

Un'analisi probabilistica degli spostamenti permanenti indotti nei pendii da carichi sismici

Enrico Conte¹ Giampiero Rizzo²

Sommario

Viene proposta una valutazione in termini probabilistici dello spostamento permanente indotto nei pendii da carichi sismici. Per il calcolo dello spostamento ci si è avvalsi del ben noto modello di scorrimento di Newmark, utilizzando accelerogrammi registrati in Italia in occasione dei più importanti terremoti verificatisi negli ultimi anni. Sulla base dei dati accelerometrici suddetti, sono state ricavate alcune semplici espressioni che consentono di determinare, in funzione del rapporto di accelerazione K_c/K_m , la probabilità corrispondente ad un assegnato spostamento permanente ed i valori estremi dell'intervallo di variazione di quest'ultimo.

1. Introduzione

Per la valutazione degli spostamenti permanenti indotti nei pendii dai carichi sismici, il modello del blocco di scorrimento proposto originariamente da NEWMARK [1965] è a tutt'oggi quello maggiormente utilizzato. Esso, infatti, riesce a cogliere gli aspetti essenziali della risposta dinamica del pendio [GOODMAN e SEED, 1966; WILSON e KEEFER, 1983; D'ELIA, 1992] e, per di più, non presenta particolari difficoltà di calcolo.

Come è noto, il suddetto approccio modella la parte di pendio che si instabilizza come un corpo rigido poggiate su un piano inclinato, lungo il quale la resistenza del materiale obbedisce al criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Fondamentalmente, sono due i fattori che influenzano l'entità dello spostamento permanente: la storia nel tempo dell'accelerazione al suolo (input sismico) ed il coefficiente di accelerazione critica K_c . Quest'ultimo è funzione della geometria del pendio, della direzione delle forze sismiche e della resistenza disponibile lungo la superficie di scorrimento. Il coefficiente K_c può essere determinato, direttamente, mediante un'analisi statica che, in genere, richiede l'applicazione del metodo dell'equilibrio limite [SARMA, 1973] o dell'analisi limite [CHANG *et al.*, 1984]. Con i metodi di stabilità comunemente usati occorre, invece, fissare più valori di tentativo del coefficiente sismico fino rendere unitario il fattore di stabilità.

Di solito, nelle applicazioni, K_c viene assunto costante nel tempo benché esso possa subire significative variazioni, soprattutto per via degli effetti

indotti dai carichi dinamici sulla resistenza del terreno (incrementi di sovrappressione neutra, decadimento delle proprietà meccaniche, velocità di applicazione dei carichi, etc.) [CREPELLANI *et al.*, 1992]. Una versione modificata del modello di Newmark, in grado di portare in conto nell'analisi la perdita di resistenza all'interfaccia blocco-piano inclinato, con il progredire dello spostamento, è stata di recente proposta da Cividini *et al.* [1991]. Per quanto riguarda la direzione delle forze sismiche, quasi sempre si assume che queste agiscano orizzontalmente, poiché l'influenza della componente verticale del moto sui valori dello spostamento permanente può ritenersi trascurabile [FACCIOLI, 1987].

In pratica, quindi, le maggiori difficoltà che si incontrano nell'applicazione del modello di Newmark sono legate alla scelta dell'input sismico. Le caratteristiche di quest'ultimo (ampiezza, durata e contenuto in frequenza) sono, infatti, tutte influenti sul moto del blocco. Per di più, si constata che accelerogrammi scalati ad uno stesso valore di picco, di pari durata e con la medesima frequenza predominante possono fornire spostamenti permanenti sensibilmente diversi [GAZETAS *et al.*, 1981]. Pertanto, è l'insieme dei picchi e la loro esatta successione nell'ambito dell'accelerogramma che determinano, caso per caso, una risposta differenziata a seconda del grado di "interazione" che si esplica fra due o più picchi successivi [CONTE e DENTE, 1989]. È ovvio, quindi, che il calcolo basato su un singolo accelerogramma può condurre a valori sottostimati oppure troppo cautelativi dello spostamento permanente. Di conseguenza, è giocoforza utilizzare un numero appropriato di registrazioni sismiche, al fine di ottenere un possibile intervallo di valori [FRANKLIN e CHANG, 1977; MAKDISI e SEED, 1978; CONTE e DENTE, 1986; FACCIOLI, 1987] o stimare la massima risposta del pendio [SIMONELLI e VIGGIANI, 1993].

¹ Ricercatore, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Cosenza.

² Libero Professionista, Cosenza.

Un approccio alternativo, certamente pertinente dato il tipo di problematica in esame, è rappresentato dall'impiego di metodologie statistiche. Negli ultimi anni, sono state proposte diverse procedure per la determinazione dello spostamento permanente in termini probabilistici [AMBRASEYS e MENU, 1988; YEGIAN *et al.*, 1991], alcune delle quali utilizzano, altresì, modelli stocastici per simulare l'eccitazione sismica [GAZETAS *et al.*, 1981; CONSTANTINOU *et al.*, 1984; LIN e WHITMAN, 1986].

L'approccio di cui al presente lavoro, si basa sui valori dello spostamento permanente calcolati considerando accelerogrammi registrati in Italia in occasione dei più importanti terremoti verificatisi negli ultimi anni (Friuli, 1976; Campano-Lucano, 1980). Lo studio ha consentito di pervenire ad alcune semplici espressioni con le quali è possibile effettuare speditamente una valutazione probabilistica dello spostamento permanente. Tali espressioni si ritiene possano essere di interesse nelle analisi di stabilità di pendii ricadenti in aree sismiche del territorio italiano.

