

Un contributo alla ricerca del carico limite delle fondazioni in terreni disomogenei.

MURFF J. D., MILLER T. W. (1977) - *Foundation Stability on Nonhomogeneous Clays*. Proc. ASCE, J. of the Geotechnical Engineering Div., GT 10.

Il problema della messa a punto di un criterio di valutazione del carico limite delle fondazioni, che alla correttezza unisca la semplicità d'uso, non è certamente nuovo; non si può dire, tuttavia, che a tutt'oggi la questione sia stata risolta in maniera soddisfacente. È appena il caso di ricordare che le difficoltà risiedono, principalmente, nell'impossibilità di integrare in forma chiusa il sistema di equazioni differenziali non lineari, alle derivate parziali, che reggono l'equilibrio limite del terreno.

L'ostacolo, come è noto, fu aggirato da Terzaghi, che, proponendo il criterio di sovrapposizione degli stati tensionali in regime plastico, ottenne la ben nota equazione del carico limite, la cui fortuna presso i tecnici è dovuta ad un certo accordo con i risultati sperimentali e alla diffusa convinzione che essa fornisca valori del carico limite abbastanza cautelativi.

Non è certo questa la sede adatta per affrontare una discussione approfondita dell'importante argomento e una disamina, che non potrebbe essere che superficiale, dei numerosi e vari contributi pubblicati sulla questione; si ricorda, tuttavia, che l'opinione più accreditata è che, in effetti, il criterio di sovrapposizione condurrebbe a valutazioni errate per eccesso del carico limite delle fondazioni allungate se l'angolo di attrito del terreno venisse misurato, più correttamente, con apparecchi che riproducono lo stato piano di deformazione. Sono note, inoltre, le perplessità che vari Autori nutrono nei confronti dell'attendibilità dei coefficienti di forma, ai quali si fa ricorso per estendere la formula del carico limite delle fondazioni allungate alle fondazioni di forma circolare o quadrata.

La memoria che si recensisce si inquadra in un filone di ricerca sostanzialmente diverso da quello precedentemente menzionato. Gli AA., infatti, pur limitando la loro indagine a terreni con angolo di attrito nullo e privi di

peso al di sotto del piano di posa delle fondazioni, ripropongono un metodo d'analisi che sembra abbastanza convincente per affrontare il problema senza molte restrizioni nei riguardi della geometria della fondazione e della distribuzione dei carichi esterni.

Tale metodo, che consiste in una applicazione dell'« upper bound theorem » dell'analisi limite, non è nuovo, ma merita di essere segnalato, in quanto fornisce qualche chiarimento sui meccanismi di collasso delle fondazioni superficiali. Nella sostanza, inoltre, è concettualmente più semplice e fisicamente più rappresentativo dei metodi così detti « esatti ».

Alla soluzione si perviene scegliendo un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile ed eguagliando l'energia dissipata al lavoro prodotto dalle forze esterne — note e incognite — durante uno spostamento virtuale del sistema.

Il carico di collasso determinato in questa maniera, come stabilisce il teorema precedentemente citato, è maggiore o uguale al carico limite reale. Il calcolo dell'energia dissipata viene effettuato con una tecnica semplice, che ha i suoi fondamenti nella Teoria della Plasticità dei materiali dotati di legge di flusso associata, e, per brevità, non sarà qui richiamato.

Benché in generale il carico di collasso dipenda dal meccanismo scelto, è bene ricordare che è possibile trovare meccanismi di collasso diversi, ai quali è associato il medesimo carico. Il carico limite è, per definizione, il minimo carico scelto nella classe dei valori corrispondenti ai meccanismi cinematicamente ammissibili. Ne segue che il cinematismo, al quale è associato il minimo carico di collasso, non è, necessariamente, il meccanismo di rottura; il teorema « superiore » assicura, però, che, con questo procedimento, si è determinato almeno un limite superiore ai valori del carico limite.

I meccanismi di collasso ai quali gli AA. fanno riferimento sono rappresentati nella figura 1. Si può osservare che la differenza principale fra i due modi (a) e (b), in cui gli AA. immaginano possa avvenire la rottura, risiede nella possibilità, lasciata al primo, che si manifesti il distacco, almeno limitatamente al tratto MT (fig. 1a), fra il terreno e la fondazione.

Per ciascun modo, inoltre, sono previsti due meccanismi, rispettivamente, UBM1 e UBM2.

Con riferimento alla figura 1a, questi meccanismi possono così brevemente illustrarsi.

