

Stabilità di paratie in falda in presenza di dreni tubolari

C. DI MAIO* - E. EVANGELISTA**

SOMMARIO: Nel presente lavoro vengono esposti i risultati di una ricerca teorica volta a determinare l'influenza del drenaggio sulla stabilità di paratie in falda.

Si fa l'ipotesi che il terreno sia saturo fino a piano campagna e che su quest'ultimo sia presente una lama d'acqua, in modo tale che si abbia apporto idraulico dalla superficie. Il terreno sede del moto di filtrazione è stato considerato incoerente, omogeneo ed isotropo; in alcuni casi è stata valutata anche l'influenza dell'anisotropia per quanto attiene alla sola permeabilità. Il regime delle pressioni interstiziali è stato determinato integrando l'equazione del moto con il metodo delle differenze finite; le spinte del terreno sono state calcolate ricorrendo a semplici metodi di equilibrio limite globale. La paratia è stata considerata impermeabile, rigida, libera o vincolata in testa con un vincolo rigido.

È stato dapprima condotto lo studio dell'opera in assenza di dreni, successivamente è stato preso in esame l'effetto di una fila di dreni tubolari, facendone variare lunghezza inclinazione ed interasse.

I risultati, relativi ad un elevato numero di casi, sono stati riportati sotto forma di diagrammi parametrici delle spinte, dei centri di spinta, dei coefficienti di sicurezza dell'opera e infine, anche dei gradienti idraulici a valle della paratia.

1. Introduzione

Come è noto la presenza di pressioni interstiziali positive nell'intorno di un'opera di sostegno aggrava le condizioni di spinta e ne riduce la stabilità.

Per i muri di sostegno, per i quali il terrapieno è costituito da materiale di riempimento, risulta facile controllare le condizioni idrauliche realizzando opportuni drenaggi. In letteratura esistono indicazioni per la progettazione di efficaci sistemi drenanti [TERZAGHI, 1936, 1953].

Per le paratie invece, il materiale nell'intorno dell'opera è quello in sito, non controllato, inoltre la stabilità dell'opera è influenzata dal regime di pressioni interstiziali sia di monte che di valle, pertanto i drenaggi, per essere efficaci, devono far risentire la loro influenza in tutto l'intorno dell'opera.

In letteratura non esistono indicazioni per la progettazione del sistema drenante più opportuno. In generale si dispone delle soluzioni del moto di filtrazione intorno a scavi in falda, ma i risultati sono espressi in termini di portate e gradienti idraulici allo sbocco, di quote piezometriche significative per le verifiche idrauliche e non di stabilità dell'opera.

L'importanza di regolare il regime delle pressioni interstiziali del volume di terreno che influenza la stabilità delle paratie viene messa in evidenza dall'analisi del semplice schema riportato in fig. 1. Si ipotizza che la paratia sia rigida, liscia, vincolata in testa e che si attesti su una formazione impermeabile, di pari resistenza e deformabilità rispetto al terreno sovrastante, che impedisca il moto dell'acqua.

* Dott. Ing. Caterina DI MAIO, Ricercatrice, Istituto di Geologia e Geotecnica, Facoltà di Ingegneria, Università della Basilicata.

** Prof. Ing. Aldo EVANGELISTA, Ordinario di «Opere di sostegno e costruzioni in terra», Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli.

Gli Autori hanno in egual misura contribuito allo svolgimento del presente studio.

In questo caso le pressioni interstiziali sono note e coincidenti con quelle idrostatiche; il calcolo delle spinte è immediato se si fa riferimento a metodi semplici come quello dell'equilibrio limite globale. Nel caso esaminato, il coefficiente di sicurezza nei riguardi della stabilità, definito in figura, assume un valore pari a circa 1/3 di quello che si ricava in assenza di falda. Tale diminuzione è determinata dall'aumento della spinta squilibrata ($U_a - U_b$) e dalla diminuzione della resistenza a valle S'_p .

Appare quindi evidente l'opportunità di prevedere la realizzazione di sistemi drenanti che, riducendo le pressioni interstiziali, consentano di aumentare la stabilità dell'opera.

A livello progettuale si pone il problema di ottenere il massimo incremento di stabilità minimizzando i costi. Se si fa riferimento, come nel presente studio, a sistemi drenanti costituiti da dreni tubolari, bisognerà valutare:

- in quale posizione i dreni esplicano la maggiore efficacia;
- quale lunghezza devono avere.

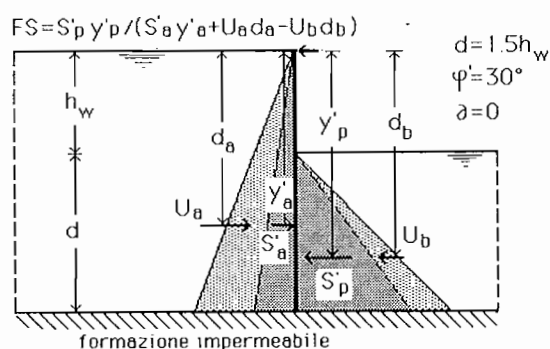


Fig. 1. - Esempio preso in esame per evidenziare l'influenza della falda sulla stabilità di una paratia vincolata in testa. La paratia è supposta rigida, liscia, impermeabile ed attestata su una formazione impermeabile.

Scopo del presente lavoro è quello di fornire indicazioni a riguardo sulla base dei risultati di uno studio teorico di tipo parametrico.

Il limite della loro applicabilità è evidentemente legato alla semplificazione della realtà operata dal modello di analisi. Per quanto attiene alla determinazione del regime di pressioni interstiziali, si è fatto riferimento al semplice caso di terreno omogeneo trascurando situazioni particolari connesse alla eterogeneità del terreno, discontinuità, stato di fratturazione ecc.

I risultati esposti nel presente studio sono inoltre condizionati dalle ipotesi adottate nel calcolo delle spinte.

2. Ipotesi e metodi di calcolo

È stato valutato il regime delle pressioni interstiziali dei differenti schemi idraulici rappresentati in fig. 2.

Il primo si riferisce al caso di assenza di drenaggio (schema a), gli altri a tre differenti sistemi di dreni tubolari: dreni disposti in orizzontale (schema b), dreni inclinati a 45° (schema c), dreni disposti a valle in verticale (schema d).

Vengono ipotizzate nulle le pressioni interstiziali lungo i dreni del solo schema b; negli altri casi, poiché si esclude l'aggottamento dell'acqua mediante pompe, le pressioni non risulteranno nulle, ma soltanto ridotte al valore idrostatico di valle.

Il moto di filtrazione è stato studiato nelle condizioni idrauliche più sfavorevoli, e cioè di terreno saturo fino al piano di campagna e di presenza di una lama d'acqua su quest'ultimo, formata a seguito di piogge intense e prolungate. Si tratta di una condizione molto gravosa che può verificarsi nei terreni a grana fina, in occasione di piogge di notevole intensità e durata, tanto più facilmente quanto più alto è il pelo libero della falda.

Lo studio è stato svolto nell'ipotesi che il regime di pressione interstiziali sia quello stazionario associato alle predette condizioni idrauliche.

È stata ipotizzata la presenza di una formazione impermeabile che delimita inferiormente il dominio di filtrazione a profondità variabile. La paratia è stata considerata impermeabile.

Il terreno è stato considerato omogeneo, isotropo oppure ad anisotropia assialsimmetrica, per quanto attiene alla sola permeabilità, con coefficienti di permeabilità $K_y \neq K_x = K_z$, dove le direzioni degli assi x , y e z coincidono con le direzioni principali di permeabilità; l'asse y è diretto secondo la verticale.

Nei terreni naturali generalmente la permeabilità orizzontale è maggiore di quella verticale, ma per la

presenza di fratture, può verificarsi anche il caso opposto, per cui sono stati considerati valori del rapporto K_x/K_y sia minori che maggiori dell'unità.

Il regime delle pressioni interstiziali è stato determinato integrando l'equazione differenziale del moto di filtrazione (1) con la tecnica numerica delle differenze finite.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Si è reso finito il dominio di filtrazione limitandolo lateralmente con i piani $x=0$ e $x=x_{max}$ (fig. 2) lungo i quali il flusso è assunto nullo; la posizione dei piani è stata determinata per tentativi.

Le grandezze geometriche sono tutte adimensionalizzate rispetto all'altezza h_w dello scavo, che rappresenta anche la differenza di quota piezometrica fra monte e valle. Le grandezze dimensionali vengono di seguito indicate con lettera minuscola, quelle adimensionali con lettera maiuscola; si ha quindi: $H_w = h_w/h_w = 1$, $D = d/h_w$, $L_d = l_d/h_w$, $I = i/h_w$, $H1 = h_1/h_w$ ecc. Le spinte sono state adimensionalizzate rispetto a $\gamma_w h_w^2$ ed in tal caso vengono indicate in grassetto. Il significato dei simboli è chiarito in fig. 3 dove, per semplicità, la paratia è stata considerata liscia e quindi sottoposta a spinte orizzontali.