2. Calcolo dello spostamento permanente

Il modello di Newmark assimila la parte di pendio che si instabilizza ad un blocco rigido poggiante su un piano inclinato sottoposto al moto sismico di progetto (Fig. 1). Lo spostamento permanente è calcolato attraverso la doppia integrazione dell'equazione differenziale del moto:

$$\ddot{u} = \xi \cdot \gamma \cdot (K(t) - K_c) \quad (1)$$

dove

- \ddot{u} = accelerazione relativa del blocco;
- $K_c g$ = accelerazione critica cui corrisponde una condizione di equilibrio limite del pendio;
- $K(t)g$ = storia nel tempo dell'accelerazione al suolo (input sismico);
- t = tempo;
- g = accelerazione di gravità;
- φ' = angolo di attrito all'interfaccia blocco-piano inclinato;
- i = angolo che il piano inclinato forma con l'orizzontale; i può essere ricavato dal poligono delle forze, in condizione di equilibrio limite (Fig. 2);
- ξ = $\cos(i - \varphi') / \cos \varphi'$

Come è noto, il moto si innesca ogni qualvolta $K(t)$ eccede il valore di soglia K_c e ha termine quando la velocità relativa del blocco si annulla ($\dot{u} = 0$). Nello stesso istante, le forze instabilizzanti eguagliano quelle resistenti e, di conseguenza, il sistema raggiunge una nuova condizione di quiete.

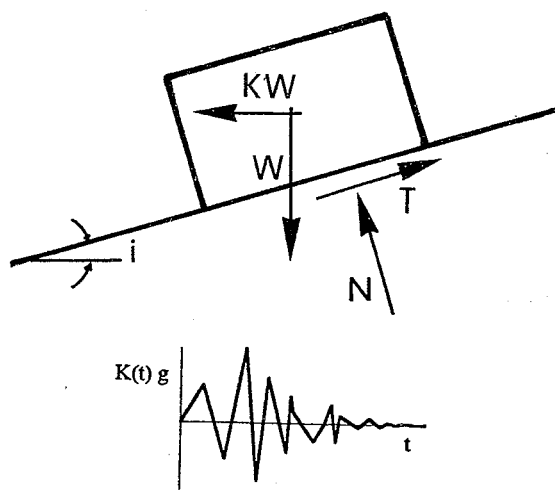


Fig. 1 - Modello del blocco rigido di Newmark.

Nella tabella I sono indicate le registrazioni accelerometriche considerate nell'analisi. Sono state impiegate complessivamente 45 registrazioni di cui 26 sono relative al terremoto del Friuli (maggio, 1976) e 19 al terremoto Campano-Lucano del 23 novembre 1980. Tali registrazioni fanno parte della banca dati curata dalla Commissione C.N.E.N.-E.N.E.L. (1982), nell'ambito delle ricerche per la sicurezza degli impianti nucleari. Per ogni registrazione accelerometrica sono stati determinati, tramite integrazione della (1), quattro valori dello spostamento permanente, qui indicato con U . Più precisamente, si è calcolato, per ciascuna componente orizzontale del moto sismico (EW e NS), lo spostamento indotto nei due versi della stessa direzione. Nel calcolo, il termine moltiplicativo ξ , al secondo membro della Eq. (1) è stato assunto pari ad uno [FRANKLIN e CHANG, 1977; AMBRASEYS e MENU, 1988], pertanto, tutti i dati relativi al pendio sono contenuti, unicamente, nel coefficiente di accelerazione critica K_c .

I valori calcolati di U , per i due terremoti italiani considerati, sono mostrati nelle figure 3 e 4, al variare del rapporto K_c / K_m fra l'accelerazione critica $K_c g$ e l'ampiezza massima dell'accelerogramma $K_m g$. Come puntualizzato da AMBRASEYS e MENU [1988] tale rapporto, infatti, è il parametro che più si presta ad essere correlato con lo spostamento permanente. La figura 3 è relativa ai valori di U ricavati considerando le sole registrazioni accelerometriche del terremoto del Friuli (Caso A), mentre la figura 4 riporta gli spostamenti permanenti ottenuti in corrispondenza degli accelerogrammi registrati in occasione del terremoto Campano-Lucano (Caso B).

Dall'esame dei grafici è ben evidente la notevole dispersione dei risultati dovuta alla marcata influenza che il rapporto K_c / K_m e le caratteristiche dell'input sismico esercitano sull'entità dello spostamento permanente, soprattutto in corrispondenza dei valori più ridotti di K_c / K_m . Inoltre, si constata che gli spostamenti

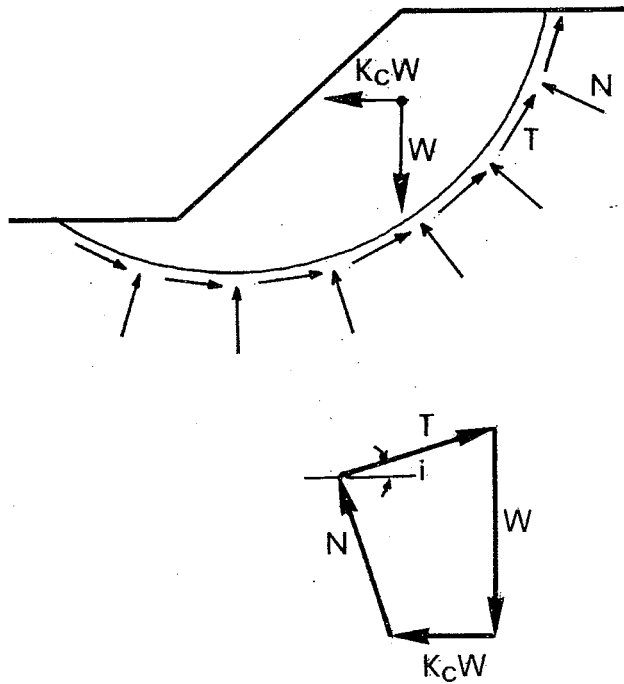


Fig. 2 - Determinazione dell'inclinazione del piano inclinato.

più elevati si ottengono in corrispondenza delle registrazioni accelerometriche relative al terremoto Campano-Lucano (Caso B).

