

Studio parametrico del comportamento di paratie ancorate

di Claudio Tamagnini, Vincenzo Pane, Manuela Cecconi

Discussione di Stefano Aversa*,
Marco Valerio Nicotera**

1. Premessa

Gli scriventi hanno letto con grande interesse e apprezzamento l'articolo di TAMAGNINI *et al.*, pubblicato sul numero 1/2002 della Rivista Italiana di Geotecnica, che presenta uno studio parametrico del comportamento di una paratia vincolata in testa realizzata in terreni a grana fine. Lo studio, svolto con riferimento alle sole condizioni non drenate, è stato finalizzato a valutare l'influenza di alcuni fattori geometrici e meccanici (dimensioni della struttura di sostegno, resistenza non drenata dei terreni, rigidità dei terreni e della paratia) sulla risposta in condizioni di esercizio della paratia nell'ipotesi di vincolo in testa infinitamente rigido. Le analisi numeriche che compongono lo studio parametrico sono state eseguite con un programma di calcolo alle differenze finite (Flac®) in condizioni di deformazione piana adottando per il terreno, supposto omogeneo, un legame costitutivo elasto-plastico perfetto con legge di snervamento alla Tresca e – ovviamente – legge di flusso associata.

La scelta dei parametri adimensionali da considerare nell'analisi è stata condotta sulla base dei principi della teoria dell'Analisi Dimensionale e del teorema di Buckingham che di tale teoria è un risultato fondamentale.

La finalità dell'articolo, dichiarata dagli Autori, di proporre un metodo speditivo per l'analisi di paratie ancorate in argilla e dunque per la progettazione di tali opere ha suggerito agli scriventi alcune considerazioni che si riportano nel seguito.

2. Verifiche allo stato limite ultimo con approcci tradizionali

Nell'articolo non si fa riferimento alle condizioni di stato limite ultimo delle paratie considerate,

* Università degli Studi di Napoli "Parthenope".

** Università degli Studi di Napoli Federico II.

ma si analizzano, esclusivamente, le condizioni di esercizio. Tuttavia nella prassi progettuale, l'analisi delle prime condizioni precede quella delle seconde, per evitare di prendere in considerazione soluzioni che non siano caratterizzate da adeguati margini di sicurezza. Un metodo proposto per la progettazione dovrebbe dunque tenere conto di entrambi tali aspetti.

La norma vigente in Italia [DM 11/3/88] non definisce un metodo di calcolo del coefficiente di sicurezza delle paratie e non ne impone – quindi – un valore limite inferiore.

Con riferimento alle paratie vincolate in testa, la verifica allo stato limite ultimo viene, generalmente, effettuata ipotizzando un cinematismo di rottura con rotazione intorno al vincolo. Si effettua l'analisi in ipotesi di comportamento rigido della paratia e rigido-plastico del terreno, con criterio di rottura di Tresca, nel caso di condizioni non drenate (analisi in tensioni totali), e resistenza nulla a trazione. Per la definizione numerica del coefficiente di sicurezza si può fare riferimento a uno dei seguenti approcci (vedi Fig. 1).

- I. Il coefficiente globale di sicurezza F_I è definito come rapporto tra il momento della spinta passiva ed il momento della spinta attiva entrambi valutati rispetto al vincolo. Nella determinazione della spinta attiva si trascurano le eventuali tensioni di trazione, ipotizzando che si crei una frattura nel terreno alle spalle della paratia (*tension crack*). Nel caso in cui il piano campagna a monte non sia impermeabilizzato, si ritiene che tali fratture di trazione possano riempirsi d'acqua, in occasione di eventi meteorici, e, pertanto, si tiene conto della spinta dell'acqua che agisce sulla parte sommitale della parete. Si può quindi distinguere un caso I.a (assenza di acqua nelle fratture di trazione) ed I.b (presenza di acqua nelle fratture di trazione). In modo equivalente il coefficiente di sicurezza può essere inteso come l'inverso di un fattore di riduzione della spinta passiva (cfr. Fig. 2.a).
- II. Il coefficiente globale di sicurezza F_{II} è definito come rapporto tra il momento della spinta netta (differenza tra spinta passiva e spinta attiva) che il terreno esercita sulla paratia al disotto del piano di scavo ed il momento della spinta attiva agente sulla parete nel tratto fuori terra, entrambi valutati rispetto al vincolo. Anche in questo caso si trascura la resistenza a trazione nella parte attiva e si possono prendere in esame due sottocasi II.a e II.b, relativi rispettivamente al caso di assenza di acqua nelle fratture di trazione ed a quello di riempimento delle stesse.
- III. La norma provvisoria europea sulla Progettazione geotecnica EN(V) 1997/1, consiglia di effettuare le verifiche a stato limite ultimo di una