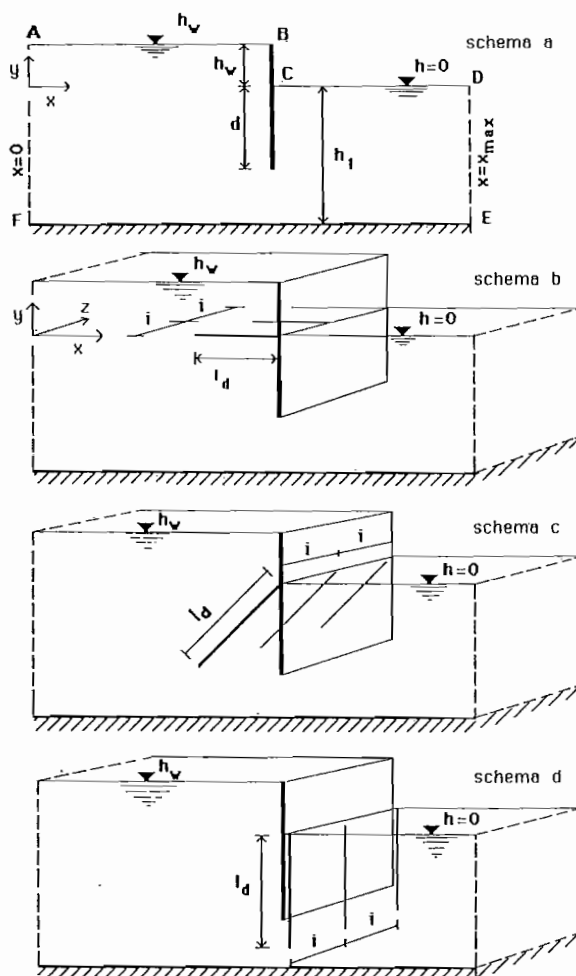


Fig. 2. - Schemi geometrici esaminati nel presente studio.

Si è inoltre assunto che il diametro dei dreni e lo spessore della paratia possano essere considerati trascurabili rispetto alla loro lunghezza.

Le condizioni di contorno vengono quindi così espresse (v. fig. 2):

- lungo i contorni AB e AF: $h = h_w$,
- « « « CD e DE: $h = 0$,
- « il contorno EF: $\partial h / \partial y = 0$,
- « la paratia: $\partial h / \partial x = 0$,
- « i dreni: $h = 0$.

Determinato il regime delle pressioni interstiziali, sono state calcolate le spinte idrauliche U_a a monte e U_b a valle della paratia.

Il calcolo delle spinte efficaci, una volta note le spinte idrauliche, è stato condotto con il metodo di equilibrio limite delle masse di terreno che insistono sull'opera, ipotizzando superfici di rottura piane (ipotesi di Coulomb).

La spinta di monte, attesa la limitata influenza dell'inclinazione δ , è stata valutata ipotizzandola nulla ($\partial = 0$), quella di valle è stata calcolata sia per $\partial = 0$ che per $\partial = /2$. In quest'ultimo caso si è ipotizzato un cinematismo positivo, per cui la spinta risulta inclinata come in fig. 4a.

La posizione dei centri di spinta è stata valutata adottando il metodo di calcolo illustrato in fig. 4b: la paratia è stata suddivisa in n tratti di altezza costante ΔY . Sono state calcolate le spinte agenti su gli n tratti di altezza crescente e pari a $(i-1) \cdot \Delta Y$ con $i = 2, \dots, n+1$, e a partire da queste, le spinte lungo i tratti di altezza ΔY . Nell'ambito di questi si è ipotizzata una distribuzione di tipo lineare.

Come già detto, i calcoli sono stati sviluppati sia per paratia libera che vincolata in testa; la rigidità è ritenuta elevata e tale da rendere, nell'ultimo caso, valide le ipotesi del « free earth support ».

Il coefficiente di sicurezza dell'opera è stato definito come l'inverso del grado di mobilitazione della spinta passiva efficace a valle della paratia (*):

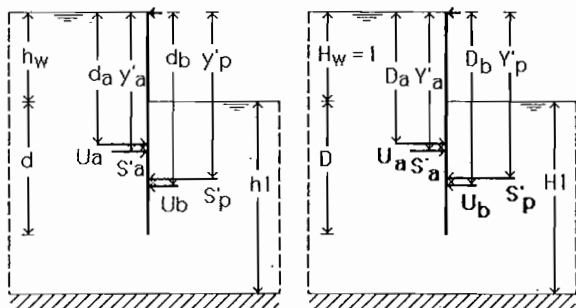


Fig. 3. - Grandezze dimensionali e adimensionali: le grandezze geometriche sono state adimensionalizzate rispetto a h_w e sono indicate con lettera maiuscola, le spinte sono state adimensionalizzate rispetto a $\gamma_w h_w^2$ e sono indicate in grassetto.

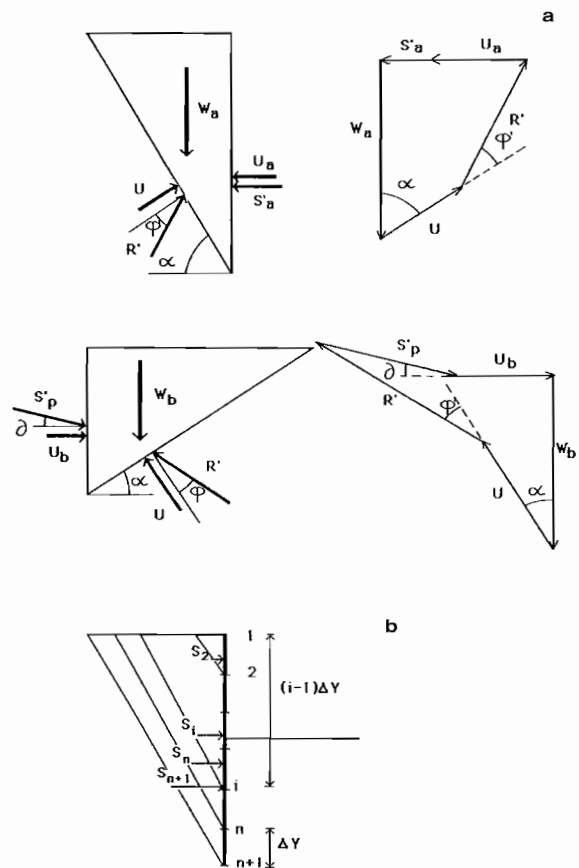


Fig. 4. - Calcolo delle spinte. In fig. 4a sono riportate le forze agenti sui cunei di spinta, in fig. 4b è illustrato il metodo per la ricerca del centro di spinta.

$$FS = S'_{ph} Y'_p / (S'_a Y'_a - U_b D_b) = S'_{ph} Y'_p / (S'_a Y'_a - U_a D_a - U_b D_b) \quad (3)$$

dove: $Y'_p, Y'_a, Y'_a, D_a, D_b$ rappresentano le distanze dei centri di spinta dal punto di rotazione che coincide con la testa della paratia quando questa è vincolata, e con il punto posto a profondità $0.8D$ dal piano dello scavo nel caso di paratia libera (ipotesi di Blum). Il significato dei simboli è chiarito dalla fig. 5.

I calcoli sono stati svolti per i seguenti valori dei parametri geometrici e fisici:

- profondità d'infissione della paratia: $D = 1; 2$,
- profondità del piano impermeabile: $D \leq H_1 \leq 6D$, con 6 valori intermedi,
- lunghezza dei dreni orizzontali: $0.5 \leq L_d \leq 8$, con 7 valori intermedi,
- lunghezza dei dreni inclinati: $0,5\sqrt{2} \leq L_d \leq 6\sqrt{2}$, con 5 valori intermedi,
- lunghezza dei dreni verticali a valle: $L_d = D; H_1$,
- interasse in direzione Z: $0 \leq I \leq 6$ con 6 valori intermedi,
- angolo di attrito del terreno: $\phi' = 30^\circ$,
- coesione $c' = 0$,
- inclinazione della spinta a monte: $\delta = 0$,

* Per quanto attiene alle diverse definizioni del coefficiente di sicurezza si rimanda a BURLAND *et al.* [1981].

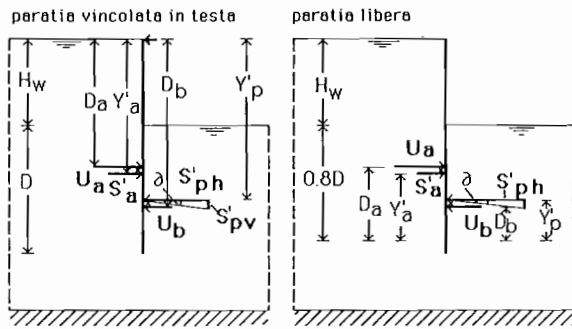


Fig. 5. - Spinte e loro distanze dal centro di rotazione per paratia vincolata in testa e per paratia libera.

- inclinazione della spinta a valle: $\delta = 0$, $\vartheta = \phi'/2$,
- peso dell'unità di volume saturo: $\gamma_{sat} = 2\gamma_w = 2t/m^3$.

3. Esame dei risultati

3.1 Assenza di drenaggio

Questo caso è stato risolto per poter operare confronti finalizzati a valutare l'efficienza dei differenti sistemi drenanti analizzati successivamente. Si ritiene opportuno esporre in dettaglio i risultati ad esso relativi, in quanto permettono l'approfondimento di alcuni interessanti aspetti del problema.