Lungo la linea di contatto MT, gli spostamenti della struttura hanno componenti sia tangenziali che normali alla linea MT stessa, che è una linea di discontinuità delle velocità.

La fondazione e il blocco di terreno TNQ ruotano rigidamente attorno al punto O; il cuneo di materiale NPO, supposto deformabile, scivola lungo NP.

Nel meccanismo UBM1, il cuneo deformabile PSQ è semplicemente l'estensione di NPO; esso scivola lungo PS e il blocco di terreno SUWQ scivola lungo SU deformandosi.

Nel meccanismo UBM2, il blocco QPS' scivola rigidamente lungo PS' e il blocco S'U'WQ scivola, pur esso rigidamente, lungo S'U'.

Queste condizioni richiedono, fanno notare gli AA., che fra i blocchi QNP e QPS' esista una componente di velocità di separazione oltre che di scorrimento. Si osservi, infatti, che i punti del segmento QP, pensati appartenenti

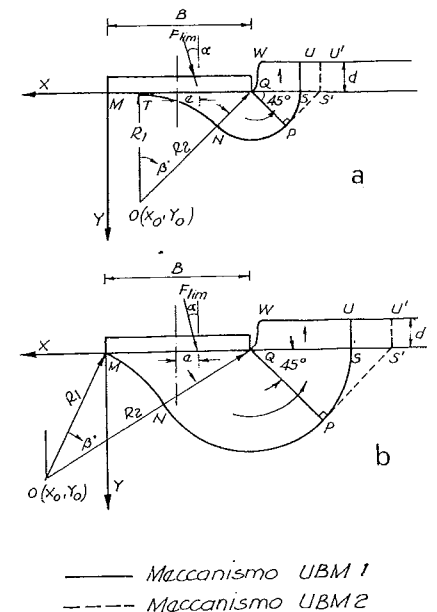


Fig. 1. - Meccanismi di collasso: a) con distacco fra terreno e fondazione; b) senza distacco.

al cuneo QNP, possiedono velocità variabili in funzione della distanza dal centro istantaneo di rotazione; mentre, pensati appartenenti al cuneo rigido QPS', avrebbero velocità costanti. Il meccanismo UBM2, di conseguenza, non è, in generale, cinematicamente ammissibile se il terreno può sopportare, senza rompersi, degli sforzi di trazione.

Un altro aspetto, sul quale si intende richiamare l'attenzione del lettore e su cui per altro gli AA. non si soffermano, riguarda la possibilità che offre il meccanismo UBM1 di tener conto della resistenza del materiale posto al di sopra del piano di posa della fondazione; caratteristica, questa, che oltre a consentire una valutazione più accurata del carico limite, è, in certo qual modo, automatica e indipendente dalla scelta dell'operatore.

Gli AA. estendono successivamente l'uso di tali meccanismi anche al calcolo delle fondazioni rettangolari, semplicemente introducendo delle componenti di discontinuità nelle velocità lungo i piani verticali passanti per i lati corti della fondazione.

Si osservi che la complicazione dei calcoli, conseguente a tale modifica, è limitata, in quanto lo stato di deformazione rimane piano.

Gli AA. effettuano, innanzitutto, una verifica del modello di calcolo, prendendo in esame il problema della fondazione nastriforme su terreno omogeneo caricata da una forza eccentrica o inclinata; successivamente, estendono i risultati al caso della fondazione rettangolare.

Mancando nella letteratura le soluzioni rigorose di tali problemi, viene, quindi, effettuato un confronto con i risultati ottenuti con ben note formule semi-empiriche.

È certamente da considerare con scetticismo il procedimento, seguito dagli AA., di provare l'attendibilità dei propri risultati confrontandoli con formule semi-empiriche; non è privo di interesse, però, notare come il modello di calcolo possieda una sua flessibilità che gli permette di adattarsi alle varie condizioni al contorno, fornendo risultati di un certo significato fisico.

Il lettore può apprezzare questa capacità del modello matematico, osservando la figura 2; si noti come il meccanismo di rottura si modifichi automaticamente in relazione al valore dell'eccentricità del carico.

Il contributo degli AA. al calcolo del carico limite delle fondazioni in terreni non omogenei è più limitato di quanto non possa sembrare dal titolo del lavoro. Vengono presi in esame due casi di disomogeneità abbastanza tipici in terreni coesivi teneri: il caso in cui la coesione non drenata aumenti linearmente con la profondità, e quello in cui uno strato coesivo meno resistente

è presente, ad una certa profondità, nel terreno di fondazione.

L'esame dei risultati del primo caso, per il quale è disponibile una soluzione teorica « esatta » permetterà di chiarire meglio il significato del contributo degli AA.