Infine, occorre osservare che, per valori del rapporto K_c/K_m maggiori di 0.8, l'entità di U risulta assai modesta (inferiore ad 1 cm), per entrambi gli eventi sismici presi in esame. Tale valore di K_c/K_m può, quindi, essere considerato come riferimento per stabilire, di volta in volta, se occorre procedere o meno al calcolo dello spostamento permanente. In alternativa, qualora si volesse conservare l'approccio tradizionale dell'analisi pseudostatica, si potrebbe definire

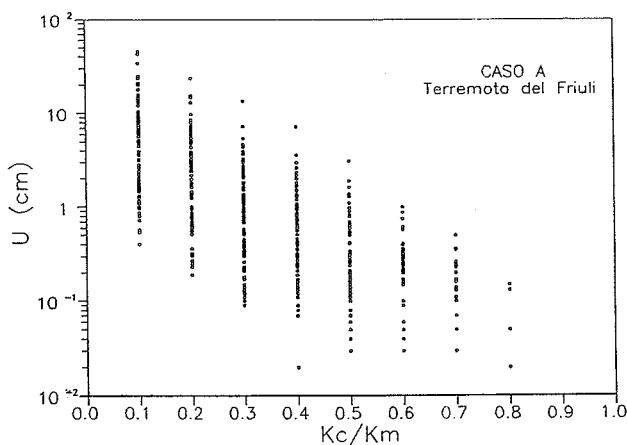


Fig. 3 - Spostamento permanente in funzione del rapporto di accelerazione K_c/K_m ; registrazioni accelerometriche del terremoto del Friuli, 1976.

Tab. I - Registrazioni accelerometriche considerate nell'analisi.

No.	TERREMOTO	STAZIONE	Amax (g) NS	Amax (g) EW
28	Friuli	Tolmezzo	0.10	0.16
29	Friuli	Asiago	0.03	0.02
31	Friuli	Castelfranco	0.03	0.03
32	Friuli	Codrolo	0.07	0.09
33	Friuli	Conegliano	0.06	0.08
38	Friuli	Tolmezzo	0.37	0.32
59	Friuli	Forgaria	0.19	0.31
78	Friuli	Forgaria	0.05	0.04
80	Friuli	Maiano Asc.	0.05	0.07
81	Friuli	Forgaria	0.07	0.06
84	Friuli	Maiano Asc.	0.04	0.03
114	Friuli	Maiano Asc.	0.02	0.02
131	Friuli	Forgaria	0.10	0.12
132	Friuli	San Rocco	0.04	0.07
133	Friuli	Tarcento	0.20	0.11
135	Friuli	Buia	0.05	0.04
138	Friuli	Forgaria	0.13	0.23
139	Friuli	San Rocco	0.09	0.09
143	Friuli	Buia	0.23	0.11
153	Friuli	San Rocco	0.07	0.12
156	Friuli	Buia	0.11	0.10
168	Friuli	Forgaria	0.35	0.34
169	Friuli	San Rocco	0.15	0.24
172	Friuli	Tarcento	0.14	0.11
177	Friuli	Buia	0.09	0.10
179	Friuli	Forgaria	0.03	0.04
618	Campano-Lucano	Arienzo	0.03	0.04
621	Campano-Lucano	Bagnoli Irpino	0.14	0.17
624	Campano-Lucano	Brienza	0.22	0.16
627	Campano-Lucano	Mercato S. Sev.	0.11	0.14
629	Campano-Lucano	Sturmo	0.22	0.30
636	Campano-Lucano	Calitri	0.16	0.17
638	Campano-Lucano	Calitri	0.02	0.04
640	Campano-Lucano	Auletta	0.06	0.06
643	Campano-Lucano	Rionero in Vulture	0.10	0.10
644	Campano-Lucano	Bisaccia	0.09	0.08
646	Campano-Lucano	Torre del Greco	0.06	0.04
647	Campano-Lucano	Torre del Greco	0.10	0.14
648	Campano-Lucano	Tricarico	0.05	0.04
652	Campano-Lucano	Garigliano	0.04	0.03
653	Campano-Lucano	Garigliano	0.03	0.02
654	Campano-Lucano	Bovino	0.05	0.05
655	Campano-Lucano	San Severo	0.03	0.02
656	Campano-Lucano	Vieste	0.04	0.03
657	Campano-Lucano	Vieste	0.02	0.02

un corrispondente valore di soglia del coefficiente di sicurezza FS (inferiore all'unità), superato il quale, l'entità dello spostamento permanente è da ritenersi trascurabile. A titolo d'esempio, nel caso di un pendio indefinito, costituito da terreno incoerente ed in assenza di falda, un siffatto valore è dato da:

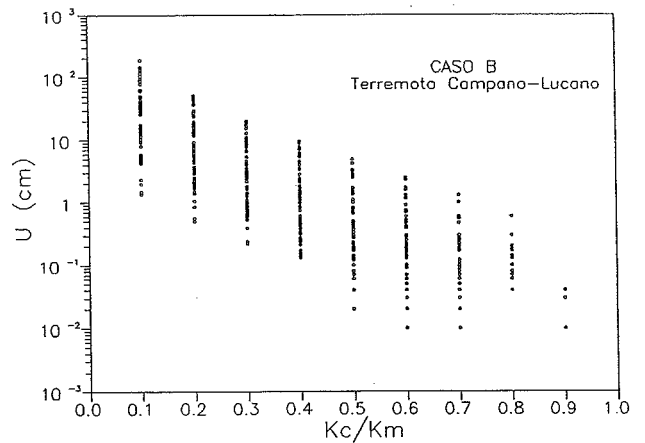


Fig. 4 - Spostamento permanente in funzione del rapporto di accelerazione K_c/K_m ; registrazioni accelerometriche del terremoto Campano-Lucano, 1980.

