

**PROGETTAZIONE GEOTECNICA  
SECONDO LE NORME TECNICHE  
PER LE COSTRUZIONI  
D.M. 14.01.2008**

**opere di sostegno a gravità**

# sommario

## opere di sostegno a gravità

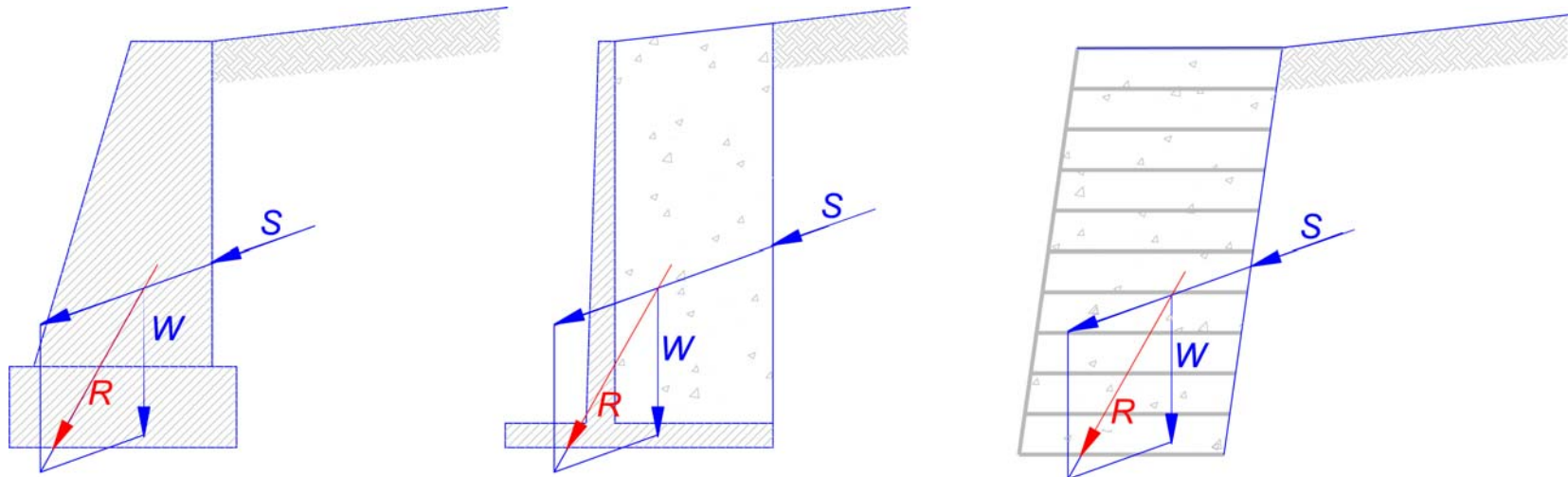
- **richiami sul funzionamento statico**
- **introduzione ai metodi pseudostatici**
- **valutazione coefficienti sismici**
- **verifiche**
- **metodi degli spostamenti**

## opere di sostegno a gravità

trasferiscono le spinte in fondazione componendole con il peso proprio

**azioni:** spinta in condizioni di equilibrio limite attivo

**resistenze:** carico limite fondazione



## opere di sostegno a gravità

vengono realizzate dopo l'esecuzione dello scavo

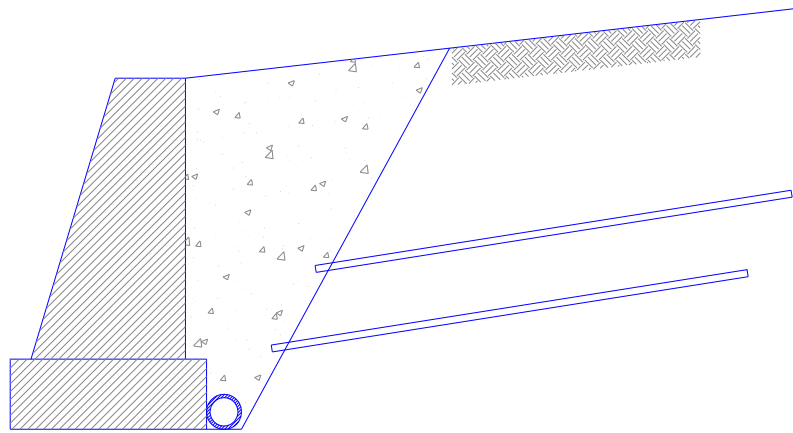
possibilità di realizzare interventi di drenaggio

pressioni interstiziali assenti

possibilità di modificare il terrapieno

terrapieno omogeneo

terreni a grana grossa



# coefficienti parziali NTC sulle azioni

$\gamma_F$  oppure  $\gamma_E$

carichi		$\gamma_F$ ( $\gamma_E$ )	EQU	A1 STR	A2 GEO
permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.9	1.0	1.0
	sfavorevoli		1.1	1.3	1.0
permanenti non strutturali	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3
variabili	favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3

