamente si introduce una forzante armonica in direzione orizzontale. Poiché la procedura è utilizzata per la valutazione del legame costitutivo, nel modello numerico la velocità di applicazione del carico ciclico è stata scelta, in relazione al coefficiente di permeabilità, in modo da non indurre effetti inerziali, conservando tuttavia la possibilità di variare le condizioni di drenaggio.

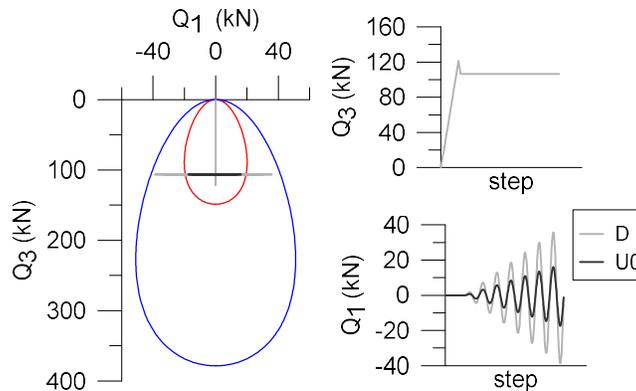


Figura 3: percorsi di carico ciclico esaminati in OpenSees per le condizioni drenate (D) e non drenate disaccoppiate (U0) rappresentati a confronto con i corrispondenti domini ultimi

La simulazione sul modello completo è stata eseguita a controllo di forze, ottenendo storie temporali di

spostamento; queste sono poi state inserite nel *driver* costitutivo del TIM-UP per ottenere le corrispondenti storie delle forze previste dal macroelemento stesso. In Figura 3 è mostrata una rappresentazione delle storie temporali di carico applicate al modello numerico, insieme ai domini ultimi utilizzati per le due diverse condizioni di drenaggio.

La Figura 4 mostra il confronto fra i legami forza-spostamento ottenuti con il modello completo e con il TIM-UP, per le condizioni drenate. Al netto di lievi scostamenti, il macroelemento riproduce bene la risposta ciclica in direzione 1 anche con un basso numero di superfici di plasticizzazione ($N = 5$). Tuttavia, la legge di flusso associata utilizzata nel TIM-UP comporta apprezzabili effetti di accoppiamento tra i diversi gradi di libertà, che si manifestano come incrementi della forza verticale Q_3 durante la fase ciclica e variazioni cicliche contenute della coppia Q_{R2} .

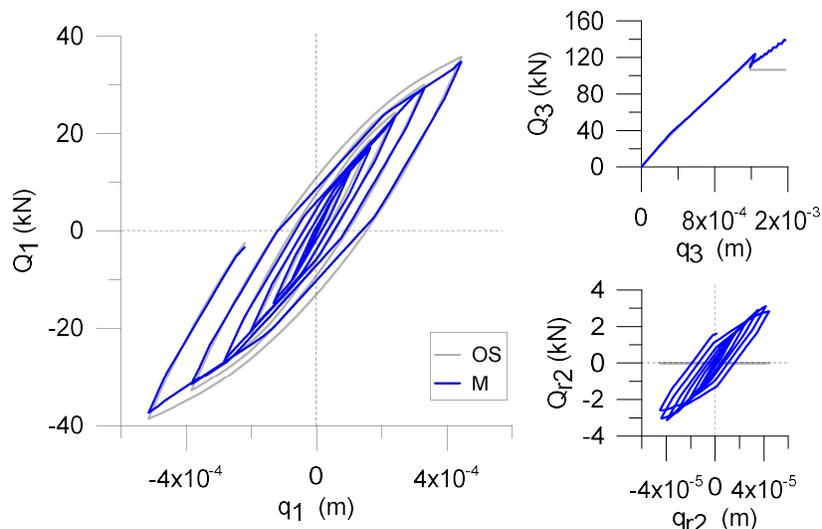


Figura 4: confronto tra OpenSees (OS) e macroelemento (M) per l'analisi ciclica drenata

Il confronto in condizioni di drenaggio impedito è mostrato in Figura 5. Anche in questo caso l'accordo appare molto buono, mentre le discrepanze tra le due tecniche di modellazione derivanti dall'accoppiamento fra i diversi gradi di libertà risultano simili alle condizioni drenate per la variazione ciclica di Q_{R2} e molto meno pronunciate riguardo l'incremento di Q_3 .

