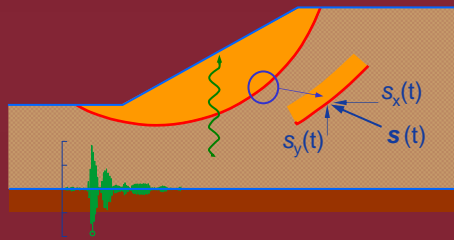


comportamento dei pendii in
condizioni sismiche

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CIVILE E INDUSTRIALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Sebastiano Rampello

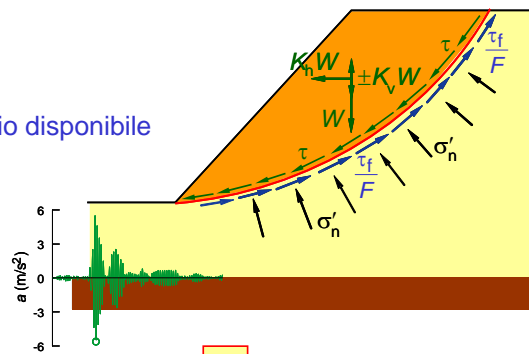
Ordinario di Fondazioni e opere di sostegno
sebastiano.rampello@uniroma1.it

effetti del sisma

coefficiente di sicurezza

rapporto tra resistenza al taglio disponibile
e sforzo di taglio agente

$$F = \frac{\tau_f}{\tau}$$



- riduzione resistenza al taglio

$$\tau_f$$

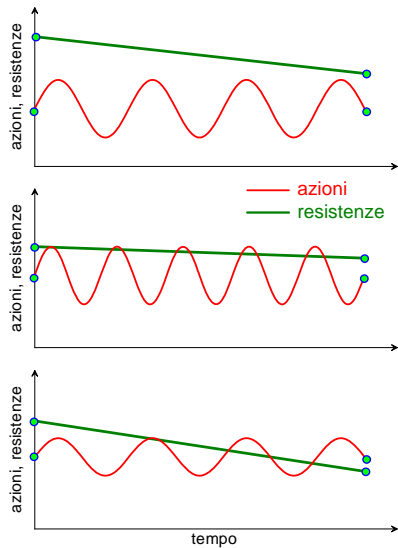
$$\tau_f = c' + [(\sigma_n + \Delta\sigma_n) - (u + \Delta u)] \cdot \tan\phi'$$

- aumento della tensione agente

$$\tau$$

peggioramento condizioni di stabilità

comportamento in condizioni sismiche



sisma

- breve durata
- intensità, direzione e verso variabili nel tempo e nello spazio

comportamento stabile

azioni inerziali (durante il sisma)

- accumulo deformazioni e spostamenti

riduzione resistenza (dopo il sisma)

- movimenti franosi

analisi di stabilità

(a) prima del sisma: condizioni statiche

(b) durante il sisma (carattere transitorio delle azioni e calcolo spostamenti accumulati)

(c) dopo il sisma: condizioni statiche, ma con eventuali riduzioni della resistenza al taglio (incrementi di u e decrementi di c' e φ')

metodi di analisi

(a) e (c) condizioni statiche (EL)

(b) {
metodi di analisi dinamica
metodi degli spostamenti
metodi pseudostatici (EL)



prestazione
sismica correlata
agli spostamenti
permanenti
indotti dal sisma

metodi di analisi dinamica

risoluzione delle equazioni del moto in condizioni dinamiche
(terreno \Rightarrow mezzo poroso bifase con comportamento elasto-plastico)

metodi degli spostamenti

valutazione d_{\max} indotto dal sisma (**prestazione sismica**)

valutazione preliminare resistenza sismica (EL: $F_s = 1$) $\rightarrow a_c$

- (1) **originario:** sisma = $a(t)$
 d_{\max} da integrazione dell'equazione del moto relativo
- (2) **semplificato:** d_{\max} da relazioni empiriche
- (3) **modificato:** sisma = $a(t)$ da analisi risposta sismica (deformabilità terreno)
 d_{\max} da integrazione dell'equazione del moto relativo

