

Comportamento di muri di sostegno a gravità sottoposti all'azione sismica

RICHARDS R., ELMS D. - *Seismic behaviour of gravity retaining walls*. Proc. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT4, April 1979.

Lo studio del comportamento dei muri di sostegno sollecitati da azioni sismiche è ancora poco sviluppato. Ne derivano notevoli incertezze nella progettazione di tali opere, anche se la necessità di trovare dei criteri validi per il dimensionamento è molto sentita, fra l'altro, per il notevole onere economico, che deriva dalla frequente presenza dei muri di sostegno in molte opere di ingegneria civile.

Fra le difficoltà principali ha un peso non indifferente quella di individuare un chiaro modello matematico con il quale si possa interpretare il fenomeno in maniera aderente alle realtà, senza eccessive complicazioni di carattere matematico.

Come è noto, infatti, per semplificare il problema si ricorre ad analisi pseudostatiche, che forniscono metodologie applicabili con facilità, anche se alquanto discoste dalla realtà fisica.

Seppure nei limiti di questi ultimi metodi, l'articolo di Richards ed Elms apporta un certo contributo in questo campo, mostrando l'influenza esercitata dall'inerzia del muro sulle condizioni di equilibrio del muro stesso.

I fondamenti della teoria pseudostatica per il calcolo della spinta del terrapieno in zona sismica sono stati introdotti da MONONOBE [1929] e OKABE [1926] e sono stati successivamente sviluppati da altri autori. Non si ritiene qui opportuno richiamare questi studi, dei quali è stata effettuata una sintesi da SANTUCCI DE MAGISTRIS e VIGGIANI [1973], se non per quegli aspetti, che si ritengono essenziali per porre il problema. Alla citata sintesi si rimandano i lettori per ulteriori chiarimenti e notizie sull'argomento.

La teoria di Mononobe-Okabe conduce, come è noto, alla seguente espressione della spinta attiva agente sul muro:

$$E_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) k_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) \frac{\cos^2 (\varphi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos (\delta + \beta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin (\varphi + \delta) \sin (\varphi - \theta - i)}{\cos (\delta + \beta + \theta) \cos (i - \beta)}} \right]^2} \quad (1)$$

dove

k_h = coefficiente di accelerazione orizzontale;

k_v = coefficiente di accelerazione verticale;

$$\theta = \arctg [k_h / (1 - k_v)].$$

Il significato dei rimanenti simboli è riportato in fig. 1.

Dall'espressione (1) risulta che, per ottenere soluzioni reali, deve essere verificata la condizione:

$$\varphi - \theta - i > 0 \quad (2)$$

ovvero:

$$k_h \leq (1 - k_v) \operatorname{tg} (\varphi - i) \quad (2a)$$

Dall'espressione (2a) deriva che, per determinate caratteristiche geometriche e meccaniche del terrapieno, esiste un valore limite dell'accelerazione orizzontale $k_h^* = (1 - k_v) \operatorname{tg} (\varphi - i)$, che non deve essere superato, affinché l'equilibrio sia rispettato.

Dalla documentazione sperimentale disponibile, peraltro non molto abbondante nel campo delle opere di soste-

gno a gravità, si nota che gli effetti reali sulle strutture sono più gravosi di quanto si possa prevedere con la teoria di Mononobe-Okabe. Tale deficienza è, probabilmente, da attribuire all'effetto della forza di inerzia del muro, che viene solitamente trascurata.

Gli Autori della memoria, che si recensisce, assumono le stesse ipotesi di Mononobe-Okabe; considerano, cioè, un muro del tipo a gravità, posto a sostegno di un terrapieno privo di coesione e in assenza di pressioni neutre, ed effettuano lo studio in condizioni di equilibrio limite.