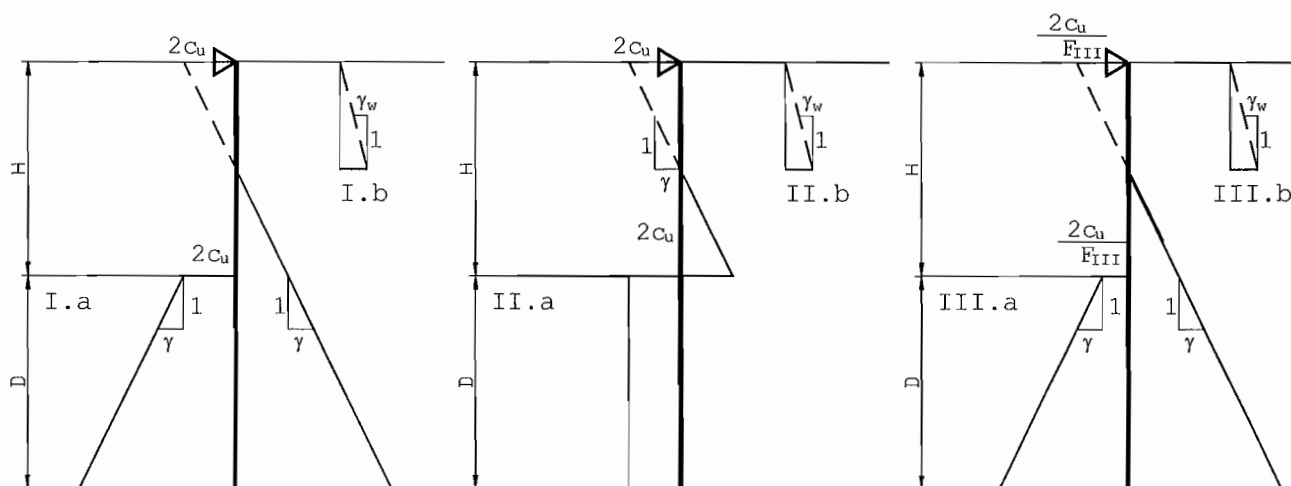


Fig. 1 - Azioni agenti sulla paratia considerate nei diversi approcci alla definizione del coefficiente di sicurezza, in assenza di adesione terreno-parete.

qualsiasi struttura geotecnica, e dunque anche di una paratia, utilizzando coefficienti di sicurezza parziali. Definisce, poi, tre diversi Casi (A, B, C) cui corrispondono diverse combinazioni di coefficienti parziali. In particolare per le opere di sostegno la condizione più critica è rappresentata dal Caso C (si veda ad esempio quanto riportato in Aversa [1996]), nel quale si definiscono delle caratteristiche di resistenza di progetto, ottenute dividendo i valori caratteristici per un coefficiente parziale di sicurezza (la coesione non drenata si divide per 1,4) e non si modificano le azioni permanenti (rappresentate nel caso in esame dal peso proprio del terreno). Per tale coefficiente, che nella norma europea viene indicato con γ , nel seguito viene utilizzato

il simbolo F_{III} . In questo caso la profondità minima di infissione della paratia può essere determinata uguagliando i momenti della spinta passiva e di quella attiva calcolati con riferimento ai valori ridotti dei parametri di resistenza di progetto. Anche in questo caso è possibile considerare assente o presente l'acqua nelle fratture di trazione (III.a e III.b).

Il caso C dell'EN(V) 1997/1 corrisponde al *Design Approach 1* - Combinazione 2 della versione definitiva dell'Eurocodice 7 [EN 1997-1].