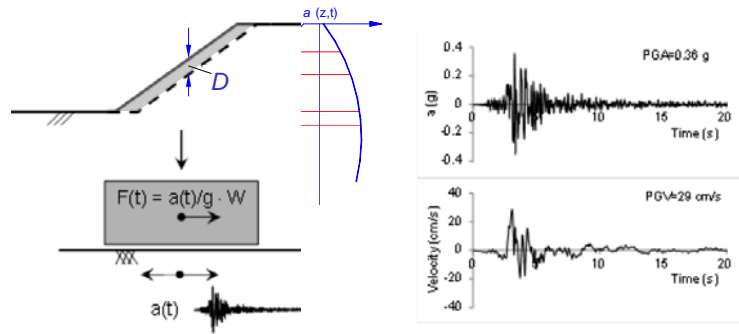
metodi pseudostatici

- $F_s = \tau_f / \tau_m$
- sisma = $K \cdot W \Rightarrow K$ calibrato sui fissati livelli di spostamenti (e quindi di prestazione sismica)

metodo degli spostamenti

schema di blocco rigido

il volume di terreno potenzialmente instabile è assimilato ad un corpo rigido su un piano orizzontale



- rigidezza elevata
- basse frequenze
- s.d.s. superficiali

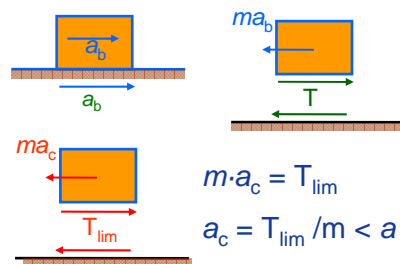
$$\lambda = \frac{V_s}{f} > D$$

moto sincrono

schema di blocco rigido

Newmark (1965)

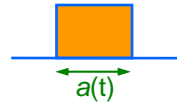
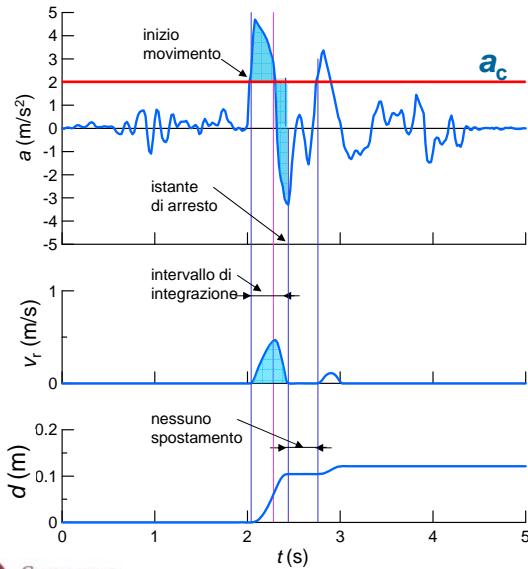
- terreno instabile → corpo rigido
- $a(t)$ costante nello spazio
- τ_f costante nel tempo ($a_c = \text{cost}$)



- lo spostamento relativo si innesca quando si raggiunge la resistenza al taglio T_{lim} disponibile al contatto blocco – base
- in queste condizioni la forza di inerzia agente sul blocco è pari a $m \cdot a_c$ dove $a_c = T_{lim}/m$ è l'accelerazione critica del sistema, che è una misura della resistenza sismica del blocco
- il blocco non può essere accelerato a valori di accelerazione $a > a_c$