$$FS = \frac{[\cos i - 1.25 \operatorname{tg}(\phi' - i) \sin i] \operatorname{tg} \phi'}{[\sin i + 1.25 \operatorname{tg}(\phi' - i) \cos i]} \quad (2)$$

L'Eq. (2) deriva dall'espressione del coefficiente di sicurezza del blocco di Newmark [CONTE e DENTE, 1986] in presenza di forze sismiche agenti in direzione orizzontale, sostituendo in essa le relazioni

$$K = \frac{K_c}{0.8} \quad \text{e} \quad K_c = \operatorname{tg}(\phi' - i)$$

3. Distribuzione probabilistica dello spostamento permanente

L'elaborazione è stata effettuata considerando quale variabile casuale la funzione $y = \ln U$, dove U è espresso in centimetri. I parametri statistici più rappresentativi sono indicati nelle tabelle II e III. Come può vedersi, la maggior parte dei dati presenta coefficienti di asimmetria prossimi a zero e curtosi che oscilla tra 1.84 e 2.99. Questi ultimi parametri caratterizzano la forma della distribuzione. In particolare, il coefficiente di asimmetria, $\beta(1)$, esprime in termini quantitativi lo scostamento dalla simmetria, mentre il coefficiente di curtosi, $\beta(2)$, costituisce una misura del grado di "altezza" della distribuzione. Ad esempio, la distribuzione Normale è caratterizzata da $\beta(1) = 0$ e $\beta(2) = 3$. Pertanto, nel caso in esame, le funzioni di distribuzione si presentano praticamente simmetriche ($\beta(1) \cong 0$) e più "appiattite" rispetto alla Normale ($\beta(2) < 3$). I valori del coefficiente di variazione, indice della dispersione intorno al valore medio, sono molto elevati anche nell'ambito dello stesso evento sismico. Ciò è dovuto alla disomogeneità degli accelerogrammi considerati, determinata dalla diversità delle condizioni geologiche e topografiche di ciascun sito in cui si è avuta la registrazione, oltre che della distanza dalla zona di rilascio dell'energia sismica.

La scelta della legge di distribuzione da associare allo spostamento permanente è stata effettuata sulla base del diagramma di Pearson (Fig. 5) e dei

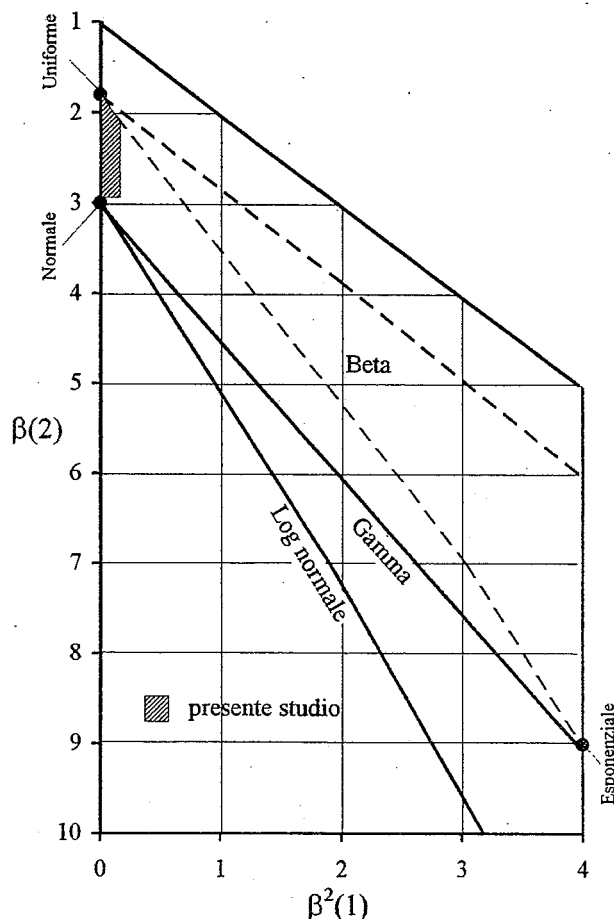


Fig. 5 - Diagramma di Pearson (modificato da HARR, 1988).

risultati dei test statistici eseguiti. Come può vedersi dalla figura 5 (tratta da HARR, 1988), la legge teorica che meglio si adatta alla variabile y è rappresentata dalla distribuzione Beta di Pearson, sebbene per talune serie campionarie potrebbe essere impiegata anche la legge Normale. A tal riguardo, nella figura 6 sono mostrati alcuni confronti fra la frequenza cumulata dei dati e la curva teorica di probabilità relativa alla distribuzione Beta (curva a tratto intero). Dall'esame della figura è evidente come la suddetta legge riproduca con grande accuratezza la frequen-

Tab. II - Parametri statistici della variabile $y = \ln U$; registrazioni accelerometriche del terremoto del Friuli, 1976.

Kc/Km	TERREMOTO DEL FRIULI						
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
Media	1.542	0.599	-0.216	-0.886	-1.398	-1.656	-1.889
Deviazione standard	1.086	1.099	1.113	1.080	1.008	0.850	0.729
Coeff. di Asimmetria	-0.088	-0.048	0.031	0.062	0.197	-0.352	-0.480
Coeff. di Curtosi	2.254	2.201	2.382	2.993	2.527	2.865	2.829
Coeff. di variazione	0.705	1.835	-5.158	-1.219	-0.721	-0.513	-0.386

Tab. III - Parametri statistici della variabile $y = \ln U$; registrazioni accelerometriche del terremoto Campano-Lucano, 1980.