Il *Design Approach 2* della versione definitiva dell'Eurocodice può essere invece assimilato all'approccio I, in quanto impone due coefficienti parziali che operano direttamente sulle spinte, incrementando la spinta attiva (con un coefficiente parziale

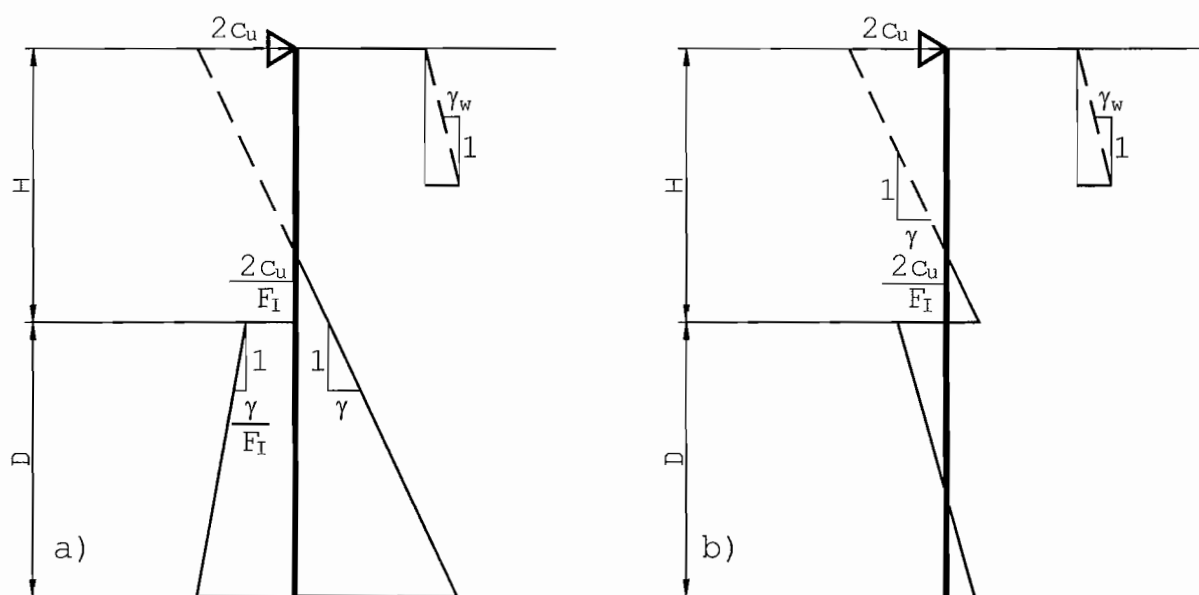


Fig. 2 - Interpretazione del coefficiente di sicurezza definito nell'approccio I come reciproco del grado di mobilitazione della spinta passiva.

pari a 1,4) e riducendo quella passiva (con un coefficiente parziale pari, anch'esso, a 1,4). Poiché i momenti delle spinte sono ovviamente proporzionali a queste ultime, tale approccio conduce ad un coefficiente globale di sicurezza pari a 1,96.

Gli scriventi hanno effettuato delle semplici verifiche allo stato limite ultimo delle paratie prese in considerazione dagli Autori, utilizzando, negli approcci I e II un coefficiente globale di sicurezza pari a 1,4. Si tratta di un valore del coefficiente di sicurezza non particolarmente elevato, idoneo tipicamente per strutture provvisorie. Lo stesso valore è stato utilizzato come coefficiente parziale nell'approccio III.

Nel calcolo delle spinte attive e passive si sono presi in considerazione due casi estremi:

- adesione tra parete e terreno, c_w , nulla; si sono quindi utilizzate le formule di Rankine;
- adesione c_w tra terreno e parete pari alla resistenza non drenata; le tensioni attive e passive, in questo caso, risultano pari a:

$$\sigma_a = \sigma_v - 2 \cdot c_u \cdot \sqrt{1 + \frac{c_w}{c_u}} \quad \sigma_p = \sigma_v + 2 \cdot c_u \cdot \sqrt{1 + \frac{c_w}{c_u}} \quad (1)$$

