

VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI SISMOINDOTTI IN PENDII STABILIZZATI CON PALI

Marianna Adinolfi, Raffaele Di Laora, Rosa M.S. Maiorano, Stefano Aversa

Dipartimento di Ingegneria, Università di Napoli Parthenope

marianna.adinolfi@uniparthenope.it; raffaele.dilaora@uniparthenope.it;
rossella.maiorano@uniparthenope.it; aversa@uniparthenope.it

Sommario

Spesso i pali sono utilizzati per incrementare la stabilità di pendii in condizioni statiche. La presenza dei pali ha anche un effetto benefico in termini di miglioramento del comportamento sotto azioni sismiche. La nota propone una semplice procedura per la stima degli spostamenti sismoindotti di pendii stabilizzati con pali. Il metodo prevede tre passi:(a) analisi di stabilità del pendio non stabilizzato e della resistenza ultima offerta dai pali; (b) implementazione del contributo tagliante offerto dai pali nei metodi dell'equilibrio limite tradizionali e valutazione dell'accelerazione critica del pendio stabilizzato; (c) applicazione del metodo di Newmark, con un set di accelerogrammi, per stimare gli spostamenti cumulati permanenti.

1. Introduzione

Il tradizionale approccio pseudostatico per le verifiche di stabilità di pendii sotto azioni sismiche, se condotto utilizzando le massime accelerazioni attese, è certamente troppo cautelativo, non tenendo conto della breve durata delle azioni sismiche. Nella realtà, un fattore di sicurezza "temporaneamente" minore dell'unità, nel corso dell'evento sismico, può comportare spostamenti permanenti "tollerabili".

D'altro canto, è largamente diffuso l'utilizzo di pali come intervento di stabilizzazione di pendii. In letteratura sono presenti numerosi metodi di analisi in condizioni statiche, sviluppati attraverso approcci sia analitici (Ito et al, 1981; Chen et al, 1997; Zeng et al, 2002; Viggiani 1981; Poulos 1995; Ausilio et al, 2001), sia numerici (Won et al, 2005; Kourkoulis et al, 2011; Kourkoulis et al, 2012). Pochi contributi (Li et al, 2010) hanno investigato il comportamento di pendii stabilizzati da pali sotto azioni sismiche. Il lavoro proposto ha lo scopo di definire una semplice procedura per valutare gli spostamenti permanenti sismoindotti del sistema palo-pendio.

2. Valutazione del contributo tagliante offerto da pali usati per stabilizzare pendii in frana

L'incremento di stabilità di un pendio stabilizzato è correlato al contributo resistente offerto in relazione al meccanismo di interazione tra corpo di frana e pali. Si considerano le espressioni analitiche proposte in letteratura (Viggiani, 1981) per un palo rigido isolato di lunghezza L , infisso in uno strato instabile orizzontale di spessore l_1 e un sottosuolo stabile per una lunghezza $l_2 = \lambda l_1$. La formulazione è valida per condizioni non drenate, in cui entrambi gli strati sono modellati come mezzi rigido-plastici e caratterizzati da resistenze non drenate pari rispettivamente a s_{u1} e s_{u2} . Seguendo l'approccio proposto da Broms (1964), si individuano 6 possibili meccanismi di rottura, corrispondenti a pali infinitamente resistenti (meccanismi A, B, C) e pali con possibili formazioni di cerniere plastiche ovvero con valori finiti del momento di plasticizzazione M_y (meccanismi B₁, B_Y, B₂) rappresentati in Fig.1. Definendo le quantità adimensionali:

$$\chi = \frac{k_{u1} s_{u1}}{k_{u2} s_{u2}} \quad \lambda = \frac{l_2}{l_1} \quad m = \frac{M_y}{k_{u1} s_{u1} d l_1^2} \quad (1a,b,c)$$

dove k_{u1} e k_{u2} sono fattori di capacità portante (rispettivamente 4 e 8), si ottiene il contributo tagliente corrispondente al minimo valore tra i suddetti meccanismi. In Fig. 2 è riportato il taglio minimo adimensionalizzato per il caso di terreno omogeneo ($\chi=0.5$).