calcolo degli spostamenti

doppia integrazione moto relativo



$$a_r(t) = a(t) - a_c$$

inizio moto $a_r(t) > 0$

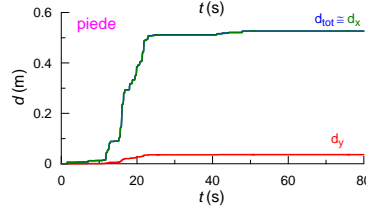
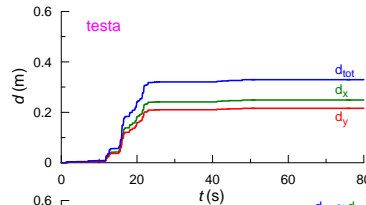
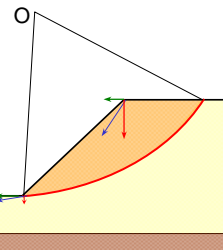
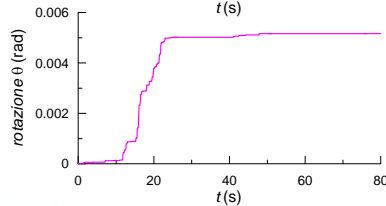
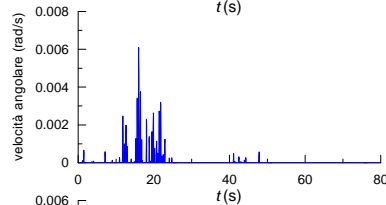
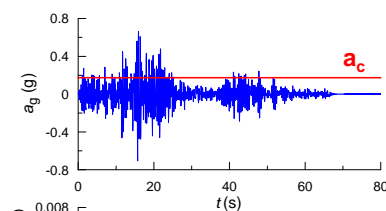
$$v_r(t) = \int a_r(t) dt$$

cond. di moto $v_r(t) > 0$

fine moto $v_r(t) \leq 0$

$$d(t) = \int v_r(t) dt$$

esempio calcolo spostamenti



metodo degli spostamenti

- **azione sismica:** funzione temporale (≥ 7 acceler. naturali)
- **effetti azione sismica:** spostamenti accumulati

fasi di analisi

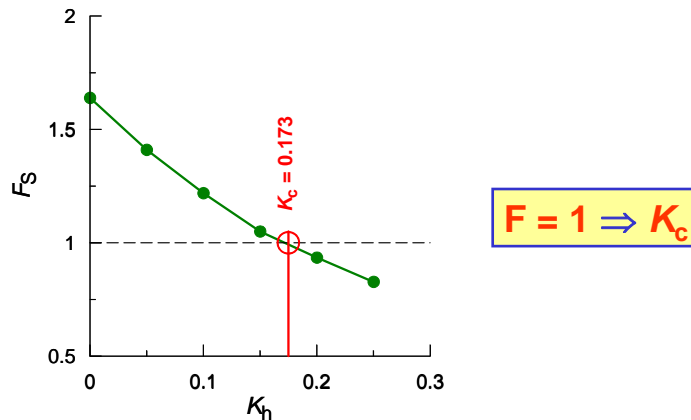
- scelta accelerogrammi di progetto
- determinazione del coefficiente sismico critico $K_c = a_c/g$ che produce condizioni di equilibrio limite ($F_s = 1$)
- calcolo spostamento (doppia integrazione eq. moto relativo)
- confronto tra spostamento limite e spostamento calcolato

nota : K_c deve essere valutata utilizzando i valori caratteristici dei parametri di resistenza

valutazione coefficiente sismico critico

valutazione K_c – metodo delle strisce

- K_h di tentativo e si determina F_{min} (con s.d.s. associata)
- curva $F - K_h$



metodi degli spostamenti – relazioni empiriche

sisma: grandezze rappresentative (a_{max} , I_A , P_D ...)
 $d_{max} \rightarrow$ relazioni empiriche

la valutazione degli spostamenti dipende dal database considerato e dai parametri utilizzati per rappresentare il moto sismico (**PGA, PGV, I_a , P_D** ecc.)