## coefficienti parziali sulle proprietà meccaniche (parametri di resistenza)

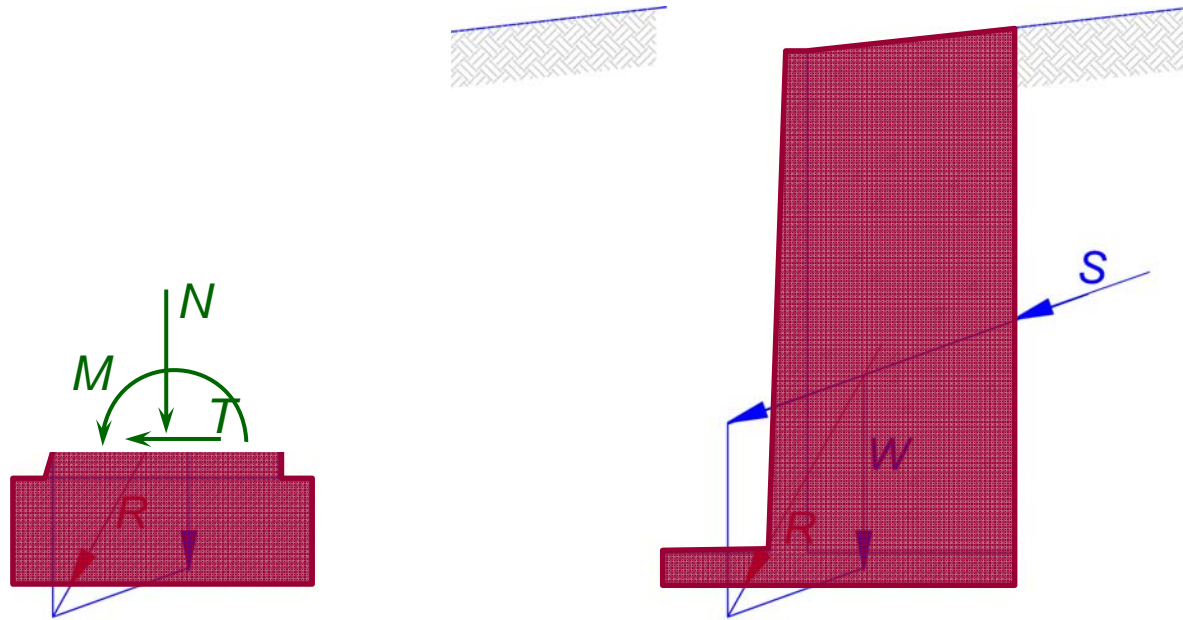
grandezza	$\gamma_M$	M1 (STR)	M2 (GEO)
$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1.0	1.25
$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
$C_{uk}$	$\gamma_{Cu}$	1.0	1.4
$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.0	1.0

## approcci di progetto e coefficienti parziali

appr.	azioni permanenti	azioni variabili	proprietà $c', \varphi' (C_u)$	resistenze
1 C1	1.3	1.5	1.0	1.0
1 C2	1.0	1.3	1.25 (1.4)	$\gamma_R$
2	1.3	1.5	1.0	$\gamma_R$

$\gamma_R$  dipende dal tipo di opera

# verifiche opere di sostegno a gravità



verifiche globali (GEO)

verifiche locali (STR)





# verifiche opere di sostegno a gravità

## APPROCCIO 1

combinazione 2: A2+M2+R2

GEO

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.3 \quad \gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = 1.25 \quad \gamma_{Cu} = 1.4$$

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.0 \quad \text{in condizioni sismiche}$$

$$\gamma_R = 1.0$$

combinazione 1: A1+M1+R1

STR

$$\gamma_{G1} = 1.3 \quad \gamma_Q = 1.5 \quad \gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = \gamma_{Cu} = 1$$

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.0 \quad \text{in condizioni sismiche}$$



# verifiche opere di sostegno a gravità

## APPROCCIO 2

combinazione A1+M1+R3

$$\gamma_{G1} = 1.3 \quad \gamma_Q = 1.5 \quad \gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = \gamma_{Cu} = 1.0$$

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.0 \quad \text{in condizioni sismiche}$$