Kc/Km	TERREMOTO CAMPANO-LUCANO						
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
Media	3.028	1.844	0.908	0.012	-0.913	-1.496	-2.175
Deviazione standard	1.224	1.201	1.214	1.258	1.434	1.281	1.123
Coeff. di Asimmetria	-0.165	0.064	0.176	0.231	-0.221	-0.010	0.153
Coeff. di Curtosi	2.228	1.997	1.917	1.844	2.463	2.109	2.394
Coeff. di variazione	0.404	0.651	1.337	105.646	-1.571	-0.856	-0.516

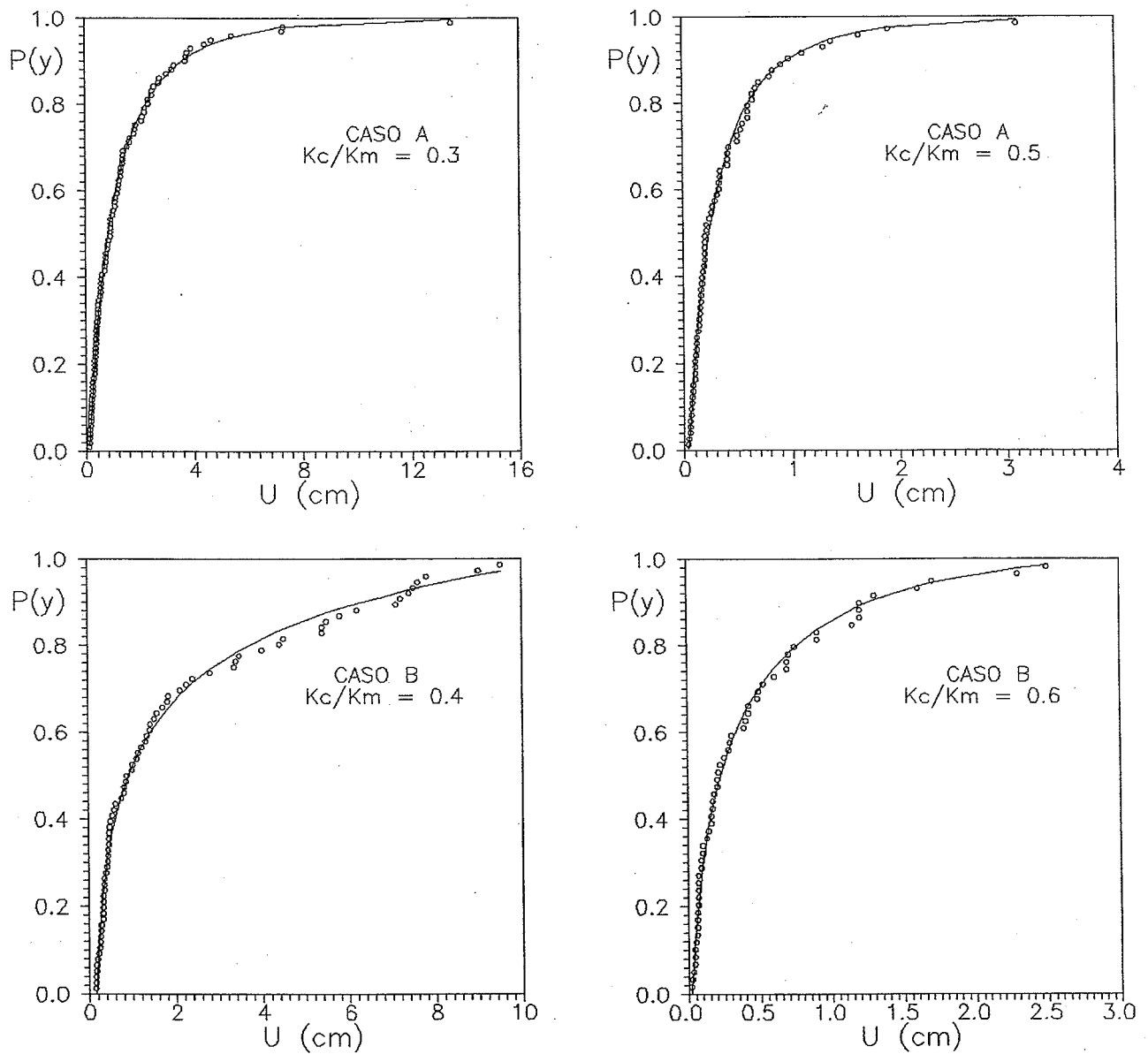


Fig. 6 - Confronto fra la funzione di probabilità della distribuzione Beta e la frequenza cumulata dello spostamento permanente.

Tab. IV - Coefficienti dell'Equazione (6).

F	TERREMOTO DEL FRIULI				TERREMOTO CAMPANO-LUCANO			
	α	β	γ	δ	α	β	γ	δ
p	1.9286	7.8882	-26.1168	34.3377	3.7638	-15.4326	21.9574	-2.5741
q	3.4551	-20.5494	94.6126	-95.0509	1.8705	3.0122	-28.7683	39.8393
a	0.3031	-17.5457	27.6342	-19.9959	-0.5123	6.9442	-38.1377	27.4717
b	5.5932	-21.1701	56.3783	-54.7790	6.8292	-13.1544	2.1002	7.4365

za cumulata dello spostamento permanente, finanche nel campo dei più alti percentili che sono quelli di maggiore interesse ai fini applicativi.