relazioni empiriche (Rampello, Callisto, Fagnoli 2010)

procedura

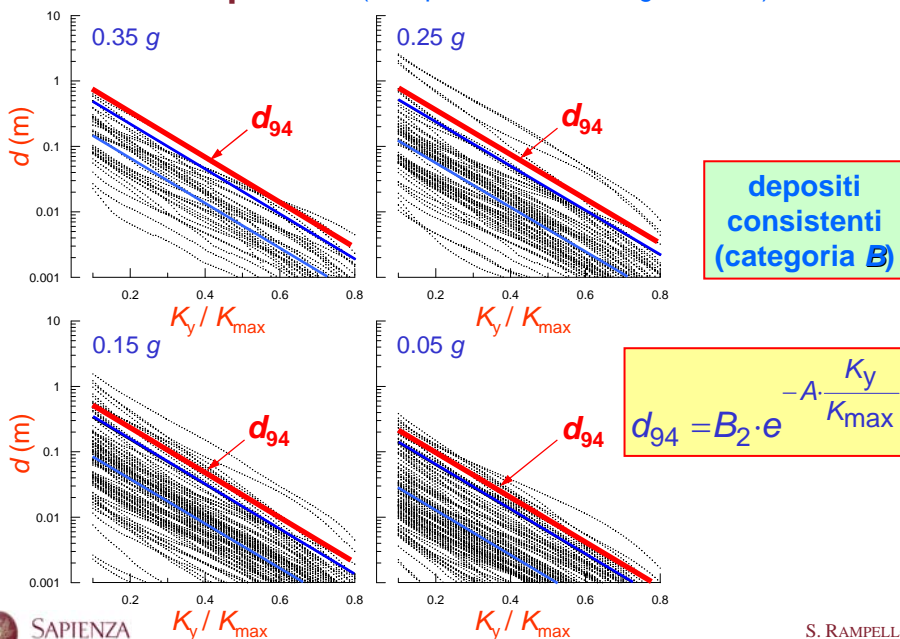
accelerogrammi di ingresso da database SISMA
(240 registrazioni – 3 componenti – free field)

per ciascuna categoria di sottosuolo

- 4 gruppi di accelerogrammi con $a_{\max} = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35 g$
- calcolo spostamenti per doppia integrazione del moto relativo
- regressione esponenziale degli spostamenti calcolati
- curve di limite superiore (90° percentile, B_1 , e 94 percentile, B_2)

$$\ln d = \ln B - A \frac{K_y}{K_{\max}} \quad \rightarrow \quad d = B \cdot e^{-A \frac{K_y}{K_{\max}}}$$

relazioni empiriche (Rampello, Callisto, Fagnoli 2010)



relazioni empiriche (Rampello, Callisto, Fagnoli 2010)

a_{\max} (g)	cat. A		cat. B		cat. C, D, E	
	A	B_2 (m)	A	B_2 (m)	A	B_2 (m)
0.35	7.50	1.69	7.90	1.59	7.40	0.75
0.25	7.42	1.79	7.79	1.66	7.54	0.78
0.15	7.48	0.91	7.86	1.09	8.05	1.16
0.05	7.87	0.39	7.86	0.45	8.07	0.59

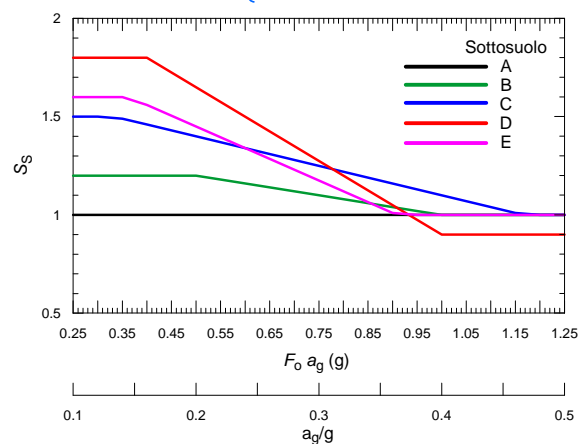
$$d_{94} = B_2 \cdot e^{-A \cdot \frac{a_c}{a_{\max}}}$$

a_{\max} attesa al sito

analisi di risposta sismica semplificata

$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

S_T = amplif. topografica ($S_T = 1-1.4$)
 S_S = amplif. stratigrafica ($S_S = 1-1.8$)