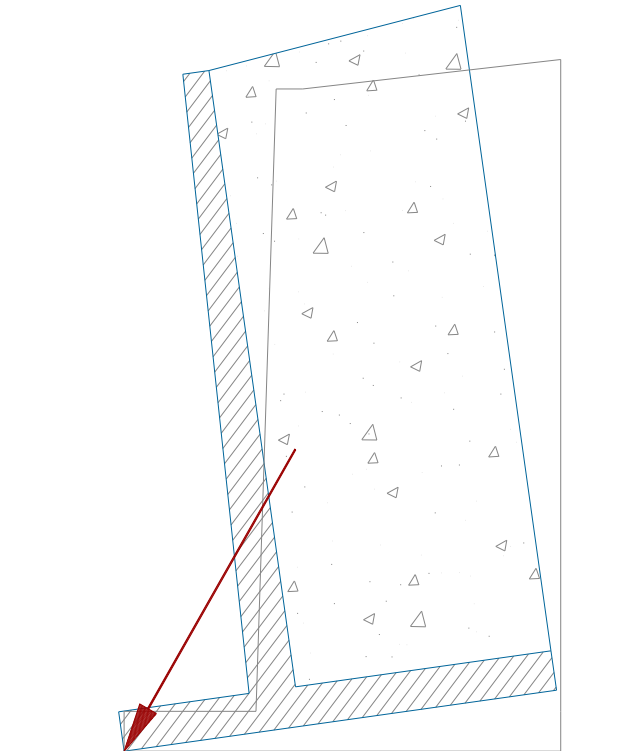
$$\left. \begin{array}{l} \gamma_R = 1.4 \quad \text{carico limite} \\ \gamma_R = 1.1 \quad \text{scorrimento} \end{array} \right\} \text{GEO}$$

$\gamma_R$  non compare nelle verifiche STR



# verifica al ribaltamento → combinazione EQU

- meccanismo poco realistico
- non si mobilita la resistenza del terreno di fondazione



**EQU + M2** ( $\gamma_{\varphi} = \gamma_c = 1.25$ )

carichi		$\gamma_F (\gamma_E)$	EQU
permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.9
	sfavorevoli		1.1
permanenti non strutturali	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.0
	sfavorevoli		1.5
variabili	favorevoli	$\gamma_{G3}$	0.0
	sfavorevoli		1.5



## opere di sostegno

le azioni sono prodotte dal terreno

**azioni sismiche** in generale:  
 $a = f(\text{spazio}, \text{tempo}) = f(x, y, z, t)$

### metodo pseudo-statico

accelerazione costante **nello spazio** e **nel tempo**

$a_{ps} = k g$        $k = a_{ps}/g$  è il **coefficiente sismico**

NTC:       $k_h = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{a_{\max}}{g} \leq \frac{a_{\max}}{g}$

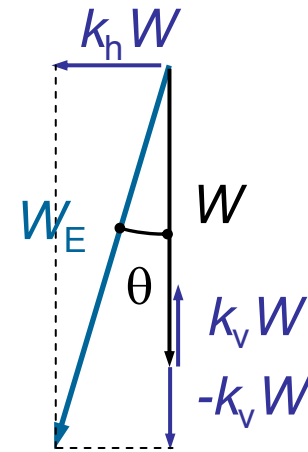
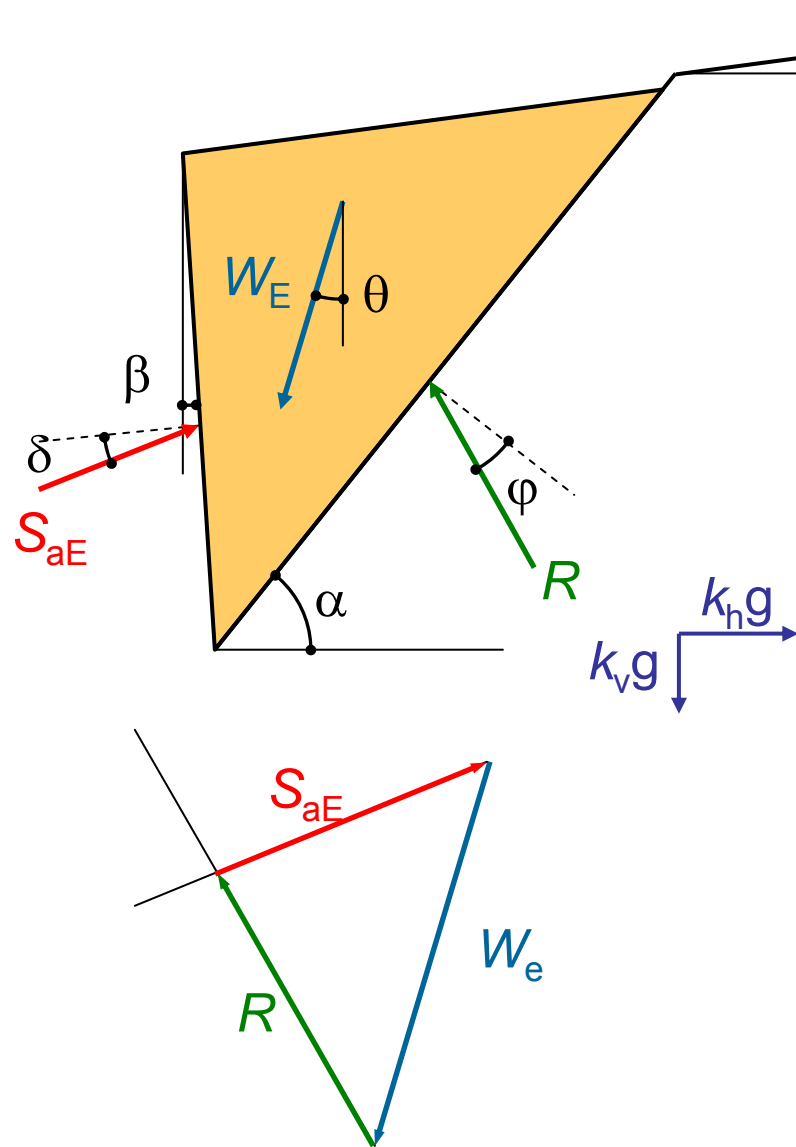
$\alpha \rightarrow$  variabilità nello spazio