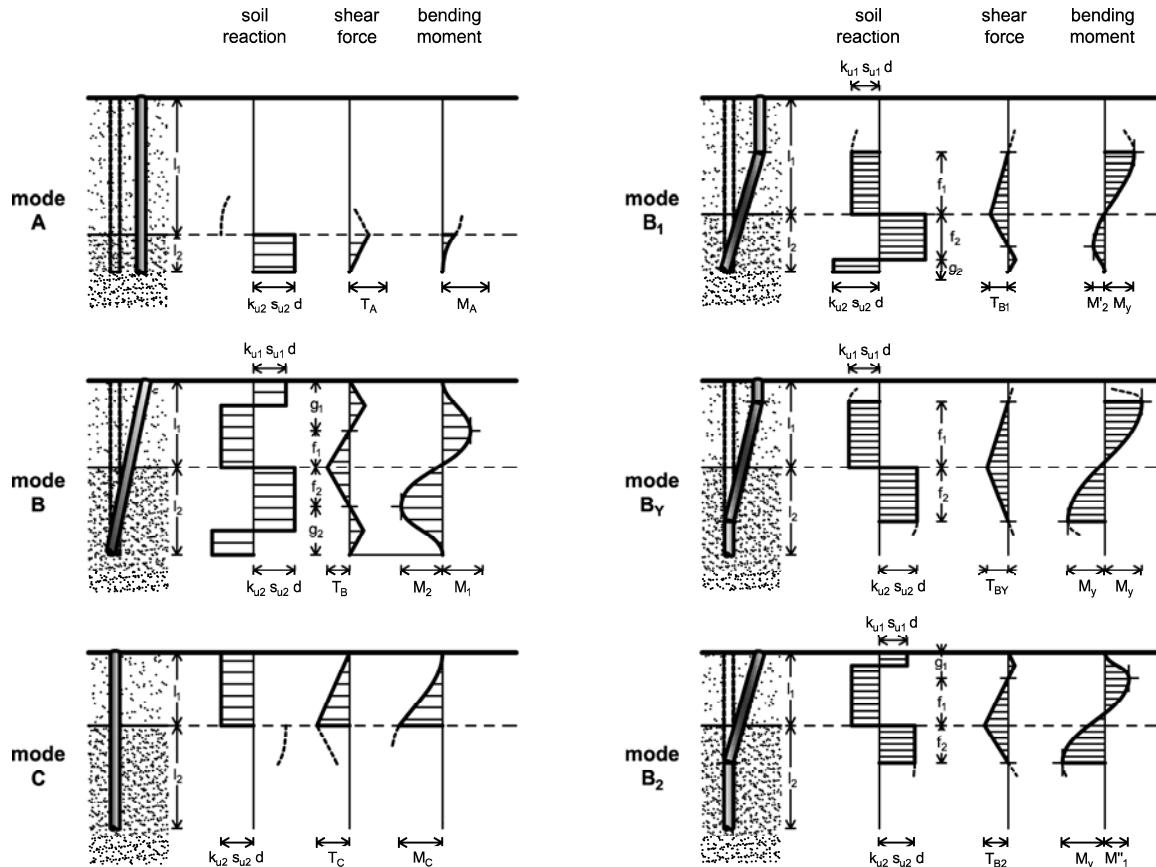


Fig 1.: Meccanismi di rottura di palo infinitamente resistente (colonna sinistra) e di palo con cerniere plastiche (colonna destra, modificato da Viggiani, 1981).

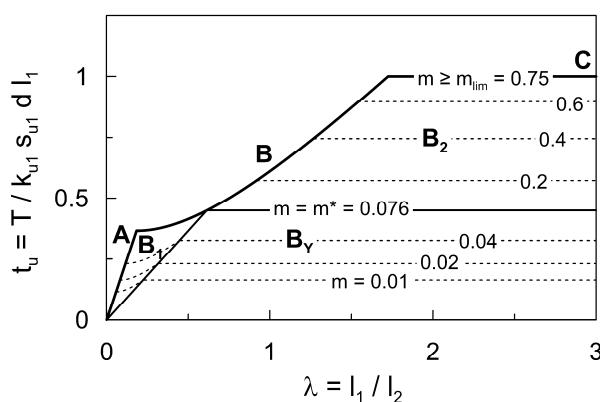


Fig 2.: Forza di taglio funzione dei parametri geometrici e meccanici per $\chi = 0.5$ (modificato da Viggiani 1981).