Come è noto, la distribuzione Beta è caratterizzata da una funzione densità di probabilità (PDF) avente la seguente espressione [JOHNSON e KOTZ, 1970].

$$p_Y(y) = \frac{1}{B(p,q)} \frac{(y-a)^{p-1} (b-y)^{q-1}}{(b-a)^{p+q-1}} \quad (3)$$

dove $a \leq y \leq b$, p e q sono due costanti positive, e $B(p,q)$ è la funzione beta, la quale è legata alla funzione gamma, Γ , dalla relazione:

$$B(p,q) = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} \quad (4)$$

I parametri p e q definiscono la forma della PDF; a e b rappresentano, rispettivamente, l'estremo inferiore e quello superiore della variabile y . La funzione di probabilità (CDF) è in genere ottenuta tramite integrazione numerica della (3). Un'espressione approssimata della CDF, che ben si presta ad essere utilizzata in pratica, è la seguente [ABRAMOWITZ e STEGUN, 1972]:

$$P(h) = 1 - 0.5(1 + 0.196854h + 0.115194h^2 + 0.000344h^3 + 0.019527h^4)^4 \quad (5)$$

dove

$$h = \frac{3 \left[w_1 \left(1 - \frac{1}{9q} \right) - w_2 \left(1 - \frac{1}{9p} \right) \right]}{\left(\frac{w_1^2}{q} + \frac{w_2^2}{p} \right)^{1/2}}$$

$$w_1 = (q \cdot z)^{1/3}$$

$$w_2 = [p(1-z)]^{1/3}$$

$$z = \frac{y-a}{b-a} \quad [0 \leq z \leq 1]$$

Gli scriventi hanno constatato che l'Eq. (5) fornisce risultati abbastanza accurati per valori di p e q tali che $p+q > 6$. In caso contrario ($p+q \leq 6$), è possibile ottenere lo stesso grado di approssimazione solo quando la variabile z assume valori maggiori di 0.5. Questi ultimi valori, comunque, sono quelli più significativi dal punto di vista pratico.

Per la stima dei parametri della distribuzione si è utilizzato il metodo dei momenti che, come è noto, consiste nell'imporre l'uguaglianza dei momenti delle serie campionarie con quelli teorici della popolazione. Nel caso in esame si perviene ad un sistema algebrico non lineare costituito da 4 equazioni, il quale va risolto iterativamente. A tale riguardo è stato messo a punto un efficiente algoritmo di calcolo che consente di pervenire rapidamente alla soluzione.

Alcuni risultati della stima sono mostrati nella figura 7, in funzione del rapporto K_c/K_m . Nelle stessa figura sono anche disegnate le curve interpolanti (tratto intero) introdotte allo scopo di fornire, per ciascuna variabile, una relazione analitica in funzione di K_c/K_m . In particolare, si è fatto riferimento ad un polinomio del terzo ordine:

$$F = \alpha + \beta x + \gamma x^2 + \delta x^3 \quad \text{con} \quad x = \frac{K_c}{K_m} \quad (6)$$

i cui coefficienti sono riportati nella tabella IV, per entrambi gli insiemi di registrazioni accelerometriche considerati. È da porre in risalto il fatto che, per ogni parametro della distribuzione, si è ricavato un valore del coefficiente di correlazione non inferiore a 0.97, a dimostrazione della bontà di adattamento dell'Eq. (6) ai risultati della stima.

I parametri calcolati tramite la (6) vanno inseriti nell'espressione della CDF al fine di valutare la pro-

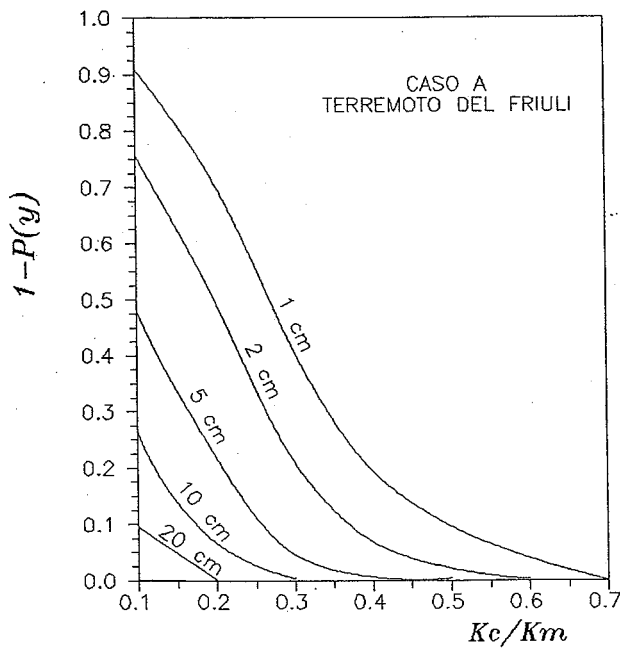


Fig. 8 - Probabilità associata ad alcuni valori dello spostamento permanente in funzione del rapporto di accelerazione K_c/K_m ; registrazioni accelerometriche del terremoto del Friuli, 1976.

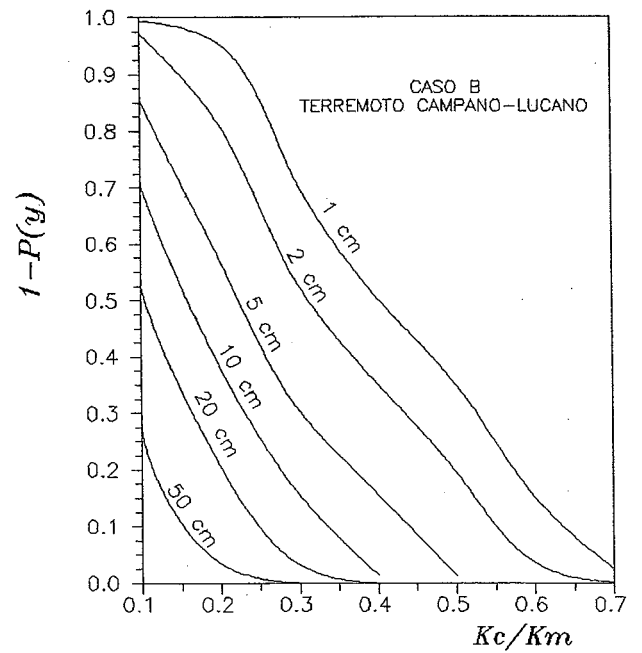


Fig. 9 - Probabilità associata ad alcuni valori dello spostamento permanente in funzione del rapporto di accelerazione K_c/K_m ; registrazioni accelerometriche del terremoto Campano-Lucano, 1980.