$\beta \rightarrow$  variabilità nel tempo

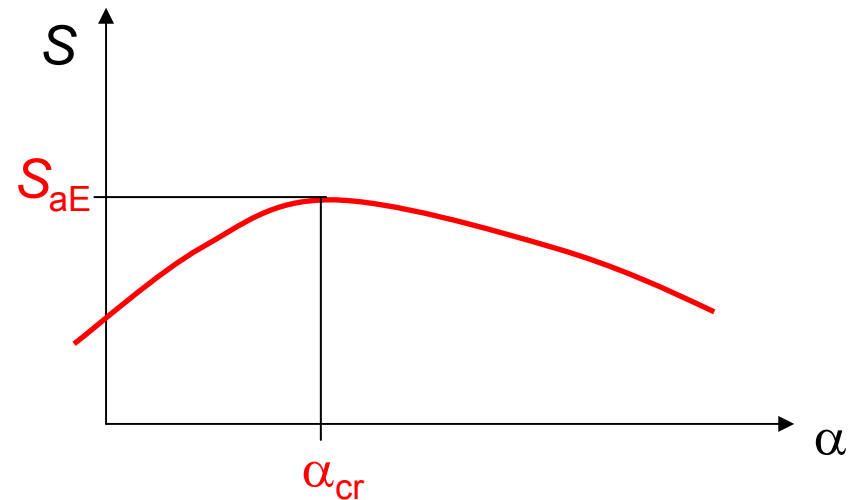
$$F = m \cdot a = (m \cdot g) \cdot \frac{a}{g} = k \cdot W$$



# metodo pseudo-statico di Mononobe – Okabe – spinta attiva estensione del metodo di Coulomb



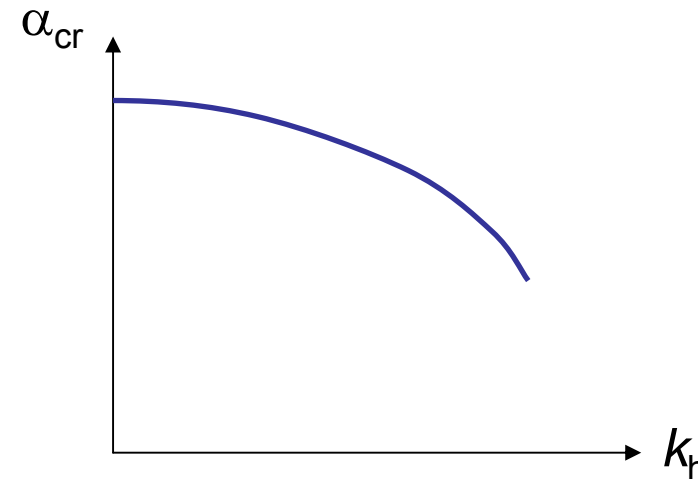
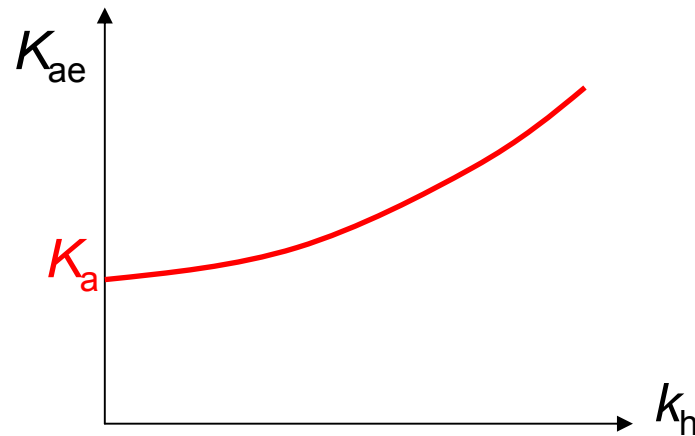
$$\theta = \arctan \frac{k_h}{1 - k_v}$$