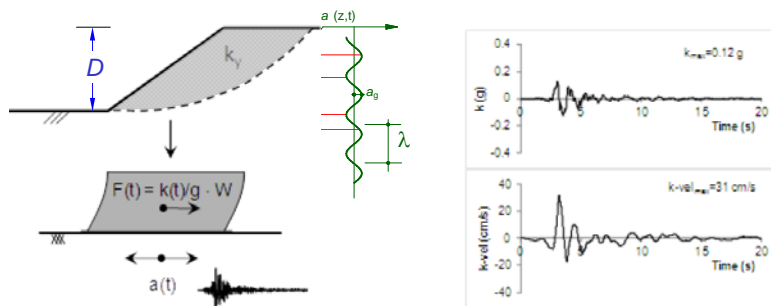
$F_0 \approx 2.5$

effetto deformabilità del terreno

- analisi di risposta sismica
 - analisi 1D include S_S
 - analisi 2D include S_S ed S_T

schema di blocco deformabile

deformabilità terreno
distribuzione non uniforme di $a(t)$ } amplificazione
deamplificazione moto sismico



- terreno deformabile
- alte frequenze
- s.d.s. profonde

$$\lambda = \frac{V_s}{f} < D$$

moto asincrono
riduzione forze inerziali

metodo degli spostamenti **modificato**

approccio disaccoppiato

- analisi risposta sismica disaccoppiata da analisi spostamenti

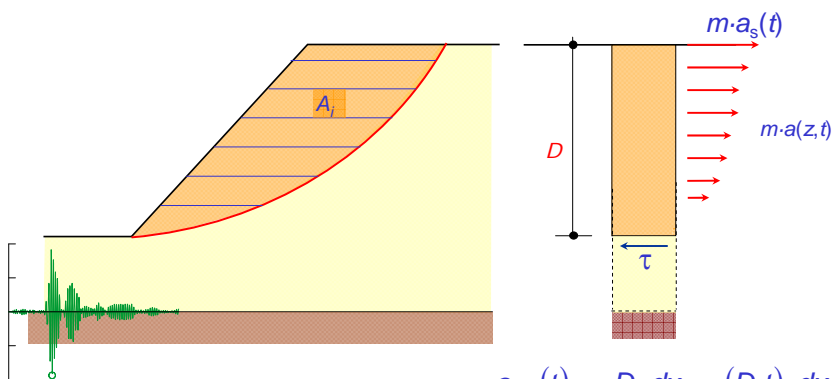
1. analisi di risposta sismica:

1D } $a_{eq}(t)$ → **accelerogramma medio o equivalente**
2D }

2. valutazione spostamenti indotti dal sisma

approccio disaccoppiato

analisi **1D** di risposta sismica



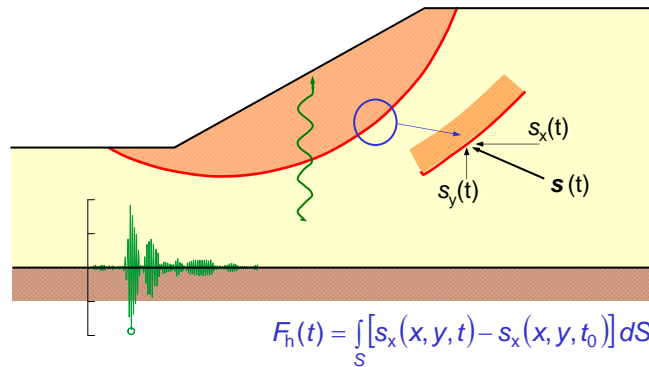
$$a_{eq}(t) \cdot \rho \cdot D \cdot dx = \tau(D, t) \cdot dx$$

accelerogramma equivalente
(dipende dal volume di terreno) →

$$a_{eq}(t) = \frac{\tau(D, t)}{\rho \cdot D} \cdot \frac{g}{g} = \frac{\tau(D, t)}{\sigma_v(D)} \cdot g$$