Nell'ipotesi che il muro sia sottoposto, oltre che alla spinta del terrapieno calcolata con l'espressione (1), alla forza peso ed alle forze di inerzia, orizzontale e verticale, gli AA. ricercano le condizioni di equilibrio allo scorrimento, accennando, pur senza dar seguito al suggerimento, alla necessità di condurre la stessa verifica anche per il ribaltamento. Con riferimento alla fig. 1, posto:

$$F = N \operatorname{tg} \varphi_b \quad (3)$$

$$W_w = \frac{[\cos (\delta + \beta) - \sin (\delta + \beta) \operatorname{tg} \varphi_b]}{(1 - k_v) (\operatorname{tg} \varphi_b - \operatorname{tg} \vartheta)} \cdot \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) k_{AE} = C_{IE} E_{AE} \quad (4)$$

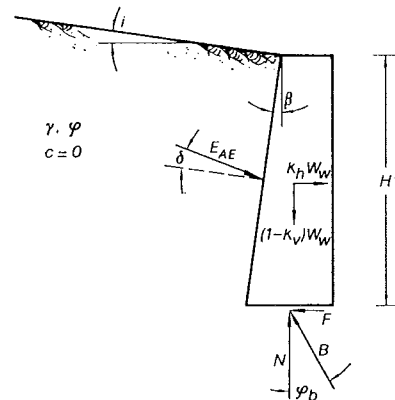


Fig. 1. - Forze agenti su un muro di sostegno a gravità in presenza di azioni sismiche.

dove φ_b è l'angolo di attrito fra la base del muro ed il terreno, dall'equazione di equilibrio alla traslazione, si ottiene il peso del muro necessario all'equilibrio in presenza delle sopracitate forze:

dove il parametro C_{IE} è denominato fattore di inerzia del muro.

Con l'ausilio di uno studio parametrico, gli AA. fanno notare come quest'ultimo fattore vari notevolmente al variare dell'angolo di attrito interno del materiale del terrapieno e del coefficiente di attrito δ fra terra e muro; su tale fattore, invece, influisce poco il coefficiente di accelerazione verticale k_v , almeno per valori non elevati di k_h .

Per valutare l'influenza dell'inerzia del muro, gli AA. introducono i coefficienti

$$F_T = \frac{k_{AE}(1 - k_v)}{k_a} \quad (5)$$

relativo alla spinta della terra, e

$$F_I = \frac{C_{IE}}{C_I} \quad (6)$$

relativo all'inerzia del muro. Nelle (5) e (6) k_a e C_I sono i coefficienti, analoghi a k_{AE} e C_{IE} , che si otterrebbero calcolando, in condizione statiche, rispettivamente, la spinta della terra ed il peso del muro necessario all'equilibrio.

Il fattore di sicurezza del muro è espresso mediante il rapporto:

$$F_W = \frac{W_W}{W} = F_T F_I \quad (7)$$

nella quale W è il peso del muro sufficiente a garantire l'equilibrio in condizioni statiche.

Il diagramma di fig. 2 mostra l'andamento dei coefficienti F_T , F_I e F_W al variare di k_h . Da esso si rileva che F_T e F_I sono dello stesso ordine di grandezza; ci si convince facilmente, pertanto, che, se si trascura uno dei due

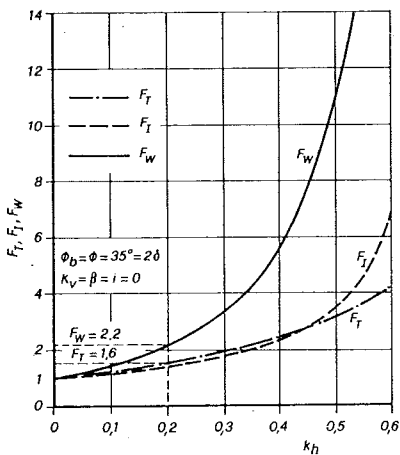


Fig. 2. - Andamento dei parametri F_T , F_I e F_W in funzione del coefficiente di accelerazione orizzontale k_h .

fattori, si commette un errore notevole nel dimensionamento del muro. A titolo di esempio, si osservi che, per un valore del coefficiente di accelerazione orizzontale $k_h = 0,2$, il fattore di sicurezza F_W pari a 2,2 nel caso in cui si considera l'influenza dell'inerzia del muro, scende a 1,6 se si trascura tale effetto.