# metodo pseudo-statico di Mononobe – Okabe – spinta attiva

$$S_{aE} = \frac{1}{2} \gamma \cdot (1 - k_v) \cdot H^2 \cdot K_{aE}$$

$$K_{aE} = f(\varphi', \theta, \delta, \beta, \varepsilon)$$



$$K_{aE} = \frac{\cos^2(\varphi - \beta - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \varepsilon - \theta)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(\varepsilon - \beta)}} \right]^2}$$

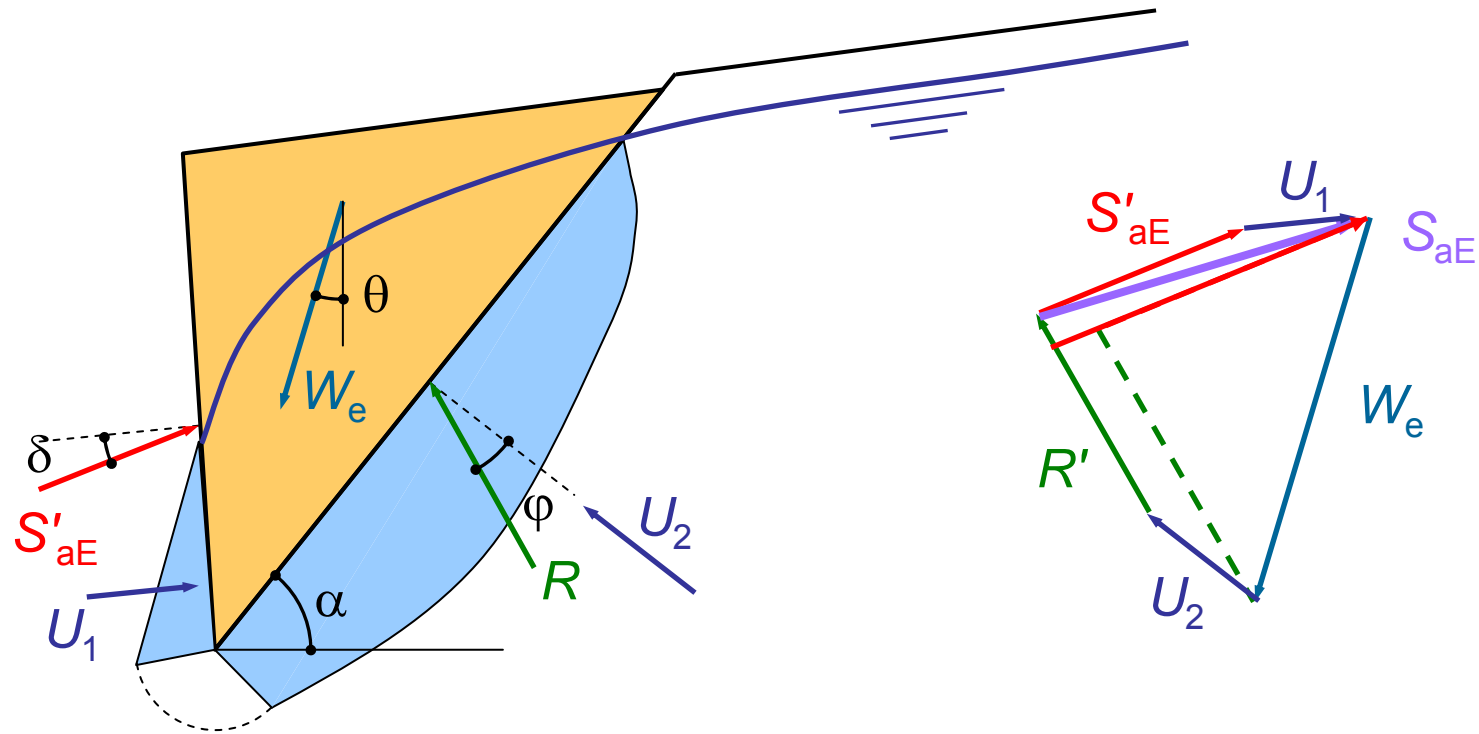
$$\alpha_{cr} = (\varphi - \theta) + \arctan \left[ \frac{\left\{ \tan a (\tan a + \cot b) [1 + \tan(\delta + \beta + \theta) \cot b] \right\}^{\frac{1}{2}} - \tan a}{1 + \tan(\delta + \beta + \theta) (\tan a + \cot b)} \right]$$