3. Analisi di stabilità dei pendii rinforzati con pali stabilizzanti

Le analisi di stabilità dei pendii vengono generalmente espresse in termini di coefficiente di sicurezza, definito come il valore per cui dividere i parametri di resistenza disponibili lungo la superficie di scorrimento per raggiungere la condizione di collasso incipiente. La superficie di

scorrimento critica è quella caratterizzata dal minor coefficiente di sicurezza. Tra gli svariati metodi, basati sul principio dell'equilibrio limite e metodi delle strisce, proposti in letteratura per individuare il coefficiente di sicurezza di un pendio, si è deciso di fare riferimento a quello di Sarma (1973, 1979). Il metodo è particolarmente adatto alle verifiche sotto azioni sismiche in quanto consente di computare l'accelerazione critica orizzontale necessaria affinché la massa al sopra della superficie si trovi in una condizione di equilibrio limite. Il corpo di frana, suddiviso in n strisce, è soggetto a forze destabilizzanti (peso proprio ed azioni sismiche) e azioni stabilizzanti (resistenze mobilitate lungo la superficie di scorrimento e, nel caso di pendio rinforzato, contributo dei pali) come in Fig. 3. Nell'ipotesi in cui lo spessore della striscia sia sufficientemente piccolo da garantire che le azioni normali N_i agiscano nel baricentro e che non ci siano forze esterne agenti all'interfaccia, $\Sigma \Delta E_i = 0$ e $\Sigma \Delta X_i = 0$, si ricavano le equazioni dall'equilibrio orizzontale e verticale della singola striscia:

$$N_i \cdot \cos \alpha_i + T_i \cdot \operatorname{sen} \alpha_i + T_{\text{pile}} \cdot \operatorname{sen} \alpha_i = W_i - \Delta X_i \quad (2)$$

$$T_i \cdot \cos \alpha_i - N_i \cdot \operatorname{sen} \alpha_i + T_{\text{pile}} \cdot \cos \alpha_i = k_h \cdot W_i - \Delta E_i \quad (3)$$

$$T_i = N_i \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot b_i \cdot \sec \alpha_i \quad (4)$$

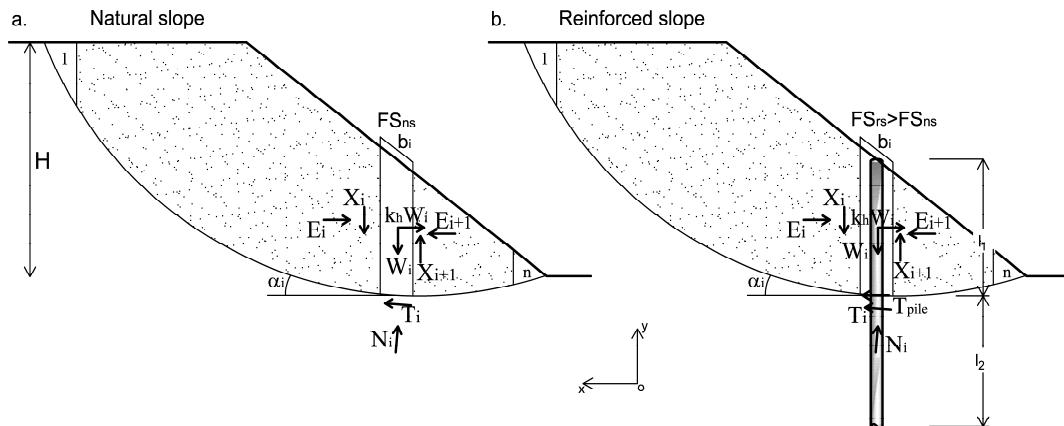


Fig 3.: Superficie critica del pendio non rinforzato (a) e analizzata a seguito di stabilizzazione con pali (b).