Dalla (4) si nota che, se $\text{tg } \phi_b = \text{tg } \theta$,

il peso del muro necessario all'equilibrio diventa infinito. Ne deriva, quindi, un valore critico del coefficiente di accelerazione orizzontale k_h^* dato da:

$$k_h^* = (1 - k_v) \text{tg } \phi_b \quad (8)$$

che non dipende dalla geometria del sistema.

Questo valore k_h^* corrisponde alla

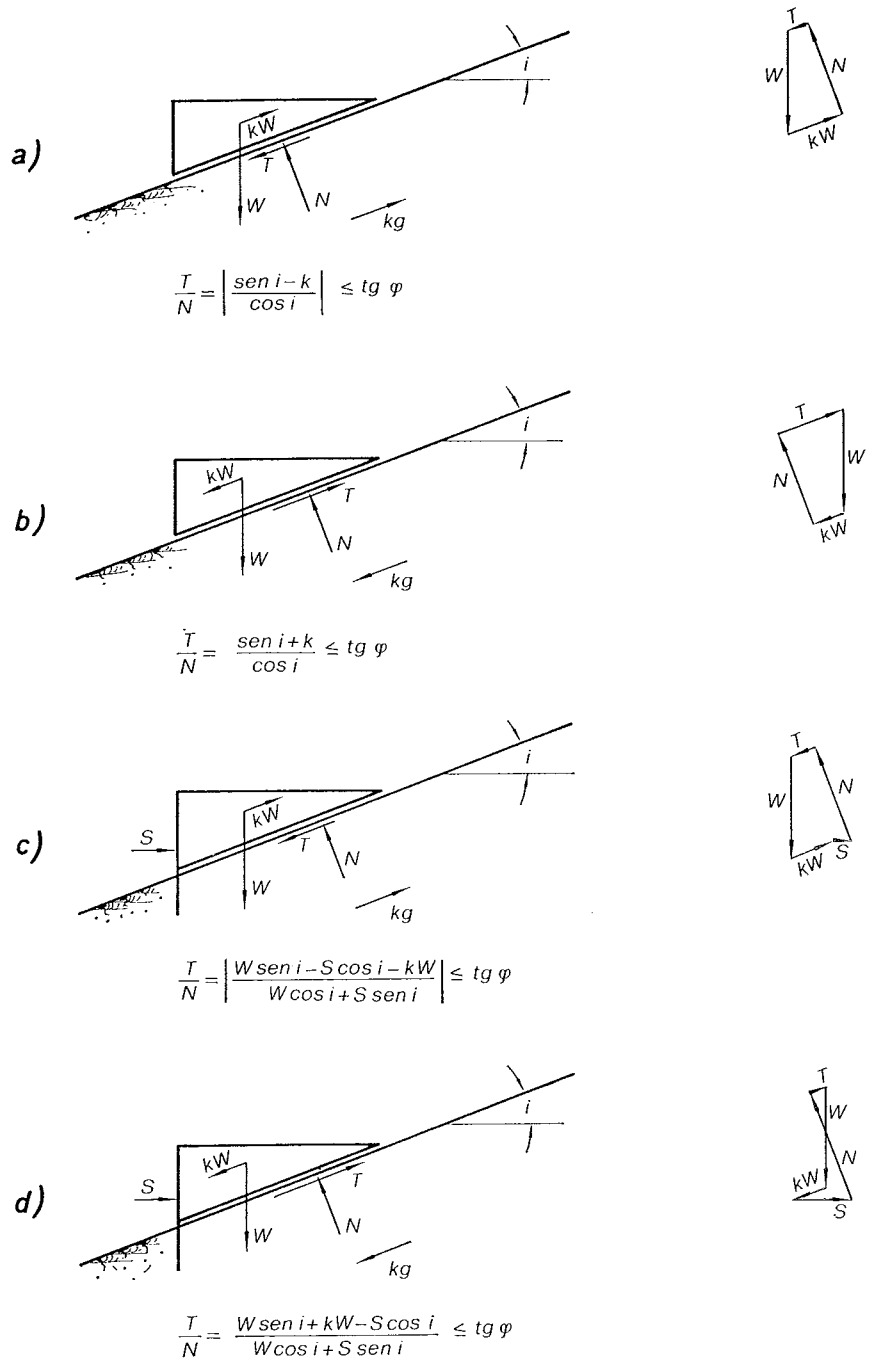


Fig. 3 - Equilibrio di un grave su un piano inclinato, in diverse condizioni di sollecitazione e di vincolo:

- a) grave libero, sollecitato da una forza kW diretta verso l'alto;
- b) grave libero, sollecitato da una forza kW diretta verso il basso;
- c) grave trattenuto da un setto rigido, sollecitato da una forza kW diretta verso l'alto;