Si ricorda che DAVIS e BOOKER [1973], effettuando un'analisi rigorosa del problema mediante integrazione numerica delle equazioni risolutive, hanno mostrato come le soluzioni approssimate, ottenute per esempio con il metodo dei cerchi di scivolamento, possano portare a errori notevoli in eccesso, specialmente per alti valori del gradiente della coesione e per modesti valori iniziali di c_u .

I risultati degli AA., rappresentati nella figura 3, appaiono in buon accordo con quelli di Davis e Booker. La semplicità d'uso e la non eccessiva concettosità del metodo fanno sperare, inoltre, che esso possa essere impiegato con successo in quei problemi, per i quali la letteratura non è di molto conforto.

In definitiva, il metodo presentato dagli AA. appare sufficientemente accurato per quei problemi nei quali si è in presenza di terreni con notevoli disomogeneità.

In tali problemi, infatti, i metodi approssimati danno risultati troppo ottimistici, che è bene guardare con sospetto, mentre i metodi più sofisticati di integrazione numerica non sono sempre facilmente perseguibili.

È bene ricordare, tuttavia, che il valore del carico, F_{lim} , che il metodo fornisce, è solo un estremo superiore del

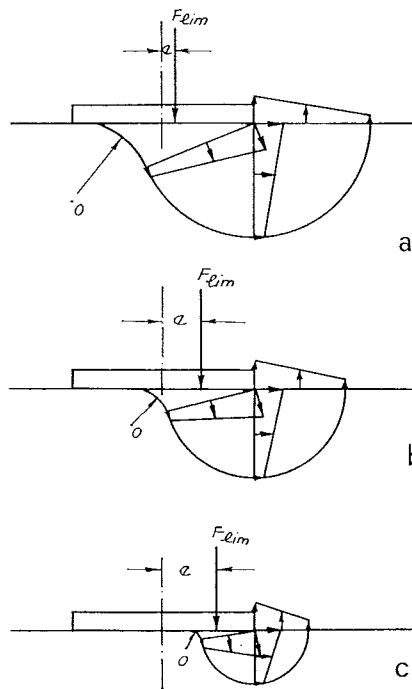


Fig. 2. - Meccanismi di collasso corrispondenti a carichi con diverse eccentricità.

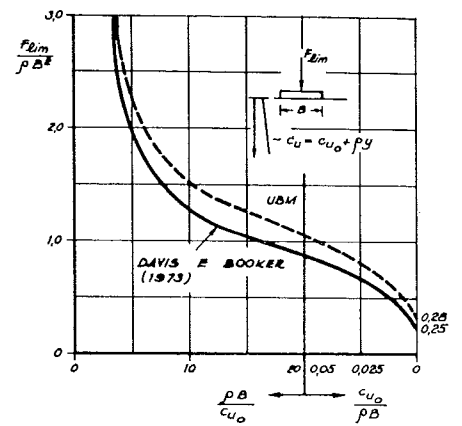


Fig. 3. - Confronto fra la soluzione approssimata UBM e quella rigorosa per terreni con coesione linearmente crescente con la profondità.

carico limite e, pertanto, non cautelativo.

Inoltre, l'ordine di grandezza dello scarto dal valore esatto non è noto e potrebbe valutarsi, in una certa misura, solo se, oltre al teorema superiore, si applicasse al problema il teorema inferiore dell'analisi limite.

(Antonino Musso)

BIBLIOGRAFIA

DAVIS E. H., BOOKER J. R. (1973) - *The Effect of Increasing Strength with Depth on the Bearing Capacity of Clays*. Geotechnique, 23, 4.

Sulla preparazione dei provini per indagini di laboratorio.

Proceed. of Symposium on « Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing », ASTM, Montreal, 1976.

Nonostante un certo ritardo, sembra utile far cenno a questa ultima pubblicazione dell'ASTM. Essa contiene gli Atti del Simposio sulla preparazione dei provini per indagini di laboratorio, tenutosi a Montreal nel giugno 1975.

Questa non è certo la sede per discutere sul ruolo della sperimentazione di laboratorio nell'indagine Geotecnica, sia finalizzata alla ricerca (acquisizione di elementi di base nello studio del comportamento dei terreni e delle rocce), che alla progettazione (acquisizione di parametri da introdurre nella modellazione del problema reale). Non si può però non osservare che oggi, per lo meno nel nostro paese ed in particolare nel campo della ricerca, essa subisce un certo rallentamento rispetto ad altri campi d'indagine (calcolo nu-