Le equazioni di equilibrio (2), (3) e (4), "estese" rispetto al lavoro originale (Sarma, 1979) ed implementate in ambiente Matlab (2010), hanno consentito di ricavare iterativamente l'accelerazione critica, considerato che i parametri di resistenza del materiale lungo la superficie di scorrimento sono divisi per un coefficiente di sicurezza noto. Il fattore che fornisce un valore nullo dell'accelerazione critica corrisponde al coefficiente di sicurezza critico in condizioni statiche.

4. Analisi degli spostamenti sismoindotti in pendii stabilizzati con pali

Si propone un approccio *performance-based* per la valutazione degli spostamenti di aree in frana mediante il modello di Newmark (1965) dove le accelerazioni critiche del pendio, stabilizzato e non, sono ricavate dalla suddetta estensione del metodo all'equilibrio limite di Sarma. La procedura consente di apprezzare come l'incremento delle forze resistenti dovuto al contributo offerto dai pali giovi alla performance sismica del pendio in termini di spostamenti cumulati.

Per tre pendii omogenei in terreni a grana fine e condizioni non drenate, sono state sviluppate le analisi di stabilità sia di pendii non rinforzati che stabilizzati con pali, allo scopo di calcolare i coefficienti critici (k_c). I pendii sono caratterizzati da bassi valori della resistenza non drenata ($s_u=36, 42, 50$ kPa); altezze $H=10, 12.5, 15$ m ed inclinazioni $\alpha=63^\circ, 55^\circ, 50^\circ$ (rispettivamente pendio n°1, pendio n°2 e pendio n°3). Le superfici critiche individuate per i pendii non rinforzati corrispondono ad accelerazioni critiche rispettivamente pari a $k_c=0.020, 0.017, 0.035$. Le stesse superfici sono state analizzate, considerando diverse forze resistenti T_{pile} , in termini di accelerazione critica k_c e coefficiente di sicurezza FS in condizioni statiche (Fig. 4). La stabilità dei 3 pendii, prossimi

all'equilibrio limite, è incrementata considerando la presenza di una fila di pali infissa nel pendio con differenti interassi (s).

In Tabella 1 si riportano gli interassi utilizzati per ogni configurazione di pali e per ogni pendio, i fattori di sicurezza ed i coefficienti critici.

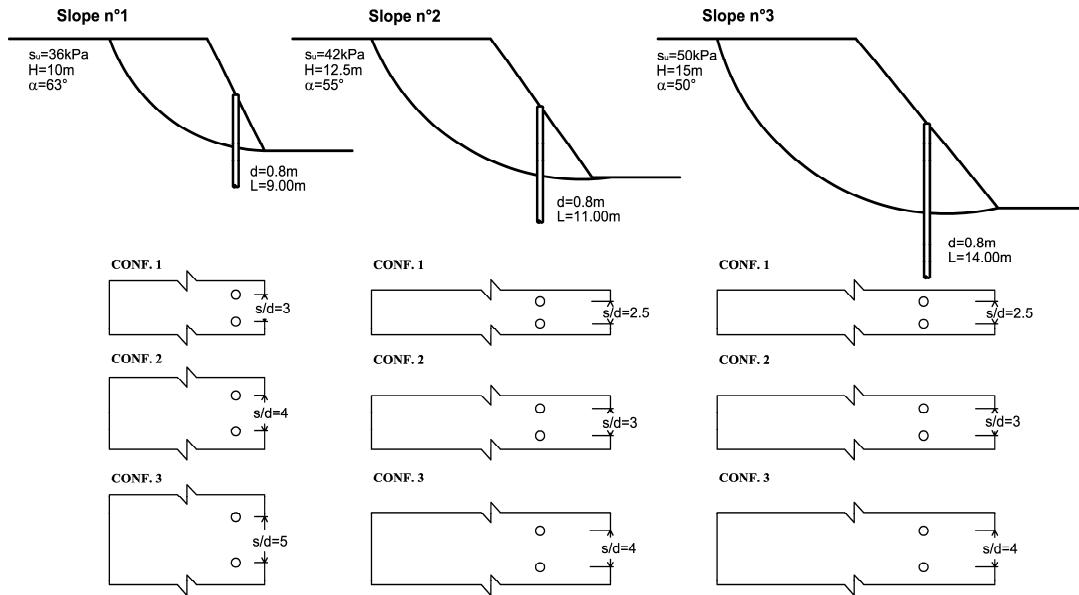


Fig 4.: Casi studio di tre pendii stabilizzati rispettivamente con tre configurazioni di pali