Nelle Figg. 3.a, 3.b e 3.c sono rappresentate per ciascuno degli approcci sopra descritti le relazioni tra infissione adimensionalizzata D/H e coesione non drenata adimensionalizzata $c_w/(\gamma H)$ per un valore del coefficiente di sicurezza di 1,4 sia nel caso di assenza di acqua nelle fratture (curve continue) sia nel caso di presenza di acqua (curve tratteggiate). Le curve ottenute dipendono evidentemente dal modo in cui viene definito il coefficiente di sicurezza. In particolare va osservato che l'approccio I al crescere del rapporto D/H da luogo a dei risultati insoddisfacenti: la coesione non drenata necessaria alla stabilità della paratia con un assegnato coefficiente di sicurezza non decresce monotonicamente con D/H ma presenta un punto di minimo. Tale anomalia è dovuta al fatto che il coefficiente di sicurezza riduce il gradiente della spinta passiva a valle della paratia e pertanto il diagramma netto al di sotto del piano di scavo per D/H sufficientemente

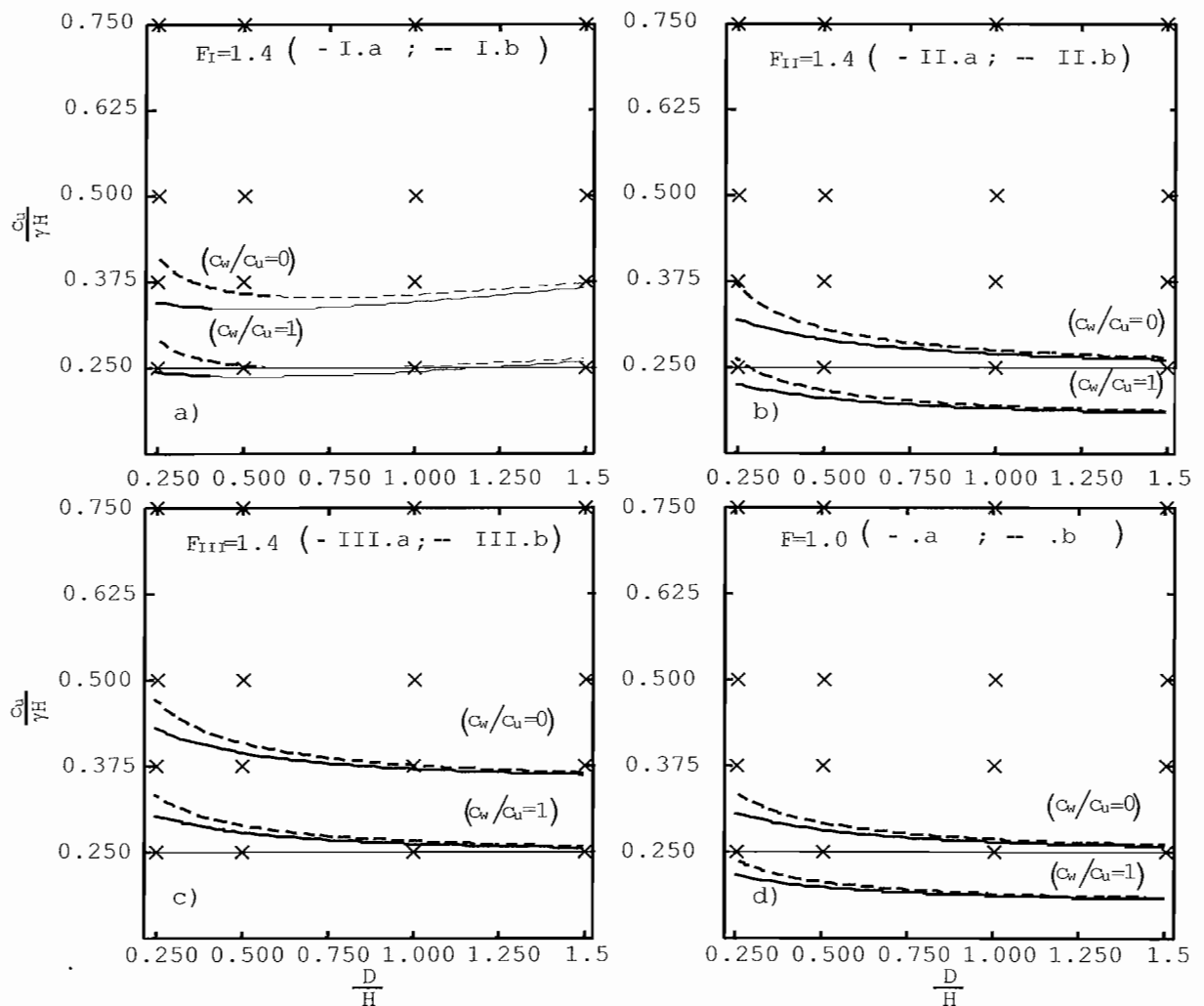


Fig. 3 - Relazioni tra infissione e coesione non drenata adimensionalizzate (nell'ipotesi $\gamma = 2\gamma_w$): a) approccio I con $F_I = 1,4$; b) approccio II con $F_{II} = 1,4$; c) approccio III con $F_{III} = 1,4$; d) $F = F_I = F_{II} = F_{III} = 1,0$.

grande diviene intrecciato (cfr. Fig. 2.b). Si è ritenuto pertanto preferibile escludere il ramo crescente delle curve ottenute con questo approccio.

Gli Autori hanno considerato una serie di casi caratterizzati da valori dell'infissione adimensionalizzata D/H compresi tra 0,25 e 1,5 e da valori della coesione non drenata adimensionalizzata $c_u/(\gamma H)$ compresi tra 0,25 e 0,75 che sono rappresentati in Fig. 3 con il simbolo \times .

L'esame dei diagrammi di Fig. 3.a, 3.b e 3.c indica che, indipendentemente dall'approccio utilizzato nella definizione del coefficiente di sicurezza della paratia, molte delle soluzioni prese in esame nell'articolo non soddisfano quanto previsto da norme e raccomandazioni nei riguardi della verifica a stato limite ultimo, anche qualora si adotti un valore del coefficiente di sicurezza non particolarmente elevato ($= 1,4$).