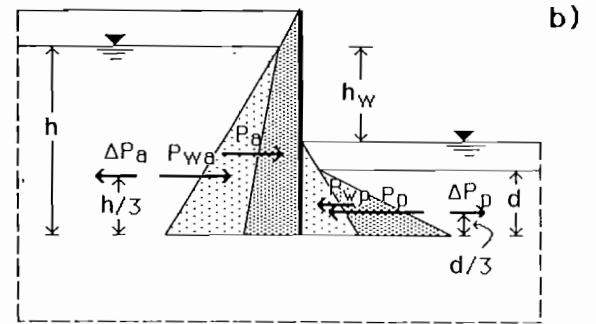
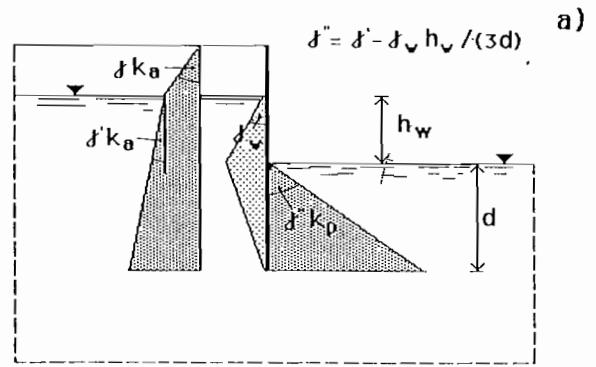
Si fa presente che, per questo caso, esistono in letteratura soltanto poche indicazioni per la valutazione degli effetti dell'acqua sulla stabilità delle paratie e sono relative sempre al dominio di filtrazione inferiormente illimitato.

TERZAGHI [1954] consiglia di tener conto della presenza della falda adottando i diagrammi di spinta riportati in fig. 6a; la risultante delle pressioni interstiziali viene approssimata da una spezzata di valore massimo pari a $h_w \gamma_w$, la spinta efficace a monte viene calcolata come in assenza di moto di filtrazione, mentre a valle si tiene conto dell'azione di trascinamento operata dall'acqua sullo scheletro solido considerando, come peso dell'unità di volume, il termine $\gamma' - h_w \gamma_w / 3d$, dove $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$.

Il Canadian Manual on Foundation Engineering consiglia di calcolare le spinte come se l'acqua fosse in quiete e quindi di correggerle, per tener conto del moto di filtrazione, delle quantità ΔP_a e ΔP_p che si ricavano come indicato in fig. 6b.

Entrambi i metodi si basano su semplificazioni del fenomeno di filtrazione.

Passando ai risultati del presente studio, si analizza dapprima il comportamento della paratia vincolata. In generale si è fatto riferimento a questa condizione di vincolo; solo in alcuni casi è fatto riferimento alla paratia libera ed allora lo si è indicato espressamente.



$$\Delta P_p = P h j_w h_w \quad \Delta P_a = A d j_w h_w$$

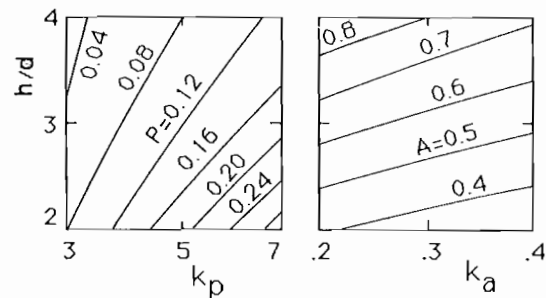


Fig. 6. - Procedimenti di calcolo proposti in letteratura. In fig. 6a sono indicati i diagrammi di spinta suggeriti da Terzaghi (1954); in fig. 6b sono riportati gli incrementi di spinta rispetto al caso idrostatico proposti dal Canadian Manual.

Tutti i casi riportati nel presente paragrafo e in quelli successivi si riferiscono a terreni incoerenti con angolo d'attrito $\phi' = 30^\circ$.

In fig. 7 viene messa in evidenza l'influenza della profondità del tetto della formazione impermeabile; vengono riportati gli andamenti delle spinte in funzione del rapporto $H1/D$, per due valori dell'infiltrazione: $D=1$ e $D=2$.

Per $H1/D=1$ il piano impermeabile passa per il piede della paratia, l'acqua è quindi in condizioni idrostatiche; per $H1/D > 1$ si instaura il moto di filtrazione. All'aumentare della profondità della superficie impermeabile, la spinta idraulica di monte U_a diminuisce mentre quella di valle U_b aumenta. Le spinte totali S_a a monte e S_p a valle diminuiscono entrambe. Le spinte efficaci, non rappresentate in figura, aumentano a monte e diminuiscono a valle,

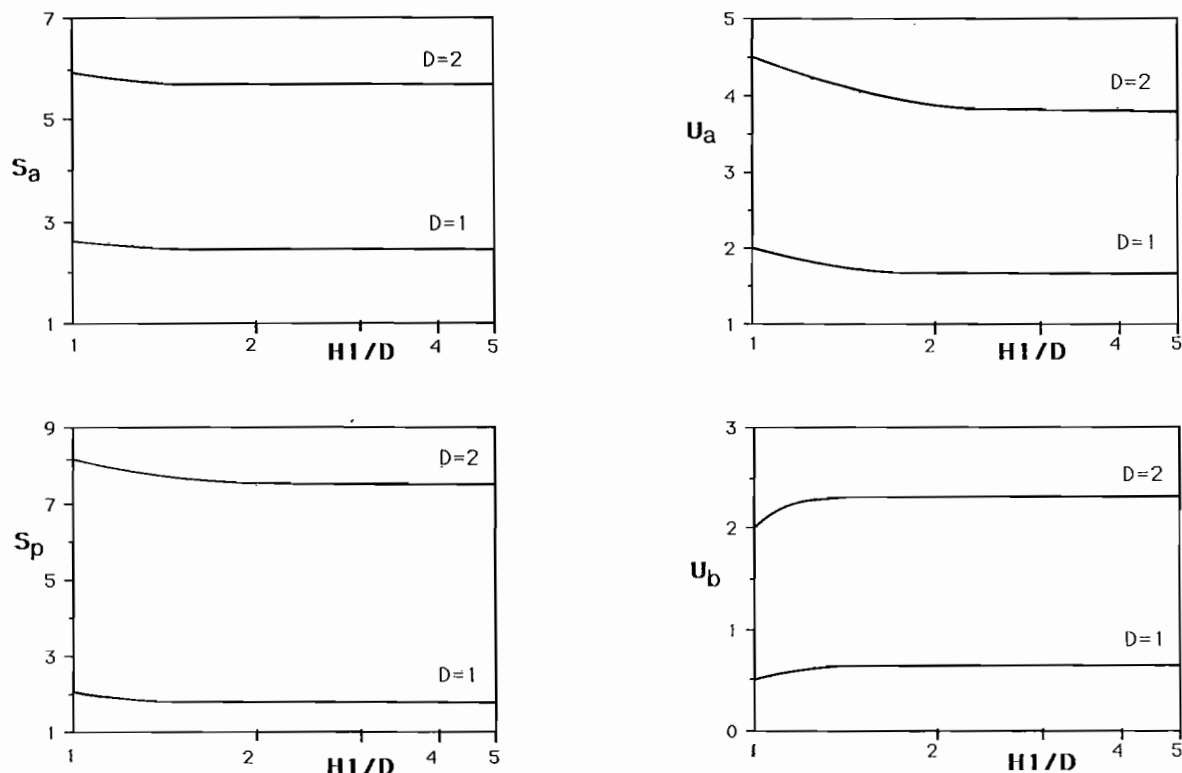


Fig. 7. - Assenza di drenaggio - paratia vincolata in testa. Spinte idrauliche U_a e U_b e totali, S_a e S_p in funzione del rapporto $H1/D$ fra profondità dello strato impermeabile e profondità d'infissione della paratia.

in conseguenza dell'azione di trascinamento esercitata dall'acqua sullo scheletro solido.

L'influenza di $H1/D$ si risente soltanto per valori inferiori a 1.5; per $H1/D > 4$ il fenomeno diventa del tutto indipendente dalla presenza del piano impermeabile. In fig. 8 sono riportati i diagrammi di FS in funzione di $H1/D$ per $D=2$ e $D=1$ e per i due valori considerati di ∂ , ossia $\partial=0$ e $\partial=\partial'/2$. Come si vede, FS è scarsamente influenzato da $H1/D$. Analizzando in dettaglio i diagrammi per i più bassi valori di $H1/D$, si nota che, per entrambi i valori di δ , FS aumenta inizialmente con $H1/D$, se $D=2$, mentre diminuisce con $H1/D$ se $D=1$. Questo significa che per $D=1$, in presenza del moto di filtrazione, il coefficiente di sicurezza si riduce rispetto alle condizioni idrostatiche, invece per $D=2$ tende ad aumentare. Appare intuitivo che esiste una profondità d'infissione per la quale FS risulta indipendente da $H1/D$.

Quanto detto è meglio esemplificato dalla fig. 9, nella quale FS è diagrammato in funzione della profondità d'infissione D per i due casi limite di acqua in quiete ($H1/D=1$) e di moto non confinato ($H1/D=4$). Come si vede, per entrambi i valori di ∂ le curve relative ai due casi limite si intersecano per un valore prossimo a $D=1.3$, che rappresenta appunto la profondità d'infissione per la quale FS risulta indipendente dalla profondità della superficie impermeabile.

Nella stessa fig. 9 sono riportate, per confronto, anche le soluzioni ottenute con il metodo proposto da Terzaghi e utilizzando i diagrammi del Canadian Manual. Entrambe valgono, come altrove detto, per $H1$ infinito e cioè per $H1 \geq 4D$. Si osserva che detti metodi portano a risultati meno cautelativi di quelli del presente studio.

Si passa ora all'esame del comportamento della paratia libera. La fig. 10 mostra che, a differenza di quanto accade per la paratia vincolata, l'andamento di FS in funzione di $H1/D$ risulta sempre decrescente. Le curve sono state tracciate anche nel campo dei valori delle profondità d'infissione non ammissibili ($FS < 1$) con lo scopo di mettere in evidenza il solo aspetto idraulico del fenomeno, al di là delle condizioni di stabilità dell'opera.