Tab 1.: Caratteristiche dei pendii e risultati delle analisi di stabilità

	s/d	d (m)	s (m)	FS	k_c	T_{pile}(kN/m)	M_y(kNm)
PENDIO 1	CONF. 1	3	0.8	2.4	1.304	0.1835	134.8
	CONF. 2	4	0.8	3.2	1.248	0.1563	112.3
	CONF. 3	5	0.8	4	1.197	0.1291	89.9
	<i>NON STABILIZ.</i>	0	0	0	1.027	0.0204	0.0
PENDIO 2	CONF. 1	2.5	0.8	2	1.302	0.1641	212.2
	CONF. 2	3	0.8	2.4	1.252	0.1423	180.7
	CONF. 3	4	0.8	3.2	1.203	0.1195	147.6
	<i>NON STABILIZ.</i>	0	0	0	1.040	0.0179	0.0
PENDIO 3	CONF. 1	2.5	0.8	2	1.301	0.1598	288.0
	CONF. 2	3	0.8	2.4	1.250	0.1382	238.0
	CONF. 3	4	0.8	3.2	1.200	0.1151	184.4
	<i>NON STABILIZ.</i>	0	0	0	1.054	0.0356	0.0

Ogni configurazione è caratterizzata da diversi momenti di plasticizzazione M_y (ricavato mediante le formule convenzionali per pali cilindrici) e forze di taglio di ogni palo (T_{pile}) tali da garantire valori di fattori di sicurezza fissati a $FS= 1.20, 1.25, 1.30$, così come suggerito dalla procedura generale di letteratura (Kourkoulis et al., 2012).

Un database composto da 30 registrazioni accelerometriche selezionate da diverse fonti (Scasserra et al., 2008, Chiou et al., 2008) è stato utilizzato per valutare gli spostamenti cumulati con il metodo di Newmark. Gli accelerogrammi sono stati scalati alla stessa accelerazione di picco $a_{max}=0.25\text{g}$. Una notevole riduzione degli spostamenti, dovuta alla presenza dei pali nel pendio, può essere apprezzata in Fig. 6, dove gli spostamenti permanenti sismo-indotti dall'accelerogramma di Tolmezzo (ATMZ270), sono rappresentati per i pendii non rinforzati (linea nera) e per quelli stabilizzati con pali. Si può notare come gli spostamenti dei pendii rinforzati siano stati significativamente più piccoli

rispetto a quelli non stabilizzati. Le riduzioni di spostamento variano dal 99 al 93% per il primo pendio (spostamento massimo di 40 cm per pendio non rinforzato), dal 98 al 91% per il secondo pendio (spostamento massimo di 43 cm per pendio non rinforzato) e una riduzione dal 97 all' 83% per il terzo caso (spostamento massimo di 27 cm per pendio non rinforzato). Allo stesso modo le analisi alla Newmark sono state condotte per l'intero database (Fig 7) ed i risultati evidenziano che gli effetti della stabilizzazione dei pendii mediante pali comportano una notevole riduzione degli spostamenti sismoindotti, correlabile all'incremento del fattore di sicurezza in condizioni statiche.

Tab 2.: Database accelerometrico.