In Fig. 3.d nel piano $\{D/H, c_u/(\gamma H)\}$ sono riportate le curve che corrispondono ad un valore unitario del coefficiente di sicurezza; ovviamente, queste curve non dipendono dalla definizione adottata per quest'ultimo (approcci I, II e III) ma sono influenzate dalla presenza (curve tratteggiate) o meno (curve continue) dell'acqua nelle fratture di trazione e dal valore dell'adesione terra-parete. Da questo diagramma risulta che a tutti i casi analizzati da TAMAGNINI *et al.* corrisponde un coefficiente di sicurezza maggiore dell'unità; tuttavia tale conclusione è valida solo nel caso di perfetta adesione tra terreno e parete (i.e. $c_w/c_u=1$) mentre, nel caso di adesione nulla, ad una parte dei casi considerati corri-

sponde un coefficiente di sicurezza minore dell'unità.

In Fig. 4 sono rappresentati gli andamenti del coefficiente di sicurezza F_{III} al variare dell'infissione adimensionalizzata nelle due ipotesi limite di adesione perfetta ed adesione nulla con riferimento al valore minimo di coesione non drenata adimensionalizzata considerato dagli Autori.

Gli Autori hanno potuto condurre le analisi numeriche relative a casi caratterizzati da coefficienti di sicurezza così ridotti grazie alle seguenti ipotesi:

- perfetta adesione tra terreno e parete;
- nessuna limitazione per la resistenza a trazione del terreno e dell'interfaccia terreno-parete se non quella derivante dal criterio di Tresca (che comporta una resistenza a trazione semplice pari a $-2c_u$);
- assenza di fratture di trazione a monte della paratia e conseguentemente della spinta idraulica dovuta all'eventuale presenza di acqua in queste ultime.

A parere degli scriventi queste ipotesi sono decisamente poco cautelative. Se infatti è accettabile considerare non nulla la resistenza a trazione di un terreno a grana fina, appare poco realistico adottare un involuppo di resistenza del materiale che nel piano $\{\sigma, \tau\}$ non presenta limitazioni nella direzione delle tensioni di trazione. Analogamente sembra discutibile adottare una resistenza a trazione non nulla per l'interfaccia terreno-parete nonché ipotizzare una adesione perfetta tra terreno e parete.