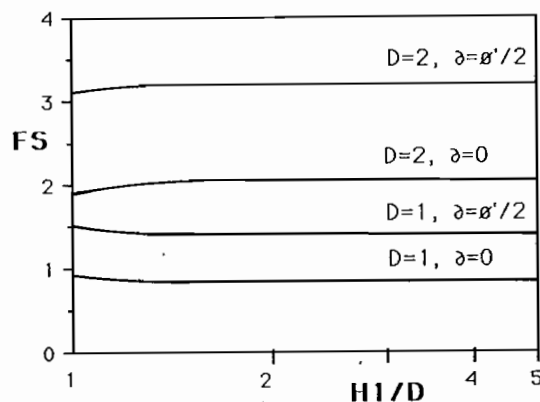


Fig. 8. - Assenza di drenaggio - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza FS in funzione del rapporto $H1/D$.

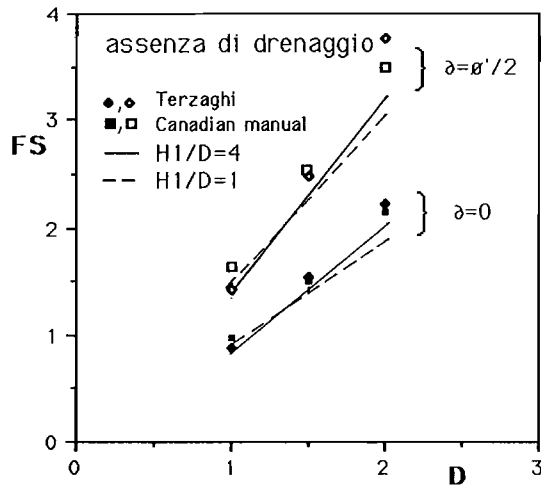


Fig. 9. - Assenza di drenaggio - paratia vincolata. Coefficienti di sicurezza in funzione della profondità d'infissione D e confronti con le soluzioni ottenute mediante i procedimenti di calcolo riportati in letteratura.

La fig. 11 mostra che il metodo di Terzaghi fornisce risultati molto prossimi a quelli determinati nel presente lavoro, mentre il metodo del Canadian Manual è sempre il meno cautelativo.

Infine è stata esaminata l'influenza dell'anisotropia del terreno per quanto riguarda la permeabilità. Come già detto, si è considerato il caso di anisotropia caratterizzata da permeabilità verticale $K_v = K_y$ ed orizzontale $K_o = K_x$. In fig. 12 è riportato il diagramma del coefficiente di sicurezza rapportato alla condizione isotropa in funzione del rapporto K_v/K_o . Si è fatto riferimento alle condizioni di dominio di filtrazione inferiormente illimitato; detta condizione si verifica a partire da valori di $H1/D$ variabili con il rapporto K_v/K_o e che, in particolare, aumentano al diminuire di quest'ultimo. I risultati mostrano che all'aumentare di K_v/K_o il coefficiente di sicurezza aumenta. Per $K_v/K_o < 1$, caso che più frequentemente si verifica nella realtà, il coefficiente di sicurezza assume valori inferiori a quelli previsti per mezzo isotropo, la differenza è trascurabile per $D=2.0$, apprezzabile per $D=1.0$. La condizione di anisotropia, frequente nella realtà, viene generalmente ignorata nella pratica progettuale, a svantaggio di sicurezza.

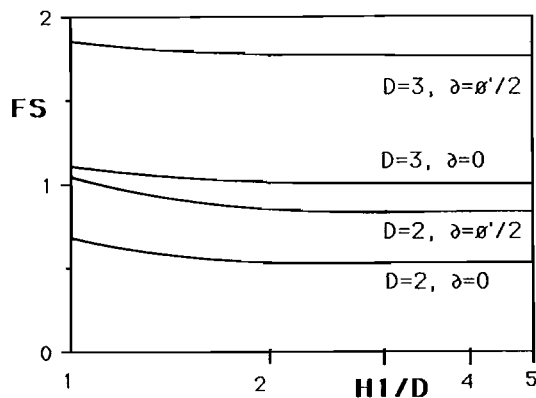


Fig. 10. - Assenza di drenaggio - paratia libera. Coefficienti di sicurezza FS in funzione del rapporto $H1/D$.

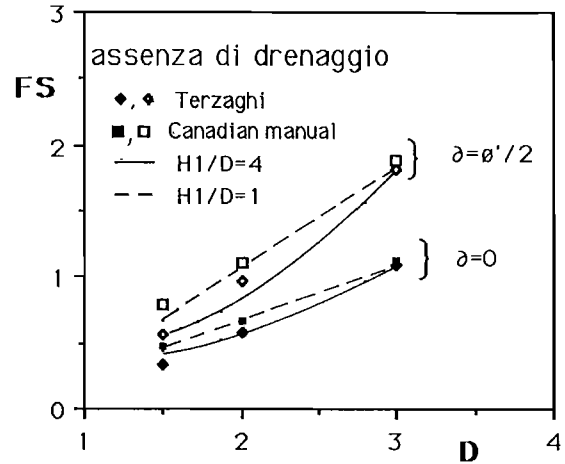


Fig. 11. - Assenza di drenaggio - paratia libera. Coefficienti di sicurezza FS in funzione della profondità d'infissione D e confronti con le soluzioni ottenute mediante i procedimenti di calcolo riportati in letteratura.

3.2 Drenaggi orizzontali

3.2.1 Caso piano.

Il caso di moto piano, al quale si riferisce il presente paragrafo, si verifica a rigore in presenza di un tappeto drenante continuo. A questo caso può anche ricondursi quello di dreni tubolari sufficientemente vicini, come si vedrà analizzando il caso di moto tridimensionale.

Il moto piano verrà indicato nel prosieguo con il simbolismo $I=0$.

È stata analizzata l'influenza dei dreni posizionati alla quota dello scavo, perché, a parità di lunghezza, per questa posizione si ottiene il massimo di efficienza.

In fig. 13 sono riportati i diagrammi delle spinte e dei coefficienti di sicurezza in funzione della lunghezza L_d dei dreni, adimensionalizzata sempre rispetto all'altezza h_w . Ci si è riferiti a due valori dell'infissione $D=1$ e $D=2$, e a due profondità della superficie impermeabile $H1/D=1$ e $H1/D=4$.

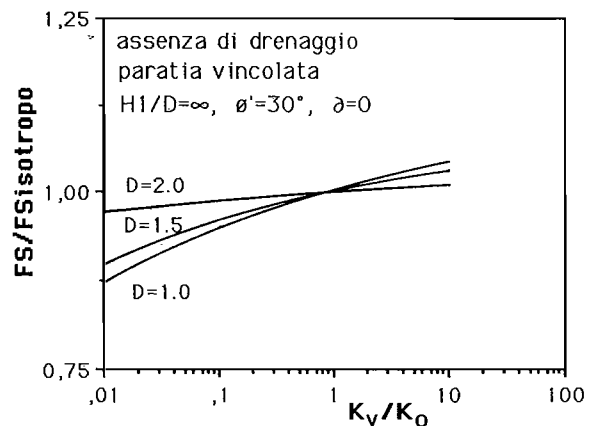


Fig. 12. - Assenza di drenaggio - paratia vincolata in testa. Rapporto fra il coefficiente di sicurezza in condizioni anisotrope e quello in condizioni isotrope, in funzione del rapporto K_v/K_o fra i coefficienti di permeabilità verticale o orizzontale.

I dreni provocano una forte riduzione delle spinte totali e idrauliche a monte; minore è l'influenza di valle dove comunque si registra l'aumento della spinta totale e la diminuzione di quella idraulica al crescere di L_d .

Si verifica un significativo incremento del coefficiente di sicurezza; i diagrammi di FS in funzione di L_d , tendono, al crescere di L_d , a valori asintotici.

Tali valori limite sono indipendenti da $H1/D$ perché, per $L_d = \infty$, le pressioni interstiziali sono ovunque

que nulle al di sopra dei dreni. Al di sotto di essi non c'è moto dell'acqua, e quindi le condizioni piezometriche sono indipendenti dalla presenza del piano impermeabile.

Per $D = 1$, l'incremento del coefficiente di sicurezza è notevole già per piccoli valori di L_d . Per $L_d = 1$ si ottiene circa il 70% dell'incremento massimo corrispondente a $L_d = \infty$ quando $H1/D = 4$, l'80% quando $H1/D = 1$.