N°	Evento	Stazione	PGA (g)	N°	Evento	Stazione	PGA(g)
1	Chi Chi, 1999	TCU045	0.361	16	Bingol, 2003	007142xa	0.515
2	Friuli, 1976	ATMZ270	0.315	17	Avej, 2002	007718xa	0.446
3	Irpinia, 1980	ASTU270	0.320	18	South Iceland, 2000	006349xa	0.744
4	Irpinia, 1980	ABAG 270	0.189	19	South Iceland, 2000	004674xa	0.318
5	Izmit, 1999	001231xa	0.161	20	Duzce, 1999	006500xa	0.496
6	Izmit, 1999	GBZ000	0.244	21	Oelfus, 1998	004992xa	0.145
7	Loma Prieta, 1989	CYC285	0.484	22	Mt. Hengill area, 1998	005079XA	0.173
8	Tabas, 1978	000182xa	0.338	23	Kozani, 1995	006115xa	0.208
9	Ardal, 1977	000158xa	0.908	24	Firuzabad, 1994	007156xa	0.310
10	Montenegro, 1979	000198xa	0.181	25	Spitak, 1988	000465xa	0.202
11	Hollister, 1961	USGS 1028	0.484	26	Etolia, 1988	000428xa	0.166
12	Montenegro, 1979	000200xa	0.224	27	SE_Tirana, 1988	003802xa	0.113
13	Northridge, 1994	24278 090	0.568	28	Umbria Marche, 1997	ENCB090	0.383
14	Olfus, 2008	013006xa	0.665	29	Umbria Marche, 1997	IBCT090	0.162
15	Olfus, 2008	013010xa	0.536	30	Trinidad, 1983	CDMG 1498	0.194

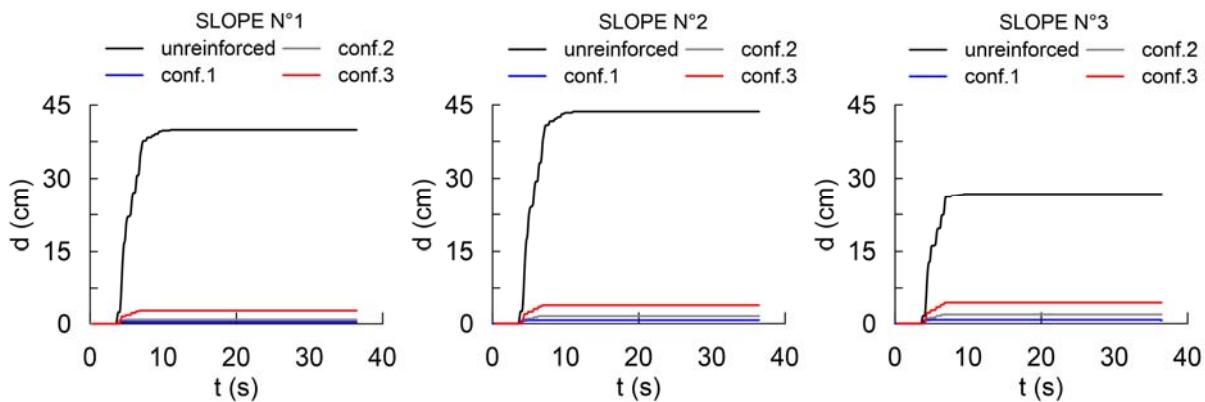


Fig 6.: Spostamenti di Newmark (registrazione ATMZ270)

5. Conclusioni

Una semplice metodologia viene proposta per la valutazione degli spostamenti sismoindotti di pendii stabilizzati con pali. La procedura estende il metodo all'equilibrio limite di Sarma aggiungendo, nelle equazioni di equilibrio, il contributo del palo, valutato attraverso il metodo di Viggiani e ricavando le accelerazioni critiche. Il classico metodo di Newmark è infine applicato per valutare gli spostamenti permanenti di svariate storie accelerometriche. Attraverso questa metodologia è stata condotta un'analisi parametrica per valutare la risposta di pendii stabilizzati con pali sotto azioni dinamiche.

Lo studio dimostra che i pali, progettati per incrementare il fattore di sicurezza statico a prefissati

valori, possono drasticamente ridurre gli spostamenti sismoindotti. Le limitazioni del metodo sono dovute alle ipotesi semplificative adottate: sebbene i risultati evidenzino un trend interessante, la generalizzazione richiede attenzione e sarà oggetto di studi futuri.