- d) grave trattenuto da un setto rigido, sollecitato da una forza kW diretta verso il basso.

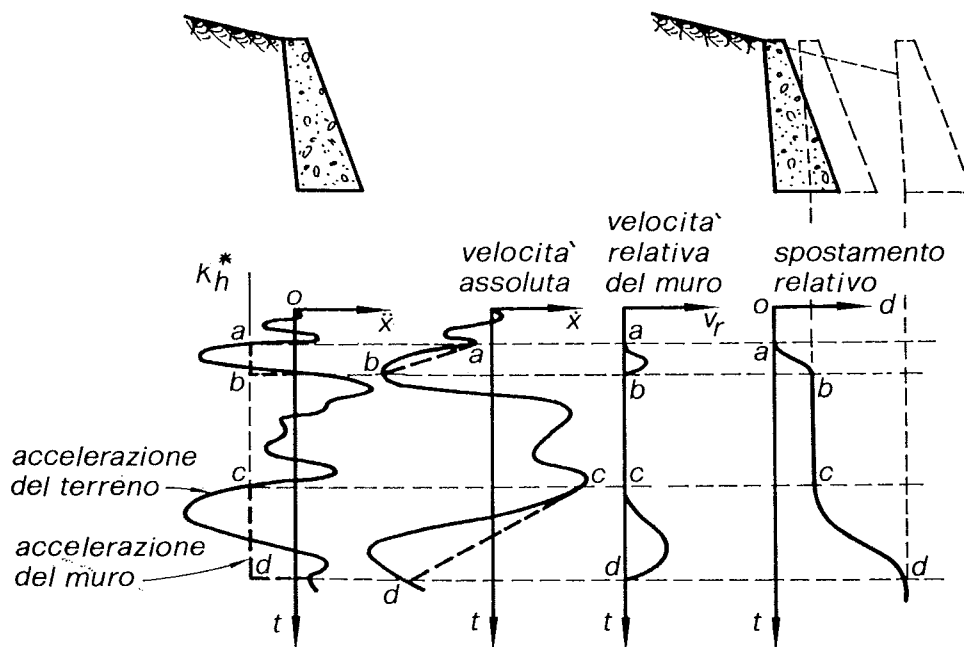


Fig. 4. - Rottura per scorrimento del muro.

condizione limite di equilibrio del muro nel senso che, se $k_h > k_h^*$, non è più possibile trovare alcuna condizione di equilibrio alla traslazione. Dal confronto fra la condizione (2a) e la (8), si nota che quest'ultima risulta più restrittiva nel caso in cui $\varphi_b \leq \varphi - i$; condizione quest'ultima che si può verificare frequentemente. Si deve, inoltre, tenere conto che già per valori di φ_b prossimi a quello limite ($\varphi_b = 0$) il peso del muro diventa notevole, con i relativi svantaggi economici.