approccio disaccoppiato

analisi 2D di risposta sismica

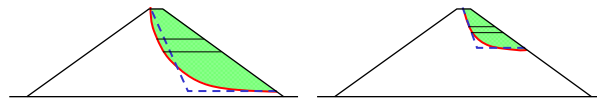


accelerogramma equivalente
(dipende dal volume di terreno)

$$\rightarrow a_{eq}(t) = \frac{F_h(t)}{m} \quad \text{Chopra (1966)}$$

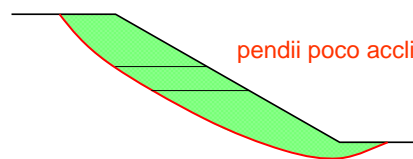
propagazione 1D

- si assumono forze di inerzia costanti in direzione orizzontale
larghezza orizzontale modesta rispetto all'altezza del pendio
(pendii acclivi, angolo immersione s.d.s. elevato in sommità)
- si trascurano i fenomeni di focalizzazione



propagazione 2D

- migliore descrizione della geometria pendio
- si portano in conto i fenomeni di focalizzazione
- variazione delle forze di inerzia in direzione orizzontale non trascurabile

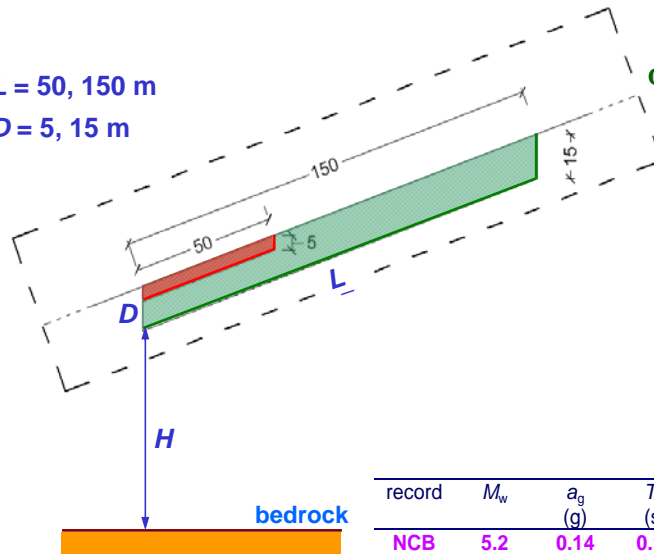


esempio pendio indefinito – propagazione 2D

$L = 50, 150 \text{ m}$

$D = 5, 15 \text{ m}$

$\alpha = 20^\circ$

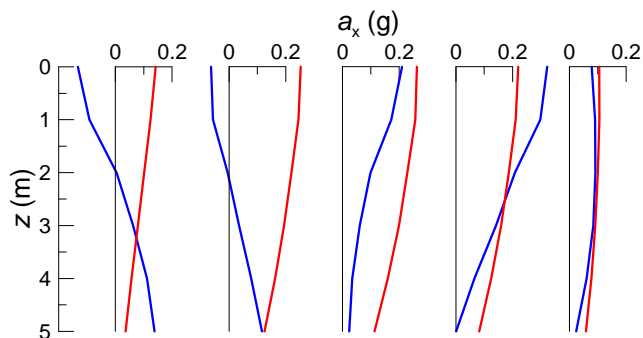


record	M_w	a_g (g)	T_m (s)	D_s (s)	I_A (m/s)
NCB	5.2	0.14	0.13	4.1	0.10

profili di accelerazione istantanea

effetto rigidità terreno

NCB
 $L = 50 \text{ m}$
 $D = 5 \text{ m}$
 $H = 15 \text{ m}$

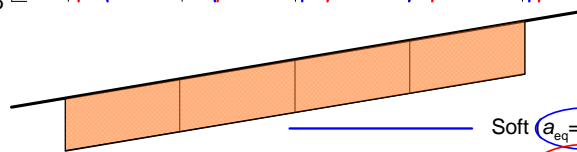


dep. rigido

- acc. stesso verso

dep. deformabile

- acc. verso opposto fra monte e valle



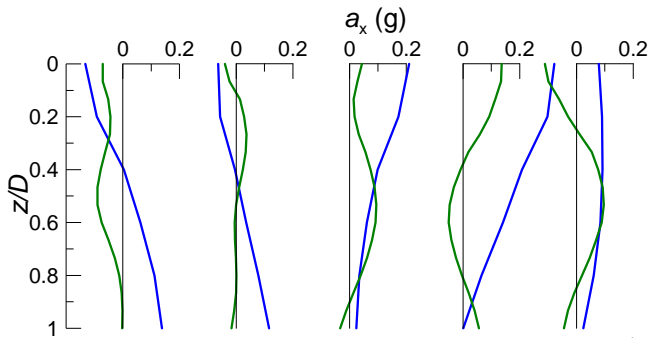
Soft ($a_{eq}=0.07g$; $t=1.06s$)

Stiff ($a_{eq}=0.13g$; $t=1.63s$)

profili di accelerazione istantanea

effetto volume di terreno instabile

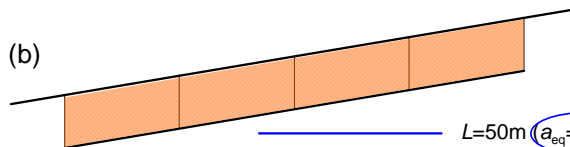
NCB
H = 15 m



al crescere di L e D

- asincronicità anche in direzione verticale