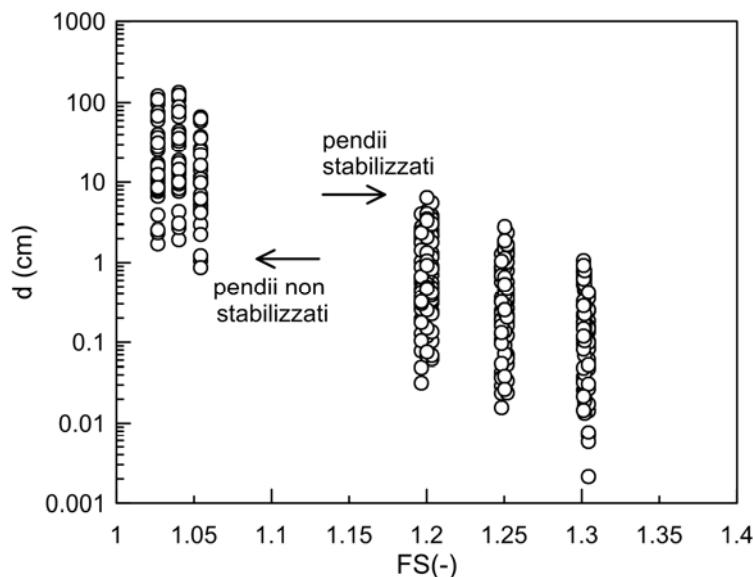


Fig 7: Spostamenti sismoindotti in funzione del coefficiente di sicurezza in condizioni statiche

Bibliografia

- Ausilio E, Conte E, Dente G. (2001). "Stability analysis of slopes reinforced with piles", *Comp and Geotec*, 28(8), 591-611.
- Broms B.(1964). "Lateral resistance of piles in cohesionless soils". *J Soil Mech Found Div*, 90(SM3), 123-156.
- Chen LT, Poulos HG.(1997). "Piles subjected to lateral soil movements". *J Geotech Geoenvir Eng ASCE*, 123(9), 802-811.
- Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. (2008). NGA Project Strong-Motion Database. Earthquake Spectra, 24(1), 23-44. PEER Ground Motion Database Beta Version 2010; URL: <http://peer.berkeley.edu/>
- Ito T, Matsui T, Hong PW. (1981). "Design method for stabilizing piles against landslide – one row of piles". *Soils Found*, 21(1), 21-37.
- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, Gazetas G.(2011). "Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights". *J Geotech Geoenvir Eng ASCE*, 137(7), 663-678.
- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, Gazetas G. (2012). "Hybrid method for analysis and design of slope stabilizing piles". *J Geotech Geoenvir Eng ASCE*, 138(1), 1-14.
- Li X, He S, Wu Y.(2010). "Seismic Displacement of Slopes Reinforced with Piles". *J Geotech Geoenvir Eng. ASCE*, 136, 880-884.
- Matlab Version 7.10. The Language of Technical Computing. The Mathworks, Inc.: Natick, MA, R2010a.
- Newmark N W. (1965). "Effects of earthquakes on dam and embankments". 5th Rankine lecture of the British Geotechnical Society, *Géotechnique*, 15 (2).
- Poulos HG. (1995). "Design of reinforcing piles to increase slope stability". *Can Geotech J*, 32,808-818.
- Sarma S K. (1973). "Stability analysis of embankments and slopes". *Géotechnique*, 23(3),423-433.
- Sarma S K. (1979). "Stability analysis of embankments and slopes". *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, 105, 1511-1524.
- Scasserra G, Lanzo G, Stewart J P, D'Elia B. (2008). SISMA (Site of Italian Strong Motion Accelerograms): a web-database of ground motion recordings for engineering applications. Seismic Engineering Conference commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, Reggio Calabria, Italy, 2,1649-56.
- Viggiani C. (1981). "Ultimate Lateral Load on Piles Used to Stabilize Landslides. Proc.10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Stockholm, 3, 555-560.
- Won J, You K, Jeong S, Kim S. (2005). "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems". *Comp and Geotech*, 32, 304-315.
- Zeng S, Liang R. (2002). "Stability analysis of drilled shafts reinforced slope". *Soils Found*, 42(2), 93-102.