Nel caso di $D = 2$, FS aumenta più lentamente con

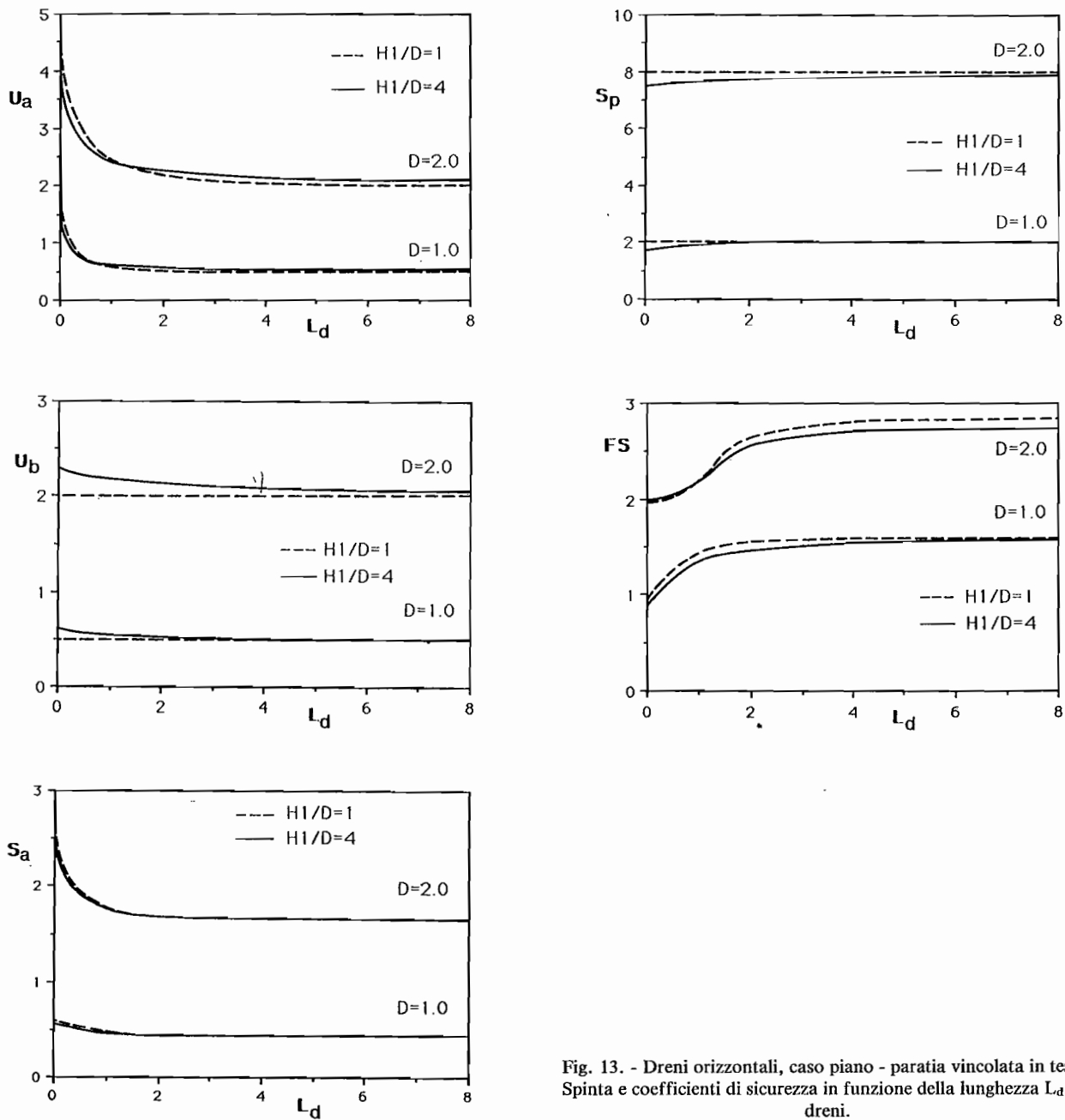


Fig. 13. - Dreni orizzontali, caso piano - paratia vincolata in testa. Spinta e coefficienti di sicurezza in funzione della lunghezza L_d dei dreni.

L_d ; infatti, per ottenere incrementi pari a quelli considerati per $D=1$, bisogna riferirsi ad una lunghezza dei dreni $L_d=2$.

In fig. 14 sono riportate le curve del coefficiente di sicurezza, normalizzato rispetto al valore corrispondente all'assenza di drenaggio, in funzione di $H1/D$, per i due valori considerati di D e per $L_d=3$, che corrisponde ad una lunghezza di dreno sicuramente ampiamente efficace. I risultati mostrano che, indipendentemente da $H1/D$, il drenaggio risulta tanto più efficace quanto più basso è D .

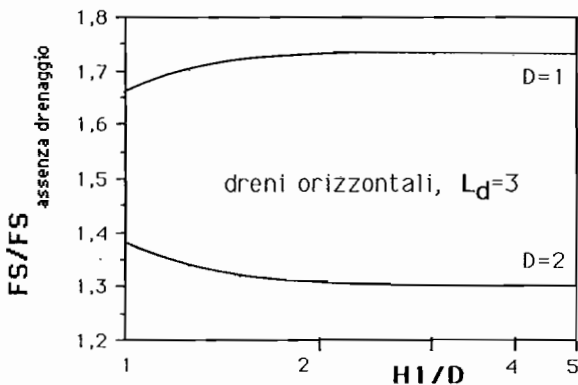


Fig. 14. - Dreni orizzontali, caso piano - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza normalizzati rispetto a quello in assenza di drenaggio in funzione del rapporto $H1/D$.

3.2.2 Caso tridimensionale

Ci si riferisce al caso di dreni disposti ad interasse $I \neq 0$ nella direzione longitudinale dell'opera. L'equazione del moto di filtrazione è stata risolta considerando, allora, il flusso nelle tre dimensioni x , y e z .

L'analisi di stabilità è stata condotta in due piani verticali: quello contenente il dreno e quello intermedio fra due dreni, in entrambi i casi, come se il problema fosse piano.

In fig. 15 sono riportati i diagrammi del coefficiente di sicurezza FS in funzione dell'interasse I , per il caso di paratia vincolata e per due valori di D e di $H1/D$, tenendo costante la lunghezza dei dreni $L_d=3$. Le curve riportate in figura si riferiscono ai piani contenenti i dreni ($Z=0$) e ai piani intermedi ($Z=I/2$). Come era da attendersi, all'aumentare dell'interasse, le condizioni di stabilità peggiorano. Nel generico piano intermedio ($Z=I/2$), si raggiungono le condizioni prossime a quelle in assenza di drenaggio per $I > 5 \div 6$. Nel piano contenente i dreni ($Z=0$), per tali valori dell'interasse, si risente ancora dell'effetto del drenaggio per l'infissione più ridotta: se $D=1$; si perde invece quasi ogni beneficio per $D=2$. Si può vedere che le curve relative ai due piani considerati, pur decrescendo entrambe all'aumentare dell'interasse, si mantengono ben distinte quando $D=1$; al contrario, per $D=2$ sono quasi coincidenti.

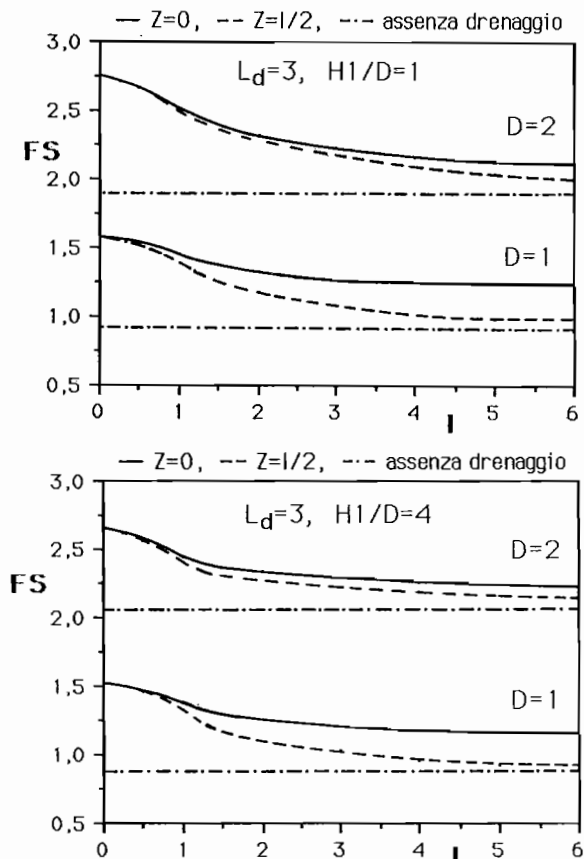


Fig. 15. - Dreni orizzontali, caso piano - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza FS in funzione dell'interasse I fra i dreni. Le curve a linea continua si riferiscono al generico piano contenente i dreni, quelle tratteggiate al piano intermedio, quelle tratto e punto si riferiscono all'assenza di drenaggio.

Questo andamento potrebbe lasciar credere che, in questo ultimo caso, il moto di filtrazione, pur modificandosi rispetto al caso di $I=0$, risulti piano. A meglio chiarire il fenomeno, si rimanda ai diagrammi delle spinte e dei centri di spinta in funzione dell'interasse (fig. 16); attesa la limitata influenza di $H1/D$ evidenziata in precedenza, si è fatto riferimento al caso di assenza di moto ($H1/D=1$), nel quale l'effetto dei dreni si risente soltanto a monte.

Sia per $D=1$ che per $D=2$, le spinte agenti nei due piani si differenziano nettamente; per $D=2$, (vedi fig. 16) accade che la variazione del centro di spinta bilancia la variazione del valore della spinta nell'espressione del coefficiente di sicurezza fino a valori abbastanza elevati di I , per cui FS assume quasi lo stesso valore nei due piani. Quanto detto per $H1/D=1$ è stato verificato anche per $H1/D=4$.

I diagrammi di fig. 15 mostrano che l'efficienza del sistema di dreni è prossima a quella del caso piano per valori di I non maggiori di 0.5, pertanto detto valore dell'interasse appare essere ottimale ai fini applicativi. Infatti, per valori di $I < 0.5$, il coefficiente di sicurezza non si incrementa apprezzabilmente, mentre per valori maggiori tende a diminuire rapidamente.