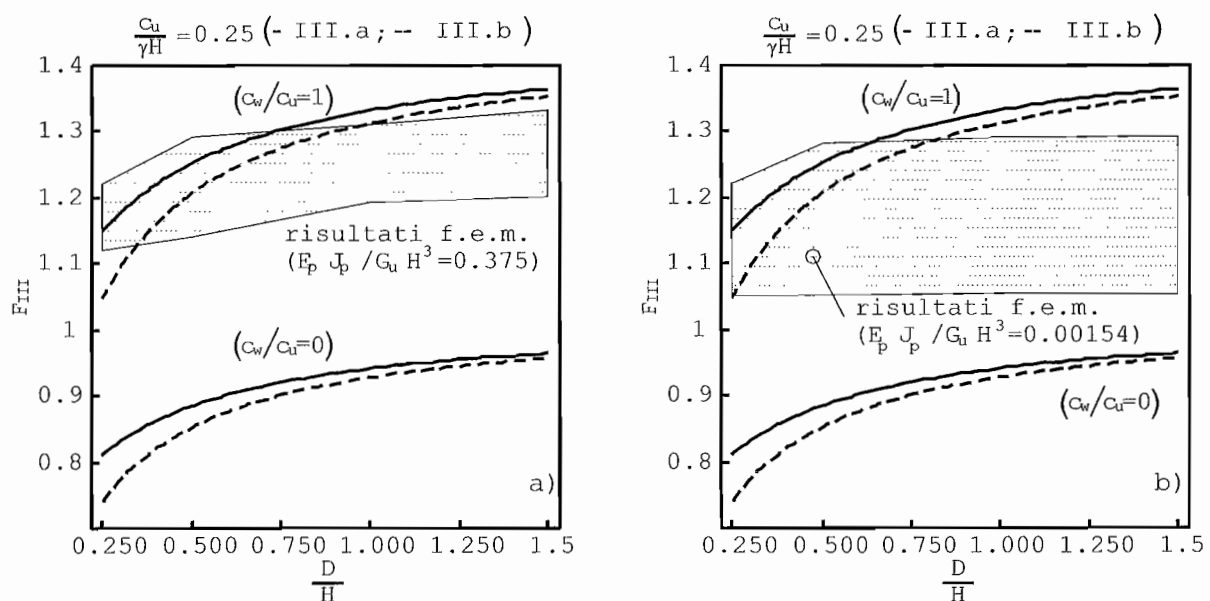


Fig. 4 - Coefficiente di sicurezza F_{III} in funzione dell'infissione adimensionalizzata per $c_u/(\gamma H) = 0,25$: confronto con i risultati ottenuti con la modellazione numerica.

3. Verifiche allo stato limite ultimo con modellazione numerica agli elementi finiti

Va osservato che è realistico supporre che la modellazione adottata dagli Autori possa dare luogo a valori del coefficiente di sicurezza alquanto diversi da quelli dedotti con gli approcci sopra descritti. Il modello adottato tiene infatti conto dell'effetto arco che si può sviluppare alle spalle della paratia al di sopra del piano di scavo. Tuttavia, come detto, gli Autori non forniscono alcuna indicazione sulle condizioni di stato limite ultimo delle paratie analizzate; pertanto gli scriventi per approfondire questo aspetto hanno condotto a loro volta una serie di analisi numeriche analoghe a quelle descritte nell'articolo ma finalizzate anche alla determinazione delle condizioni di sicurezza.

È stata studiata una paratia con un'altezza di scavo H pari ad 8 m nei casi corrispondenti ai valori dei parametri adimensionali suggeriti da TAMAGNINI *et al.* riportati in Tab. I.

Le analisi sono state condotte con un programma ad elementi finiti (Plaxis®) adottando per il terreno lo stesso modello costitutivo utilizzato dagli Autori. L'interazione tra parete e terreno è stata simulata con l'ausilio di opportuni elementi di interfaccia. Le analisi sono state condotte sia adottando le stesse ipotesi degli Autori riguardo la resistenza a trazione del terreno sia supponendo nulla la resistenza a trazione (*tension cut-off*) dell'interfaccia. Il coefficiente di sicurezza per ciascun caso è stato valutato con una procedura (*Phi/c reduction*) implementata nel codice di calcolo impiegato: vengono ridotte progressivamente le caratteristiche di resistenza del terreno fino a che non si sviluppa un meccanismo di rottura nel modello; il valore del fattore di riduzione della resistenza a taglio corrispondente all'innesco della rottura viene assunto come valore del coefficiente di sicurezza. Il coefficiente di sicurezza è dunque definito in modo del tutto analogo a quanto visto nell'approccio III descritto in precedenza.