Per limitare le dimensioni delle strutture di sostegno, gli AA. suggeriscono di fissare, in fase di progetto, un valore limite dello spostamento del muro. Tale considerazione può trovare una giustificazione, se si osserva [SANTUCCI-DE MAGISTRIS, VIGGIANI, 1973] che un grave su un piano inclinato vibrante (fig. 3) si muoverà solidalmente al piano, finché la resistenza di attrito fra corpo e piano inclinato sia superiore alla forza, che agisce sul grave nella direzione del movimento. Questa forza è, ovviamente, più elevata, quando l'accelerazione è diretta verso il basso (fig. 3a, b).

Analogo ragionamento si può sviluppare per il cuneo di terra retrostante ad un muro di sostegno (fig. 3c, d). Esso, infatti, esercita sul muro, in condizioni sismiche, una forza S , che varia continuamente in modulo. A secondo se il muro tende a muoversi verso il terrapieno o verso l'esterno, si verificano, rispettivamente, condizioni di spinta passiva o attiva. Il muro rimane solidale col terrapieno, finché l'accelerazione del terreno è compatibile con il valore di accelerazione limite del muro, cioè finché $k_h \leq k_h^*$.

Bisogna notare che, in condizioni di

spinta passiva i valori di k_h^* sono molto elevati e non si verificano spostamenti. Nel caso di spinta attiva, come è mostrato in fig. 4, non appena l'accelerazione del terrapieno supera il valore k_h^* (punto a), il muro si muoverà con accelerazione costante, rispetto al terrapieno, finché la sua velocità non uguaglia quella del terreno (punto b). La somma degli spostamenti relativi, che si verificano ogniqualvolta l'accelerazione del terreno supera quella limite, fornisce lo spostamento totale dell'opera di sostegno.

Questa analisi del fenomeno indica che non si possono verificare spostamenti indefiniti del muro e che le condizioni di equilibrio più precarie si raggiungono quando il terremoto presenta valori di picco delle accelerazioni molto elevati e frequenti.

Si deve, però, sottolineare che in questo studio gli AA. ipotizzano che il muro ed il terrapieno siano sempre in concordanza di fase; mentre, se si tiene conto che le frequenze di vibrazione dei due elementi sono, in genere, differenti, si intuisce che in realtà la struttura ed il terrapieno possono anche trovarsi in opposizione di fase ed il problema si complica ulteriormente.

Nelle applicazioni pratiche, per determinare i valori del coefficiente di accelerazione k_h in funzione dello spostamento massimo da consentire al muro, gli AA. suggeriscono di basarsi su uno studio condotto da FRANKLIN e CHANG [1977].

Questi autori hanno analizzato diversi accelerogrammi e, traendo spunto dallo studio di NEWMARK [1965], hanno elaborato i risultati in un grafico che riporta lo spostamento massimo δ_{max} in funzione del rapporto N/A , dove N , che

coincide con k_h^* , è il coefficiente limite di accelerazione ed A è il valore massimo di accelerazione verificatosi. Gli AA. mostrano che, per valori non elevati dello spostamento, i dati sperimentali si possono interpolare con una curva di equazione

$$d = 0.087 \frac{V^2}{A g} \left(\frac{N}{A} \right)^{-4} \quad (9)$$

nella quale V è la velocità massima espressa in in/sec e d è lo spostamento del muro espresso in inches. Per la progettazione del muro gli AA. utilizzano l'espressione equivalente

$$k_h = A_a \left(\frac{0,2 A_v^2}{A_a d} \right)^{1/4} \quad (10)$$

nella quale A_a e A_v sono rispettivamente i valori di picco dell'accelerazione e della velocità, che, con riferimento agli USA, sono riportati nelle norme ATC (1978), recentemente segnalate ai lettori di questa rivista in una recensione curata dal Prof. G. Aprile.