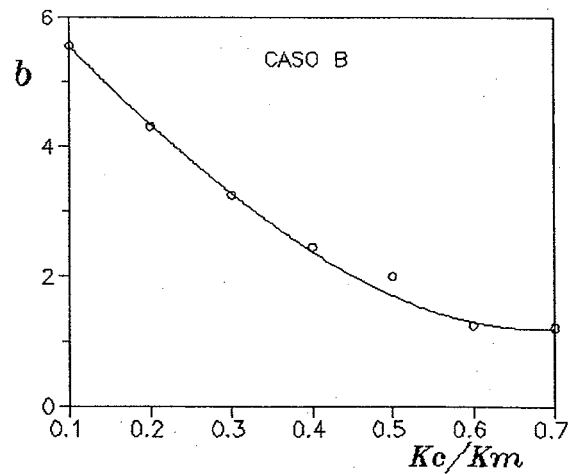
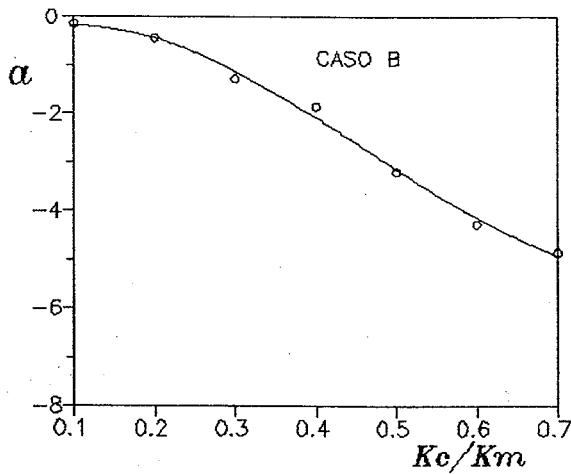
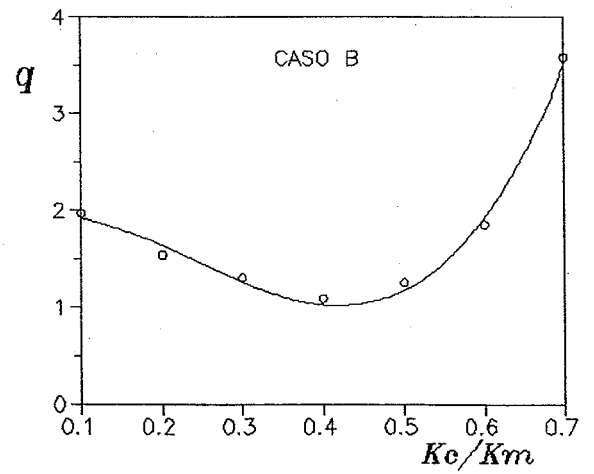
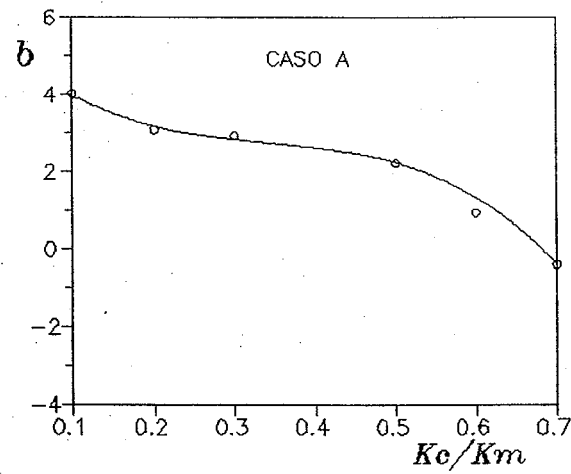


Fig. 7 - Dipendenza dei parametri della distribuzione Beta dal rapporto di accelerazione K_c/K_m .

babilità di non superamento corrispondente ad un assegnato valore dello spostamento permanente. I valori estremi di U (in cm), al contrario, possono essere determinati direttamente dalla (6), esprimendo quest'ultima in termini di $a = \ln U_{\min}$ e di $b = \ln U_{\max}$. È il caso di far presente, inoltre, che l'Eq. (6) è da ritenersi valida nel campo di valori di K_c/K_m compresi tra 0.1 e 0.7. Per K_c/K_m maggiori, i dati disponibili non sono bastevoli per una stima attendibile e, in ogni caso, l'entità dello spostamento si prevede essere alquanto contenuta. Infine, allo scopo di rendere ancora più immediata la valutazione dello spostamento, vengono mostrati i grafici delle figure 8 e 9, che correlato il rapporto K_c/K_m con gli spostamenti attesi e la relativa probabilità di superamento, $1 - P(y)$. Il calcolo è stato effettuato per alcuni valori di U ritenuti significativi, integrando numericamente la (3).

4. Considerazioni conclusive

Il semplice modello del blocco rigido di Newmark è stato applicato per il calcolo degli spostamenti permanenti dei pendii sotto carichi sismici, sulla base di registrazioni accelerometriche di terremoti verificatisi in Italia negli ultimi anni.