L'insieme dei risultati ottenuti con le analisi f.e.m. sono riportati nei due diagrammi di Fig. 4 e confrontati con i valori del coefficiente di sicurezza determinati con l'approccio III.

Questi risultati mostrano che il valore del coefficiente di sicurezza è in tutti i casi esaminati inferiore

Tab. I – Valori dei parametri adimensionali considerati nelle simulazioni numeriche.

D/H	$c_u/\gamma H$	E_u/c_u	$E_p J_p / G_u H^3$	c_w/c_u
0,25	0,25	800	0,37500	0,025
0,50				0,250
1,00				0,500
1,50				1,000

ad 1,4 ed in alcuni casi è addirittura prossimo all'unità. Si nota in particolare che il limite superiore dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche, corrispondente alle ipotesi adottate dagli Autori, è in buon accordo con i risultati dei calcoli eseguiti con l'approccio III. Il limite inferiore invece, ottenuto per il minimo valore dell'adesione e per interfaccia non resistente a trazione, è comunque più elevato di quello determinato con l'approccio III per adesione nulla. Tale risultato è probabilmente dovuto al predetto effetto arco che contribuisce a ridistribuire le spinte di monte in prossimità della rottura; d'altra parte tale effetto è condizionato dalla rigidità relativa della paratia come si può notare dal confronto dei risultati f.e.m. riportati nei due diagrammi di Fig. 4 corrispondenti alle due rigidità relative considerate.

Va infine osservato che anche l'ipotesi introdotta dagli Autori di vincolo in testa infinitamente rigido è poco cautelativa giacché la cedevolezza del vincolo può annullare il predetto effetto arco con conseguente aggravio delle spinte che il terreno a monte esercita a rottura sulla parete.

4. Conclusioni

L'articolo di TAMAGNINI *et al.* presenta un interessante studio parametrico sul comportamento non drenato in esercizio di paratie vincolate in testa ed immerse in un terreno omogeneo a grana fina. Le osservazioni poste dagli scriventi riguardano, invece, le condizioni di stato limite ultimo e limitano l'applicabilità dello studio a quei casi per i quali è assicurato un adeguato margine di sicurezza del complesso paratia-terreno.

Gli scriventi hanno, anche, analizzato alcuni dei casi proposti dagli Autori allo scopo di verificare l'influenza di alcune ipotesi poste alla base dello studio. In particolare, si sono concentrati sull'ipotesi di terreno ed interfaccia terreno-parete resistenti a trazione. Le verifiche condotte, non riportate nella presente discussione, hanno mostrato che tale ipotesi non sembra avere particolare rilievo nella previsione del comportamento della particolare tipologia di opera presa in considerazione, probabilmente a causa della rigidità infinita del vincolo posto in testa alla paratia.

Diversamente, nel caso di vincolo cedevole, ed ancor più nel caso di paratia libera, l'adozione o meno dell'ipotesi di terreno resistente a trazione potrebbe condurre a risultati sostanzialmente diversi tra loro. Nel caso in cui gli Autori vogliano estendere lo studio anche a queste condizioni di vincolo, sarebbe auspicabile un'approfondita riflessione sulla validità e sulle conseguenze di tale ipotesi.

Gli scriventi auspicano che le osservazioni proposte possano essere di ulteriore stimolo per gli Au-

tori per sviluppare la loro ricerca che appare di estremo interesse sia scientifico sia applicativo.

Bibliografia

AVERSA S. (1996) – *Eurocodice 7: opere di sostegno*. *RIG*, No. 2-3/96, pp. 66-91.

DM 11/03/88 – *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce la stabilità dei pendii naturali*

e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazioni. Decreto Ministero dei Lavori Pubblici, 11 marzo 1988.

EN(V) 1997/1 – *Eurocode 7 Part 1. Geotechnical design*. CEN (Disponibile nella traduzione italiana a cura dell'UNI).

EN 1997/1 – *Eurocode 7. Part 1. Geotechnical Design*. CEN.