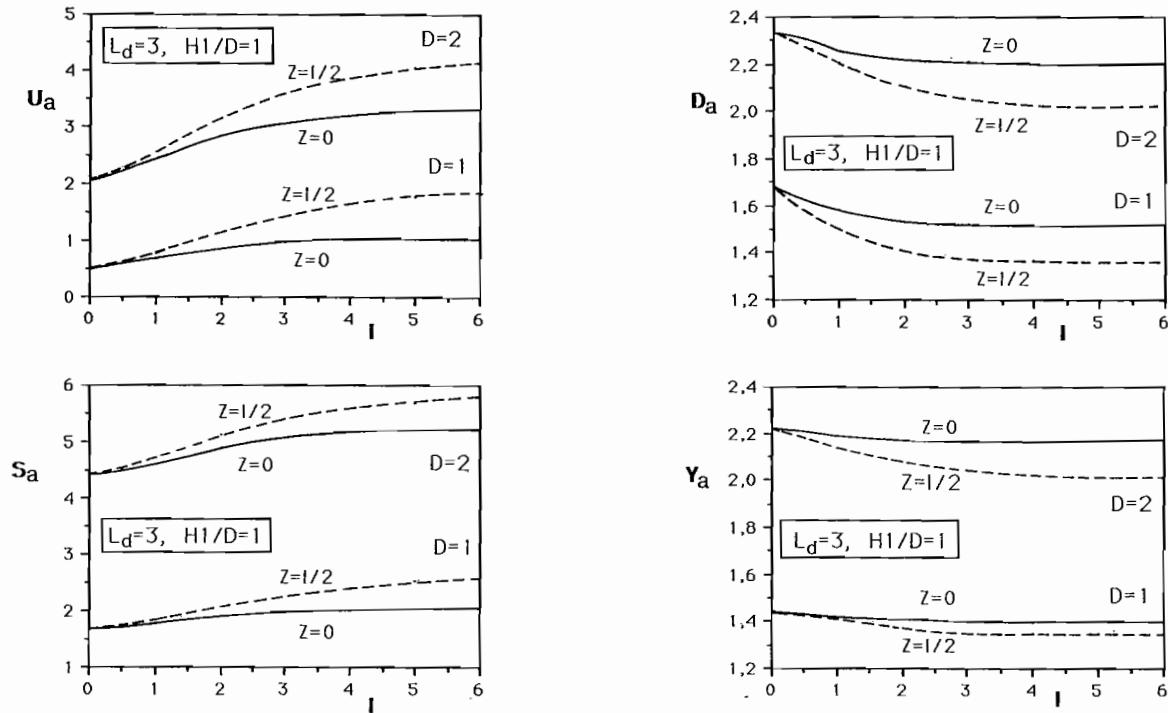


Fig. 16. - Dreni orizzontali, caso piano - paratia vincolata in testa. Spinte e centri di spinta in funzione dell'interasse I fra i dreni. Le curve a linea continua si riferiscono al piano contenente i dreni, quelle tratteggiate al piano intermedio, quelle tratto e punto si riferiscono all'assenza di drenaggio.

3.3 Dreni inclinati

Si è considerata una fila di dreni inclinati a 45° che dal piano campagna si addentrano nel volume di terreno interessato dalla spinta attiva (fig. 3c).

Se si provvede all'aggottamento dell'acqua, le pressioni idrauliche lungo di essi sono nulle, in caso contrario, trascurando molto verosimilmente le perdite di carico, la quota piezometrica sul loro contorno è uguale a quella del piano campagna di valle.

Nei calcoli è stato considerato soltanto il secondo caso perché è quello che più realisticamente può adottarsi nella pratica.

In fig. 17 sono riportati i diagrammi del coefficiente di sicurezza, in funzione di L_d , per alcuni casi geometrici, per paratia vincolata in testa e per il problema piano ($I=0$).

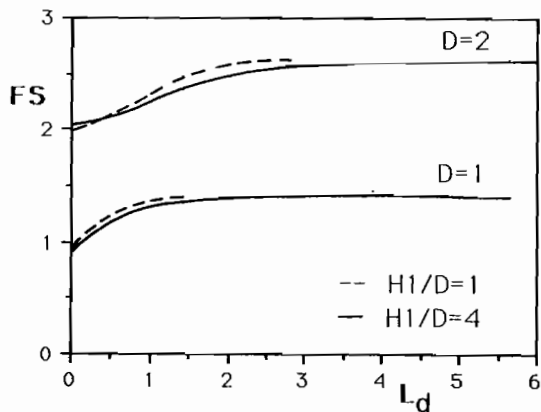


Fig. 17. - Dreni inclinati, caso piano - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza FS in funzione della lunghezza dei dreni.

La lunghezza massima efficace dei dreni è $H1 \cdot \sqrt{2}$, infatti, per lunghezze maggiori, i dreni si addentrano nello strato impermeabile. In coincidenza della lunghezza massima, si ottiene un incremento del coefficiente di sicurezza, rispetto alla condizione di drenaggio assente, pari al 25% per $D=2$, e pari circa al 50% per $D=1$, come mostrato dalla fig. 17.

In fig. 18 sono riportati i diagrammi del coefficiente di sicurezza FS in funzione dell'interasse I fra i dreni, nel caso di moto tridimensionale.

Si vede che all'aumentare di I , FS tende a diminuire più rapidamente che per i dreni orizzontali, in particolare per i più bassi valori di D .

3.4 Dreni verticali

La posizione dei dreni in esame tende a rendere, a valle della paratia, il regime delle pressioni interstiziali prossimo a quello idrostatico. Anche in questo caso, che corrisponde allo schema d di fig. 3, è stato assunto che non si provveda all'aggottamento dell'acqua, per cui la funzione dei dreni è quella di stabilire, al loro interno, una quota piezometrica pari a quella del piano campagna a valle.

In fig. 19 sono riportati i diagrammi del coefficiente di sicurezza in funzione della profondità dello strato impermeabile per due lunghezze dei dreni: $L_d = D$ e $L_d = H1$, per il caso di paratia vincolata in testa e problema piano ($I=0$).

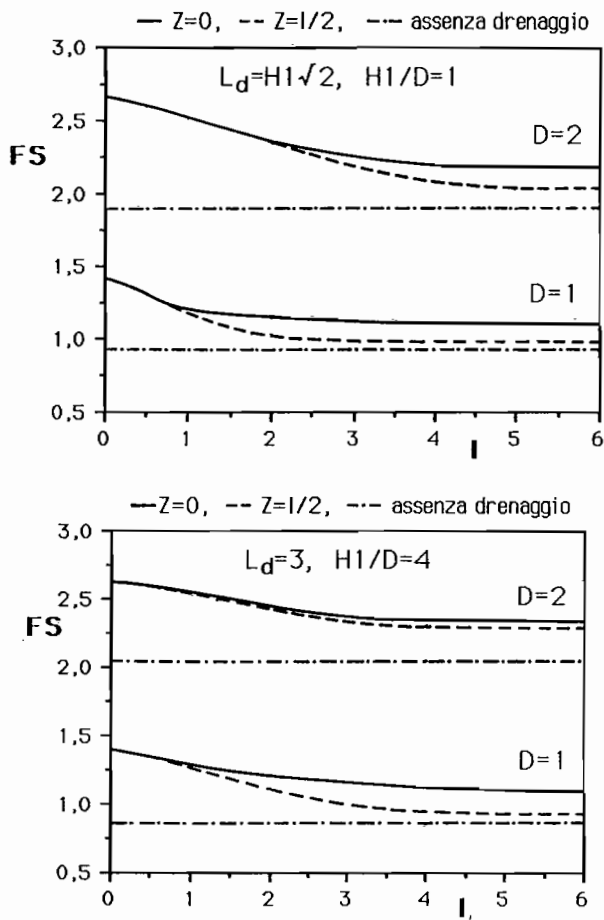


Fig. 18. - Dreni inclinati, caso tridimensionale - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza FS in funzione dell'interesse I fra i dreni. Le curve a linea continua si riferiscono al piano contenente i dreni, quelle tratteggiate al piano intermedio, quelle tratto e punto si riferiscono all'assenza di drenaggio.

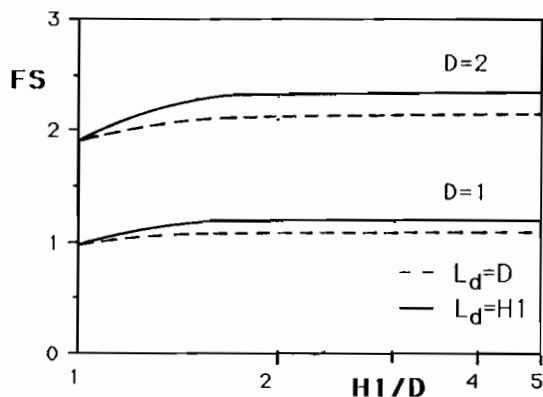


Fig. 19. - Dreni verticali a valle, caso piano - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza FS in funzione del rapporto H1/D per due lunghezze dei dreni: $L_d = D$ e $L_d = H1$.

Per $H1/D = 1$ (paratia attestata sulla formazione impermeabile) i dreni non esplicano alcuna azione; all'aumentare di $H1/D$ essi fanno sentire in modo crescente la loro influenza.

Il miglioramento non è molto soddisfacente, infatti i valori del coefficiente di sicurezza sono nettamente inferiori a quelli raggiungibili con i sistemi drenanti prima discussi.

La causa della scarsa efficienza è chiaramente espressa dai diagrammi di spinta riportati nella fig. 20, nella quale, per il caso d'infissione $D=2$, sono messi a confronto i risultati del calcolo relativi ad assenza di drenaggio, dreni verticali a valle di lunghezza $L_d = H1$, dreni orizzontali di lunghezza $L_d = 3$. Si vede che a valle della paratia i due tipi di dreni hanno più o meno gli stessi effetti mentre a monte i dreni orizzontali influenzano le spinte in misura molto maggiore.