$$a = \varphi - \varepsilon - \theta$$

$$b = \varphi - \beta - \theta$$



# metodo di Mononobe – Okabe effetto delle pressioni interstiziali



attenzione: l'incremento di spinta è dovuto principalmente a  $U_2$

metodo pseudo-statico - valori di  $k_h$

D.M. 16.1.96       $k_h = C$       coefficiente d'intensità sismica  
 $k_v = 0$        $C = 0.04, 0.07, 0.1$

NTC

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad \alpha_m = 1 \quad k_v = \pm 0.5 k_h$$

$a_{\max}$  accelerazione massima orizzontale  
→ analisi di risposta sismica locale

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

$a_g$  accel. max affioramento rigido  
 $S_S$  amplificazione stratigrafica  
 $S_T$  amplificazione topografica



NTC  $k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{\max}}{g}$

valori di  $\beta_m$

---

categoria di sottosuolo

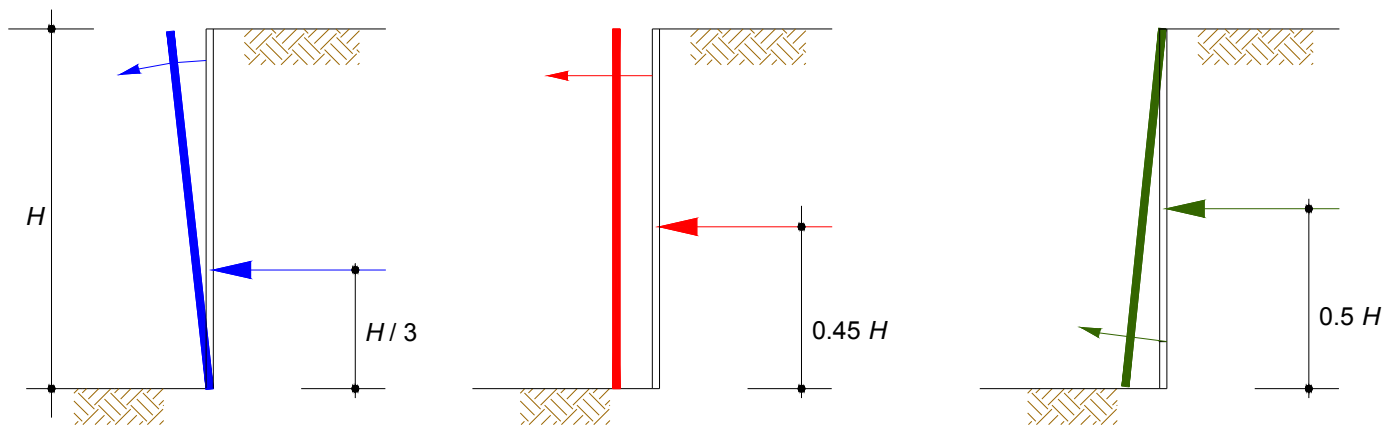
$a_g/g$	A	B, C, D
0.2 - 0.4	0.31	0.31
0.1 - 0.2	0.29	0.24
$\leq 0.1$	0.20	0.18

valori di  $\beta_m$  basati su un'equivalenza con il metodo degli spostamenti

per muri con spostamento impedito

$$\beta_m = 1 \Rightarrow k_h = a_{\max}/g$$

## punto di applicazione della risultante



Ishibashi & Fang (1987), Richards & Elms (1992)