Per il dimensionamento del muro è sufficiente imporre un limite superiore allo spostamento, scegliere opportunamente i valori da attribuire ad A_a ed A_v e, quindi, determinare il valore di k_h da utilizzare per il calcolo della spinta e, successivamente, del peso di muro necessario per l'equilibrio.

Le dimensioni del muro si ottengono fissando un opportuno valore del coefficiente di sicurezza.

Può risultare interessante confrontare le prescrizioni delle norme sismiche italiane con i risultati che derivano dall'articolo degli Autori.

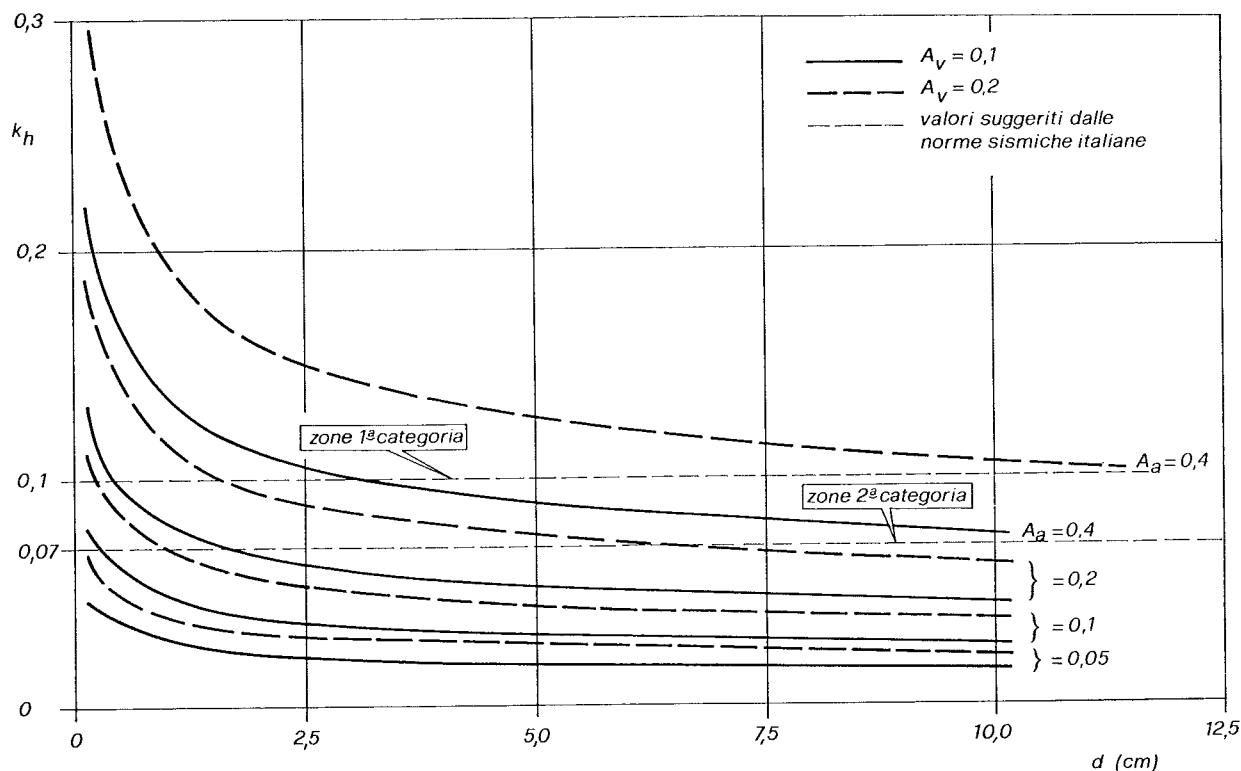


Fig. 5. - Andamento del coefficiente di accelerazione orizzontale k_h in funzione dello spostamento d del muro, per diversi valori dei coefficienti A_a e A_v .