Infine, per il caso tridimensionale, in fig. 21 sono riportati i diagrammi di FS in funzione dell'interesse I per $L_d = H1$ e per $H1/D = 4$ (per $H1/D = 1$, ovviamente il sistema di drenaggio considerato ha efficienza nulla).

Come si vede, l'aumento di stabilità dovuto al drenaggio rapidamente svanisce all'aumentare di I.

3.5 Influenza del drenaggio sui gradienti idraulici a valle della paratia

Come è noto, la paratia interessata da un moto di filtrazione, deve essere verificata rispetto al fenomeno del sifonamento. La condizione di stabilità dell'opera, per tale aspetto, è legata all'entità delle forze di trascinalimento esercitate dall'acqua sullo scheletro solido e perciò, ai gradienti idraulici a valle della paratia stessa.

Di seguito si farà riferimento a due parametri significativi per lo studio del fenomeno, ossia alla cadente media i_m nel prisma di terreno di profondità D e larghezza D/2 [TERZAGHI, 1943] ed alla cadente di uscita JE (fig.22a).

In fig.22 sono riportati i valori assunti dalle due cadenti al variare di $H1/D$, per alcuni valori della profondità d'infissione D, in assenza di drenaggio ed in presenza dei sistemi drenanti considerati.

Le figg. 22b e c, che sono relative alla condizione di assenza di drenaggio, mostrano che la cadente media i_m e il gradiente di uscita JE aumentano con $H1/D$ per poi tendere ad un valore costante che è funzione della sola profondità d'infissione D.

Nei rimanenti diagrammi di fig. 22 sono riportati le cadenti in esame, ricavate in presenza dei dreni orizzontali e inclinati (non sono state riportate quelle relative ai dreni verticali perché sono di entità trascurabile). I diagrammi si riferiscono al caso piano ($I = 0$) e a lunghezza dei dreni $L_d = 3$. Per i dreni inclinati, tale lunghezza è completamente sfruttata soltanto a partire da valori di $H1/D$ pari a $3/\sqrt{2}D$; per valori inferiori di $H1/D$, il dreni penetra nella formazione impermeabile. Inoltre, vale la pena di evidenziare che, nel caso piano preso in esame, quando i dreni inclinati si spingono fino alla superficie impermeabile, l'acqua a valle è in condizioni idrostatiche.

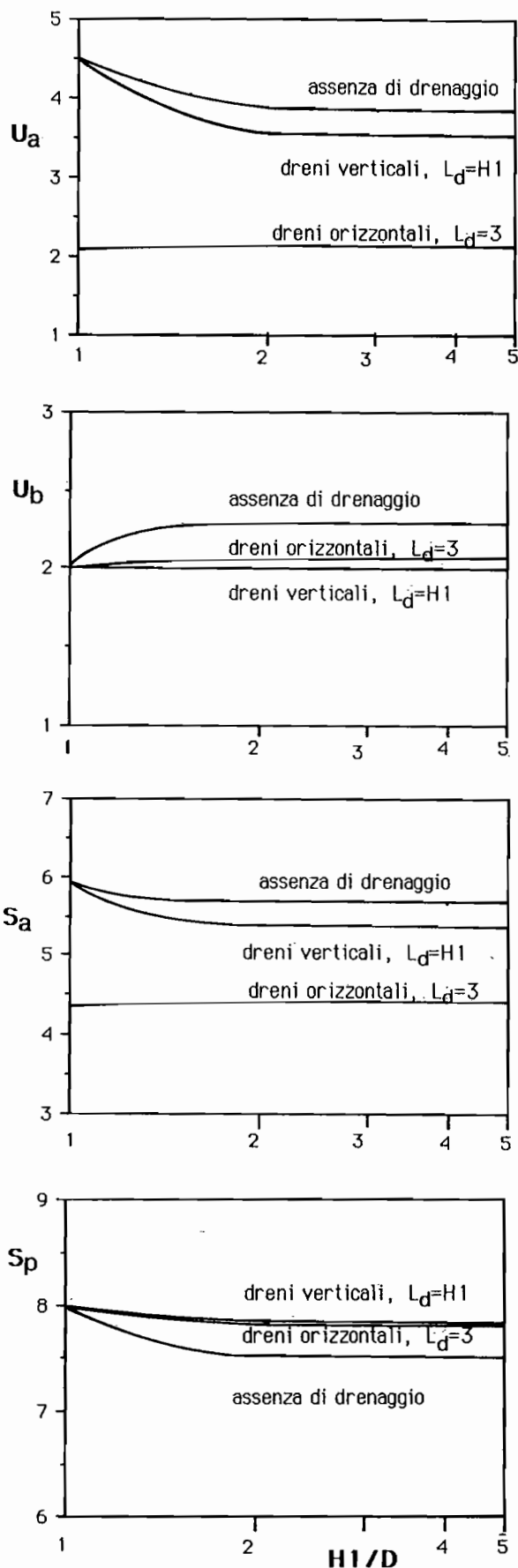


Fig. 20. - Dreni verticali a valle, caso piano - paratia vincolata in testa. Confronto fra le spinte in assenza di drenaggio, quelle in presenza di dreni orizzontali di lunghezza $L_d=3$ e di dreni verticali di lunghezza $L_d=H1$.

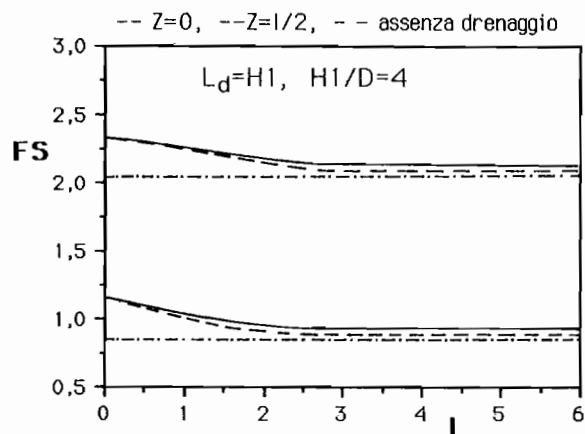


Fig. 21. - Dreni verticali a valle, caso tridimensionale - paratia vincolata in testa. Coefficienti di sicurezza in funzione dell'interasse I fra i dreni. Le curve a linea continua si riferiscono al piano contenente i dreni, quelle tratteggiate al piano intermedio quelle tratto e punto si riferiscono all'assenza di drenaggio.

Si può notare che la presenza dei dreni determina una drastica riduzione delle cadenti.

Nella fig.22h sono diagrammati, in funzione di D , i valori di i_m relativi sia all'assenza che alla presenza di drenaggio, con lunghezza dei dreni $L_d=3$, per $H1/D=4$. Nella stessa figura sono riportati i valori di JE relativi all'assenza di drenaggio, ricavati nel presente studio per $H1/D=4$ e i valori di JE ricavati con un metodo di trasformazione conforme da Khosla, BOSE e TAYOL [1954]. Si vede che c'è un ottimo accordo con i risultati del presente lavoro.

4. Considerazioni conclusive

Il presente studio è stato condotto per un numero di casi ampio ma certamente non esaustivo, Si è fatto riferimento, infatti, ad un'unica caratterizzazione del sottosuolo: terreno omogeneo, incoerente con attrito $\phi=30^\circ$. È stato dato maggiore peso al caso di paratia vincolata in testa rispetto a quello di paratia libera, inoltre la paratia e il vincolo sono stati considerati rigidi. Tuttavia, sulla base dei risultati presentati, si possono trarre indicazioni utili ai fini del proporzionamento dei sistemi drenanti.

Appare chiaro che i dreni orizzontali risultano i più efficaci ai fini dell'incremento della stabilità dell'opera, mentre i dreni verticali condizionano maggiormente i gradienti idraulici di valle. I dreni inclinati hanno un comportamento intermedio fra i primi due e più prossimo a quello dei dreni orizzontali. La fig. 23 esprime sinteticamente i risultati del calcolo, con riferimento al caso di $D=2$ e $H1/D=4$.

Per quanto attiene al proporzionamento del sistema di dreni orizzontali, si è evidenziato che la lunghezza L_d efficace dei dreni è pari a 2 ÷ 3 volte la differenza di quota piezometrica fra monte e valle che, nel presente studio, coincide con l'altezza fuori