NTC:

punto di applicazione incremento spinte  $\Delta S_{aE} = S_{aE} - S_a$

- come per le azioni statiche se l'opera può ruotare intorno al piede
- $0.5 \cdot H$  negli altri casi

azioni inerziali applicate nel baricentro dell'opera

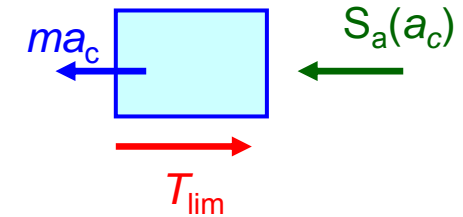
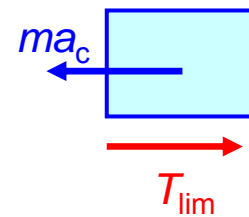
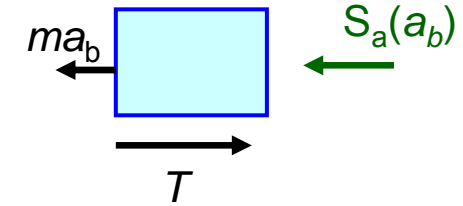
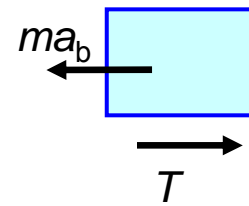
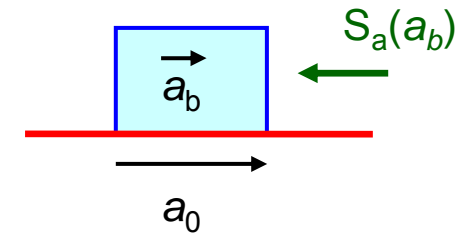
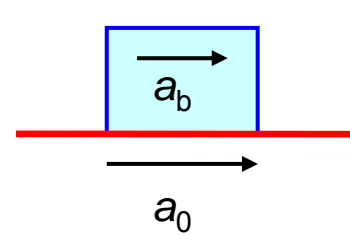
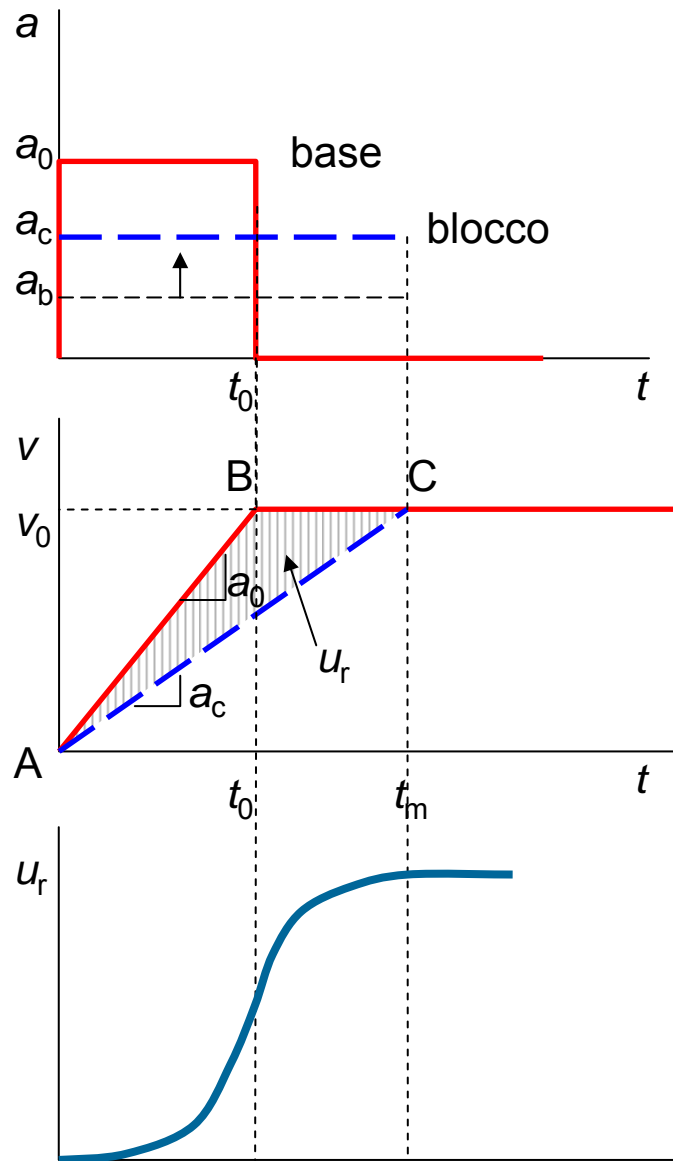
## NTC: intensità e prestazione commisurate alla frequenza dell'evento

periodo di ritorno	intensità	prestazione
$T_R = \frac{1}{\lambda_R} = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$		
elevato (evento raro)	alta	anche modesta (SLU)
basso (evento frequente)	bassa	buona (SLE)

**definire la prestazione**



NTC 7.11.6.2.1 "la verifica nei confronti del collasso per scorrimento può anche essere eseguita con il metodo degli spostamenti..."