(b)

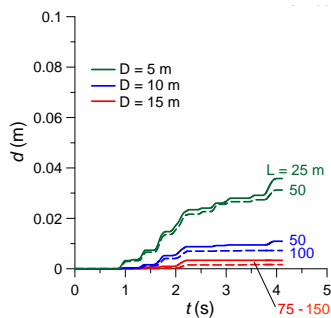


— L=50m ($a_{eq}=0.07g$, $t=1.06s$) D = 5 m

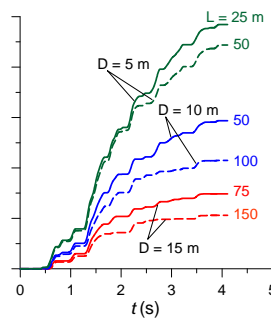
— L=150m ($a_{eq}=0.02g$, $t=1.15s$) D = 15 m

effetto dimensioni del corpo di frana

dep. deformabile



dep. rigido



$K_c = \text{cost} = 0.015$

a parità di resistenza

- rigidità terreno: d è maggiore per i pendii in terreni rigidi
- dimensioni corpo di frana: d decresce al crescere di D e L

conclusioni

effetto sisma { azioni inerziali – durante l'evento sismico
riduzione resistenza – dopo il sisma

prestazione sismica del pendio → correlata agli spostamenti permanenti indotti dal sisma

condizioni sismiche: previsione del comportamento → metodo degli spostamenti o analisi dinamica → deformazioni permanenti

effetti indotti → rapporto tra lunghezze d'onda dell'azione sismica e dimensioni del volume di terreno instabile:

- volumi deformabili estesi e con s.d.s. profonde, sollecitati da azioni con frequenze elevate → **moto asincrono** → **minori spostamenti**
- volumi rigidi di piccole dimensioni e con s.d.s. superficiali, sollecitati da azioni con basse frequenze → **moto sincrono** → **maggiori spostamenti**



S. RAMPELLO

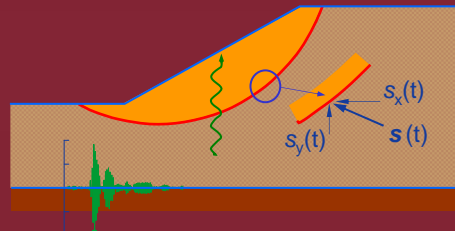
Effetti sismici locali e modelli geotecnici Brescia 20/11/2014

comportamento dei pendii in condizioni sismiche

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CIVILE E INDUSTRIALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Sebastiano Rampello

Ordinario di Fondazioni e opere di sostegno
sebastiano.rampello@uniroma1.it