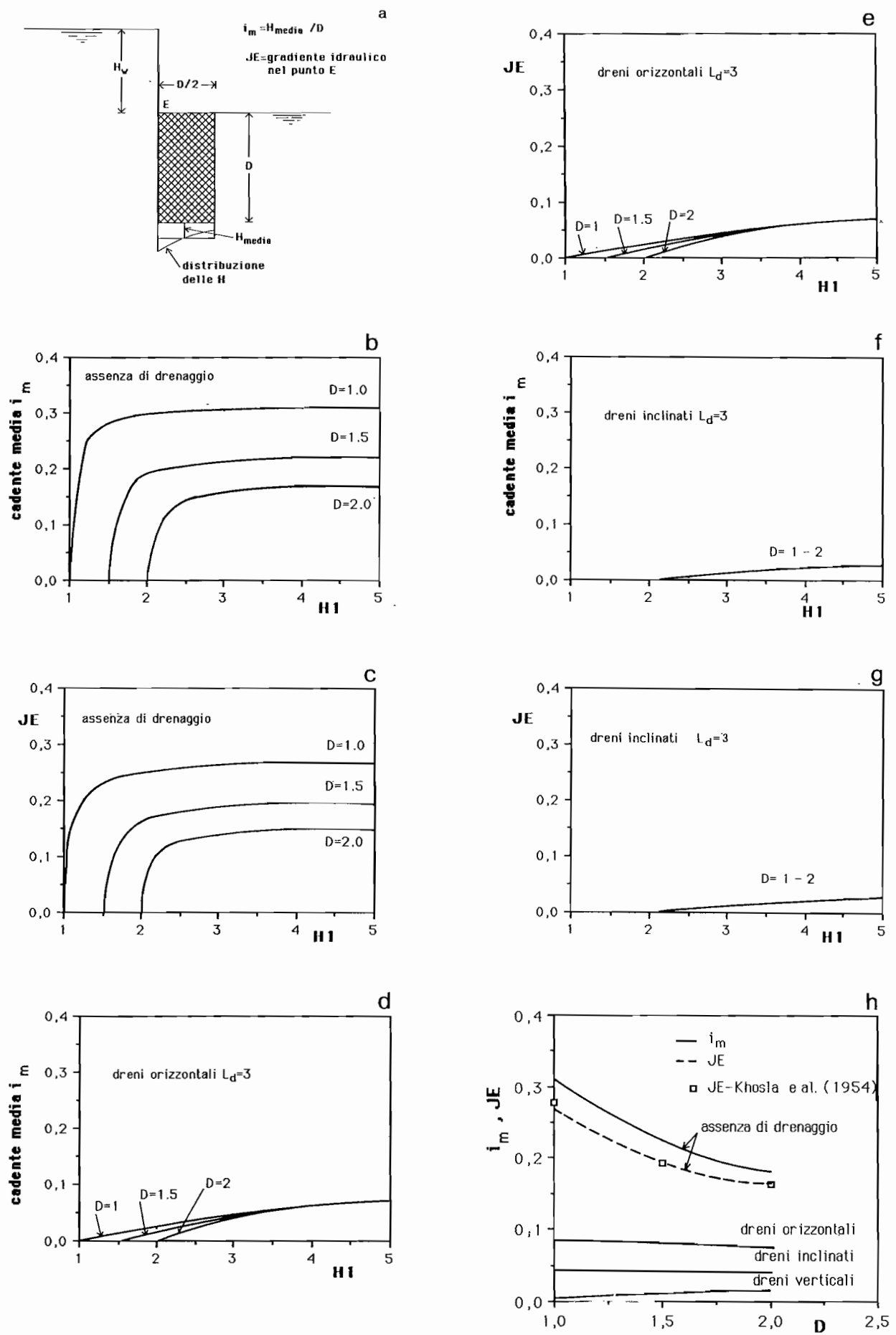


Fig. 22. - Gradienti idraulici a valle della paratia in assenza e in presenza di dreni, nel caso di moto piano.

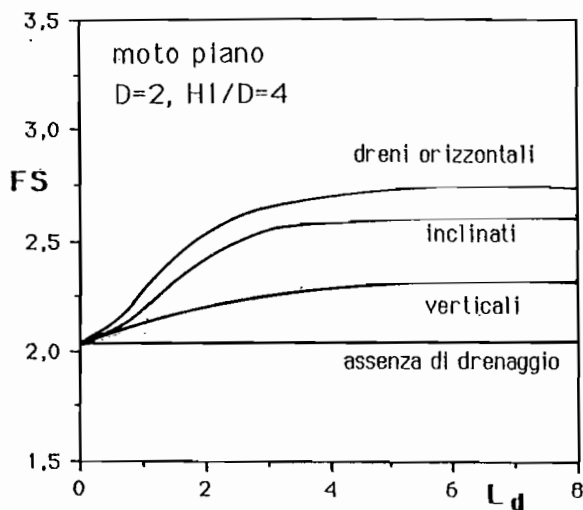


Fig. 23. - Coefficienti di sicurezza FS per i 4 schemi considerati, per il moto piano, paratia vincolata in testa, infissione $D=2$, lunghezza dei dreni $L_d=3$ e profondità dello strato impermeabile $H_1=4D$.

terra della paratia. L'interesse ottimale è risultato essere all'incirca la metà di detta differenza di quota.

Un sistema di dreni orizzontali realizzato con questi criteri permette di aumentare il coefficiente di sicurezza dell'opera, portandolo ad un valore prossimo a quello che si verifica per falda a livello del piano campagna a valle.

Nel valutare la possibile generalizzazione delle conclusioni sopraddette, risulta opportuno osservare che i risultati da cui esse sono tratte sono strettamente legati alle ipotesi introdotte nell'analisi teorica. In particolare l'ipotesi di omogeneità nei riguardi della permeabilità risulta particolarmente limitativa. Nella realtà, condizioni locali, per altro difficilmente rilevabili, possono allontanare il regime di pressioni neutre da quello valutato teoricamente ed influenzare di conseguenza le condizioni di stabilità dell'opera.

Occorre ancora ricordare che le considerazioni in precedenza esposte sono ancora legate alle ipotesi di rigidità della paratia e dell'eventuale vincolo.

Pur tuttavia si ritiene che i risultati del presente studio permettano di trarre utili indicazioni al fine di definire il sistema drenante di una paratia.

BIBLIOGRAFIA

- Associatee on the National Building Code - Canadian Manual on Foundation Engineering.
- BBA J. (1972) - *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
- BURLAND J.B., POTTS AD.M., WALSH N.M. (1981) - *The overall stability of free and propped embedded cantilever retaining walls*. Ground Engin. 14, n. 5.
- CEDERGREEN H.R. (1967) - *Seepage, drainage and flow nets*. J. Wiley and Sons, New York.
- DI MAIO AC., EVANGELISTA A., VIGGIANI G. (1988) - *Analisi dell'efficienza di sistemi di dreni tuborali*. Rivista Italiana di Geotecnica, pp. 187, 199.

- KHOSLA R.B.A.N., BOSE N.K., TAYLOR E. (1954) - *Design of Weirs on Permeable Foundations*. Central of Irrigation, New Delhi, India.
- MUSKAT M. (1953) - *The flow of homogeneous fluids through porous media*. Mc Graw Hill, New York.
- POLUBARINOVA KOCHINA M. (1956) - *Theory of ground water movements*. Princeton University Press.
- TERZAGHI K. (1954) - *Anchored bulkheads*. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 119.
- VIGGIANI C. (1983) - *Considerazioni degli effetti dell'acqua nel progetto delle opere di sostegno flessibili*. Corso di aggiornamento su opere di sostegno flessibili. Politecnico di Milano.

SUMMARY

Stability of embedded retaining walls in water-bearing soil, in presence of tube drains.

It is well known that pore pressures due to groundwater make the factor of safety of retaining walls decrease. For instance, the factor of safety for the top-fixed embedded wall shown in fig. 1, computed in the case of soil surface covered with a continuous layer of water, is about 1/3 of the one computed in the case of groundwater absent.

The factor of safety may be increased by placing some drains in the volume of soil that influences the forces acting against the wall.

The aim of this paper is to provide some rational design criteria for the most convenient tube drain system, such criteria being based on a theoretical approach. Obviously, the extent to which the results can be applied is limited since the model which has been used is a simplification of the real system.

The layouts of the drainage systems considered in this paper are shown in fig. 2. The first scheme (scheme a) refers to the case in which there is no drainage, the others to three different systems of tubular drains: horizontal drains (scheme b), 45 inclined drains (scheme c), vertical downstream drains (scheme d). The water pressure is null along the horizontal drains only; it coincides with the downstream hydrostatic value along the others. The schemes have been analyzed in conditions of both three-dimensional flow (spacing between any two drains $I \neq 0$) and two-dimensional flow ($I=0$, i.e. the drains are as close to each other as to act like a draining plane).

The analysis has been carried out on the assumption that the soil surface is covered with a continuous layer of water, Homogeneous and isotropic permeability has been assumed.

The solution has been obtained by solving the field equation (1) by finite differences, under the boundary conditions (2). The values of the parameters which have been taken under consideration are reported under (4). Earth pressures have been computed by using Coulomb's theory. The embedded walls have been considered both in the case they were fixed at the top and in the case they were not; in the first case free earth support has been assumed.

The factor of safety has defined as in (3).

Figs. from 7 to 11 refer to absence of drainage. They point out the influence upon FS of the depth H_1 of an impervious base and of the length D of embedded walls. Fig. 12 shows that in the more usual range of values for K_v/K_o , anisotropy makes the safety factor decrease.

Figs. from 13 to 16 refer to the horizontal drains. They point out the influence upon the factor of safety of the length L_d of the drains, of the spacing I between any two drains and of the depth H_1 of the impervious base. The figures show that the most convenient length of the drains is about three times the value hw of the piezometric head and that the most convenient of value the drain spacing I is about 0.5. In fact the flow is very close to being two-dimensional up to $I=0.5$ thus, values of $I < 0.5$ would increase the cost of the system without a significant improvement of its effectiveness. Moreover, the presence of drains makes the flow independent of the depth of embedment.

Figs. 17 and 18 refer to the scheme of inclined drains, for two and three-dimensional flow respectively.

Figs. from 19 to 21 refer to vertical drains.

The figures show that both systems make the stability of embedded walls increase, but they are less efficient than the horizontal system.

Finally, the influence of drainage upon the factor of safety with respect to piping has been analyzed. Fig. 22 shows the plots of the

exit gradient J_E and of the average gradient i_m as functions of H_1 and D . It may be seen that drainage increases safety enormously, particularly if it is made with vertical drains.

In fig. 23 the safety factors FS of the different drainage systems are compared.