L'analisi statistica dei valori calcolati ha evidenziato che la funzione di probabilità dello spostamento permanente è descritta efficacemente dalla legge di distribuzione Beta di Pearson.

Vengono proposte alcune espressioni di utilità pratica con le quali è possibile valutare la probabilità corrispondente ad un assegnato spostamento permanente ed i valori estremi dell'intervallo di variazione di quest'ultimo. La validità delle suddette espressioni è però legata all'ipotesi che la resistenza disponibile lungo la superficie di scorrimento e la configurazione geometrica del pendio non subiscano sostanziali variazioni durante il moto.

Bibliografia

- ABRAMOWITZ M., STEGUN I.A. (1972) - *Handbook of mathematical functions*. Dover Publ., Inc., New York.
- AMBRASEYS N.N., MENU J.M. (1988) - *Earthquake-induced ground displacements*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. XVI, pp. 985-1006.
- CHANG C.J., CHEN W.F., YAO J.T.P. (1984) - *Seismic displacements in slopes by limit analysis*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. CX, n. 7, pp. 860-874.
- CIVIDINI A. M., PERGALANI F., PETRINI V. (1991) - *La risposta dei versanti ad azioni sismiche attraverso un modello semplificato*. Ingegneria Sismica, n. 3, pp. 28-44.
- CNEN-ENEL (1982) - *Contributo alla caratterizzazione della sismicità del territorio italiano*. Convegno Annuale del Progetto Finalizzato "Geodinamica", Udine.
- CONTE E., DENTE G. (1986) - *Deformazioni permanenti indotte da carichi sismici nei pendii sabbiosi in falda*. XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, vol. III, pp. 211-217.
- CONTE E., DENTE G. (1989) - *An analytical solution for Newmark's sliding block*, Soils and Foundations. vol. XXIX, n. 3, pp. 152-156.
- CONSTANTINOU M.C., GAZETAS G., TADJBAKHSI I. (1984) - *Stochastic seismic sliding of rigid mass supported through non-symmetric friction*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. XII, n. 2, pp. 777-793.
- CREPELLANI T., MADIAI C., VANNUCCHI G. (1992) - *Seismic stability analysis of slopes including amplification effects*. Proc. of the French-Italian Conference on Slope Stability in Seismic Areas, Bordighera, pp. 193-208.
- D'ELIA B. (1992) - *Dynamic aspects of a landslide reactivated by the November 23, 1980 Irpinia earthquake (Southern Italy)*. Proc. of the French-Italian Conference on Slope Stability in Seismic Areas, Bordighera, pp. 25-32.
- FACCIOLI E. (1987) - *Microzonazione sismica: osservazioni su alcune tendenze e problemi di interesse attuale in Italia*. III Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Roma, vol. II, pp. 29-65.
- FRANKLIN A.G., CHANG F.K. (1977) - *Permanent displacements of earth embankments by Newmark sliding block analysis*. Earthquake Resistance of Earth and Rock-Fill Dams, Misc. Paper No. S-71-17, U.S. Army Engr., Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- GAZETAS G., DEBCHAUDHURY A., GASPARINI D.A. (1981) - *Random vibration analysis for the seismic response of earth dams*. Géotechnique, vol. XXXI, n. 2, pp. 261-277.
- GOODMAN R.E., SEED H.B. (1966) - *Earthquake induced displacements in sand embankments*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. XCII, pp. 125-146.
- HARR M.E. (1988) - *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- JOHNSON N.L., KOTZ S. (1970) - *Continuous univariate distributions 2*. Houghton Mifflin Comp., Boston.
- LIN J.S., WHITMAN R.V. (1986) - *Earthquake induced displacements of sliding blocks*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. CXII, n. 1, pp. 44-59.
- MAKDISI F.I., SEED H.B. (1978) - *Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. CIV, n. GT7, pp. 849-867.
- NEWMARK N.M. (1965) - *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Géotechnique, vol. XV, n. 2, pp. 139-160.
- SARMA S.K. (1973) - *Stability analysis of embankments and slopes*, Géotechnique, vol. XXIII, n. 3, pp. 423-433.
- SIMONELLI A.L., VIGGIANI C. (1993) - *Spostamenti di pendii in condizioni sismiche*. Riunione Annuale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica, Roma, pp. 385-388.
- WILSON R.C., KEEFER D.K. (1983) - *Dynamic analysis of slope failure from the August 6, 1979 Coyote Lake*.

California Earthquake. Bulletin of Seismological Society of America, vol. LXXIII, n. 3, pp. 863-877.
YEGIAN M.K., MARCIANO E.A., GHAHRAMAN V.G. (1991) - *Earthquake induced permanent deformations: probabilistic approach*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. CXVII, n. 1, pp. 35-50.

Summary

A probabilistic analysis of earthquake-induced permanent displacements in slopes.

The randomness of earthquake ground motions and the sensitivity of permanent displacement to dynamic characteristics and details of excitation make probabilistic methods attractive and economical tools

for predicting the seismic response of slopes. In this paper a probabilistic approach is employed to evaluate earthquake-induced permanent displacements of earth dams and slopes and their likelihood of being exceeded. This approach is based on computed permanent displacements obtained by using Newmark's sliding-block model and actual acceleration time histories recorded in Italy during the last twenty years. It is shown that Beta distribution reproduces the cumulative frequency of the calculated values with remarkable accuracy. Some relations (Eqs. 5 and 6 - Tab. IV) and a set of graphs (Figs. 8 and 9) are shown that allow the assessment of permanent displacements as a function of the acceleration ratio K_c/K_m . These relations and graphs may be useful tools in engineering applications concerning slopes located in seismic areas of Italy.