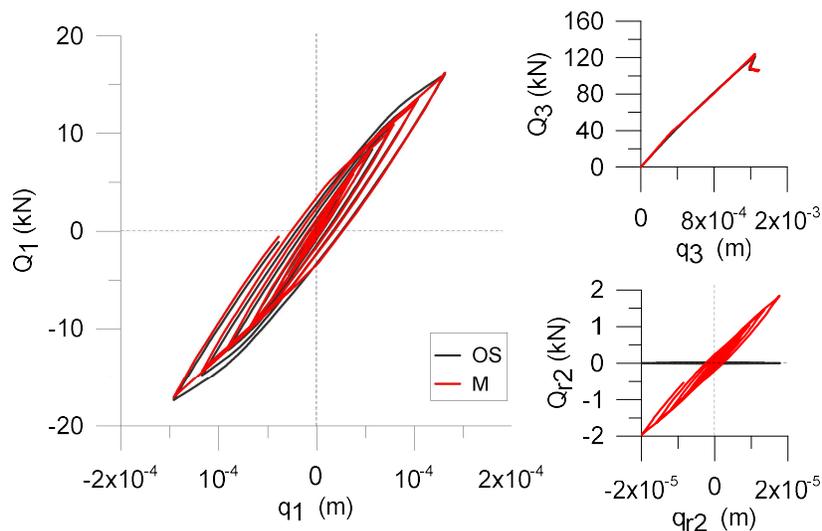


Figura 5: confronto tra OpenSees (OS) e macroelemento (M) per l'analisi ciclica non drenata

Bibliografia

- Biot, M. A. (1962). Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of applied physics*, 33(4), 1482-1498.
- Chatzigogos, C. T., Figini, R., Pecker, A., & Salençon, J. (2011). A macroelement formulation for shallow foundations on cohesive and frictional soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(8), 902-931.
- Cremer, C., Pecker, A., & Davenne, L. (2002). Modelling of nonlinear dynamic behaviour of a shallow strip foundation with macro-element. *Journal of Earthquake Engineering*, 6(02), 175-211.
- Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., & Wilson, D. (2010). Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(1), 151-164.
- DI PRISCO, C. G., Nova, R., & Sibilìa, A. (2003). Shallow footings under cyclic loading: experimental behaviour and constitutive modelling. In *Geotechnical analysis of seismic*
- Dvorkin, E. N., & Bathe, K. J. (1984). A continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis. *Engineering computations*, 1(1), 77-88.
- Gorini, D. N., Callisto, L., Whittle, A. J., & Sessa, S. (2023). A multiaxial inertial macroelement for bridge abutments. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 47(5), 793-816.
- Gorini D. N.. A unified thermodynamic-based macroelement approach. Submitted to *Acta Geotechnica*, 2024.
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D., & Chaloulos, Y. K. (2013). Insight into the seismic liquefaction performance of shallow foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4), 599-607.
- Gorini, D. N., & Callisto, L. (2023). A multiaxial inertial macroelement for deep foundations. *Computers and Geotechnics*, 155, 105222.
- MATLAB. Version R2023a. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2023. URL <https://www.mathworks.com>.
- McGann, C. R., Arduino, P., & Mackenzie-Helnwein, P. (2015). A stabilized single-point finite element formulation for three-dimensional dynamic analysis of saturated soils. *Computers and Geotechnics*, 66, 126-141.
- McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010). Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), 95-107.
- Nova, R., & Montrasio, L. (1991). Settlements of shallow foundations on sand. *Géotechnique*, 41(2), 243-256.
- OptumCE 2021. "OptumG3v.2021." <https://optumce.com/products/brochure-and-datasheet/>.
- Rollins, K. M., & Seed, H. B. (1990). Influence of buildings on potential liquefaction damage. *Journal of geotechnical engineering*, 116(2), 165-185.
- Roscoe, K. H. (1956). ROSCOE AND SCHOFIELD: STABILITY OF SHORT PIER FOUNDATIONS IN SAND 343. *British Welding Journal*, 3, 343.
- Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119-1127.
- Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T. (1984). "Dynamic behavior of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution." *International Journal for Numerical Methods in Geomechanics*, 8, 71-96.