Nelle norme italiane si considera l'effetto d'inerzia del muro, ma non si tiene conto di possibili spostamenti da imporre al muro per limitarne le dimensioni. I valori di k_h che derivano dall'espressione (10), attribuendo al coefficiente di picco della velocità i valori 0,1 e 0,2, sono stati paragonati, nella fig. 5, con i valori di k_h suggeriti dalle norme italiane.

Dai grafici si nota che l'influenza dello spostamento d sui valori del coefficiente k_h è tanto più notevole quanto più elevati sono i valori di A_a e A_v .

Considerare, quindi, dei valori prefissati del coefficiente di accelerazione orizzontale k_h può condurre, in taluni casi, ad un eccessivo dimensionamento, ed in altri, a condizioni insufficienti di sicurezza. Sussiste, comunque, la difficoltà di determinare valori di picco, di accelerazione e di velocità, significativi per le regioni italiane.

(Lucia Tamburello)

BIBLIOGRAFIA

- FRANKLIN A. G., CHANG F. K. (1977) - *Earthquake Resistance of Earth and Rockfill Dams*. S 71-17 Soils and Pavements Laboratory. U.S. Army Eng. Waterways Exp. Stat., Vicksburg, Miss.
- MONONOBE N. (1929) - *Earthquake-proof*

Construction of Masonry Dams. Proc. World Eng. Conf., vol. 9.

NEWMARK N. M. (1965) - *Effects of Earthquakes on Dams and Embankments*. Geotechnique, vol. 15, N. 2.

OKABE S. (1926) - *General Theory of Earth Pressure*. Journ. Jap. Soc. Civil Eng., vol. 12, N. 1.

SANTUCCI DE MAGISTRIS E., VIGGIANI C. (1977) - *Azioni dinamiche sulle opere di sostegno*. Strade e Traffico, n. 228.

TENTATIVE PROVISIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SEISMIC REGULATION FOR BUILDINGS (1978) - Publ. ATC 3-06, Applied Technology Council, Palo Alto, California.

Criteria per la caratterizzazione geotecnica di grandi aree

GRANT K., FINLAYSON A. A. - *The Assessment and Evaluation of Geotechnical Resources in Urban or Regional Environments*. Eng. Geology, Sept. 1978.

Con l'avvento della programmazione si è sentita la necessità di non limitare gli studi geotecnici ad aree di modesta estensione su cui si dovranno realizzare singole opere di ingegneria, ma di estendere la caratterizzazione geotecnica a territori più ampi. Tale esigenza è stata avvertita sia nei paesi più progrediti, per una migliore ed efficace piani-

ficazione territoriale, sia nei paesi tecnologicamente più arretrati, che sono oggi in fase di sviluppo. In questi ultimi il problema si presenta con maggiore gravità ed urgenza per la insufficiente conoscenza generale dei terreni e per la mancanza di dati morfologici, geologici e geotecnici su tutto il territorio, con esclusione, a volte, dei soli centri abitati. Ciò genera, ovviamente, difficoltà notevoli nella progettazione e realizzazione di opere di ingegneria, rallentando lo sviluppo economico.

L'indispensabile studio del territorio si può in questi casi impostare in termini più ampi, caratterizzando aree anche di notevole estensione con la raccolta graduale di dati in modo da costituire un insieme organico di informazioni. L'impostazione di un siffatto studio richiede un'accurata programmazione, ma anche un'appropriata metodologia per raccogliere, ordinare ed elaborare i dati medesimi.

Il problema di classificare aree estese era già stato affrontato da BECKETT e WEBSTER [1965] per scopi di ingegneria militare, da CHRISTIAN e STEWART [1964] con il fine di individuare terreni potenzialmente sfruttabili per l'agricoltura e la zootecnia e dallo stesso GRANT [1968] per fini ingegneristici. Prendendo spunto o approfondendo tali studi gli AA. hanno elaborato una metodologia per la classificazione dei terreni.

Il metodo consiste nel raggruppare in classi aree che presentano analogie