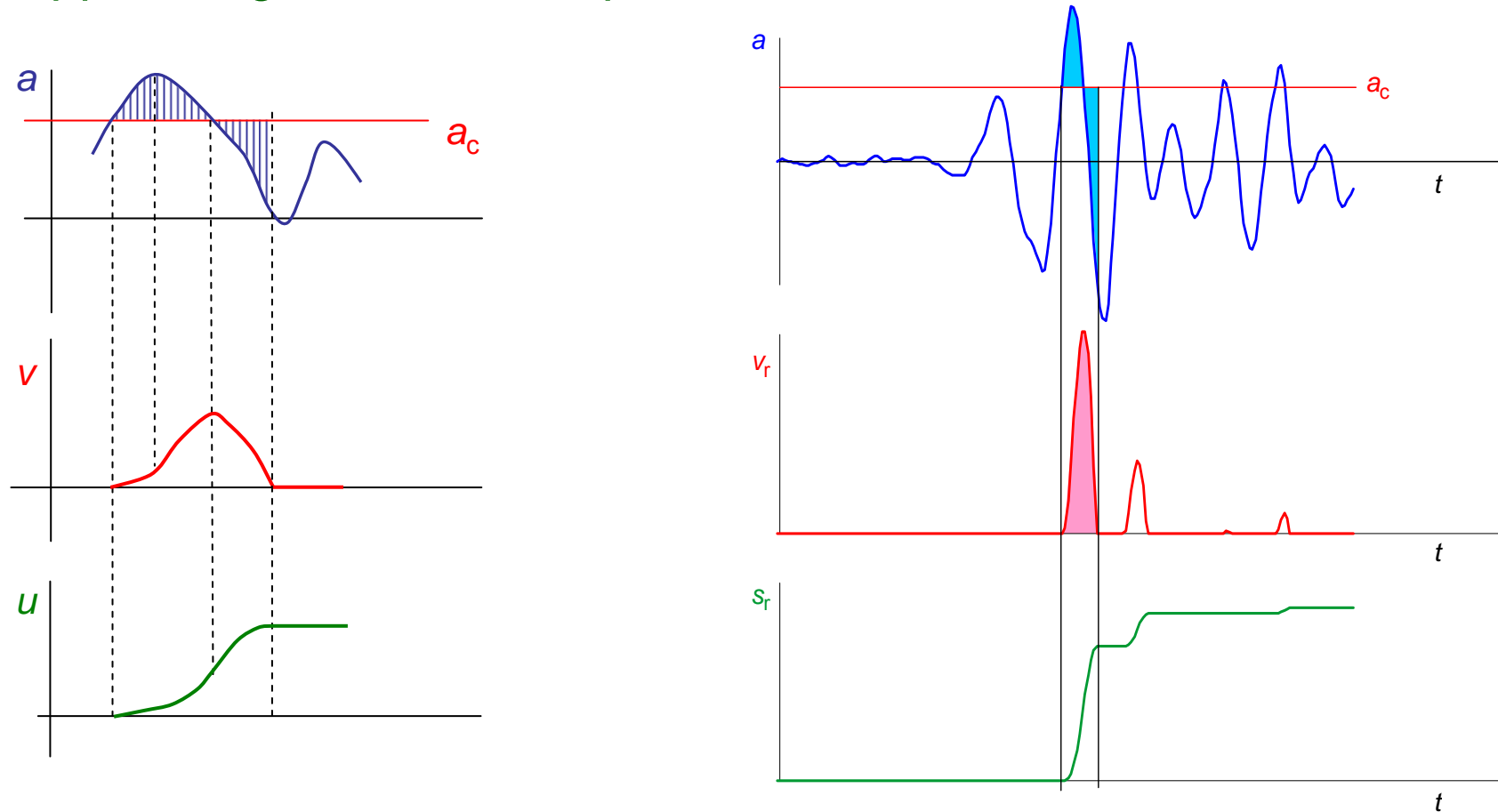


$$m \cdot a_c = T_{lim}$$

$$m \cdot a_c + S(a_c) = T_{lim}$$

## metodo degli spostamenti

- valutazione dell'accelerazione critica  $a_c = k_c g$  (traslazione)
- doppia integrazione dell'equazione del moto relativo



**è necessario conoscere  $a(t)$**



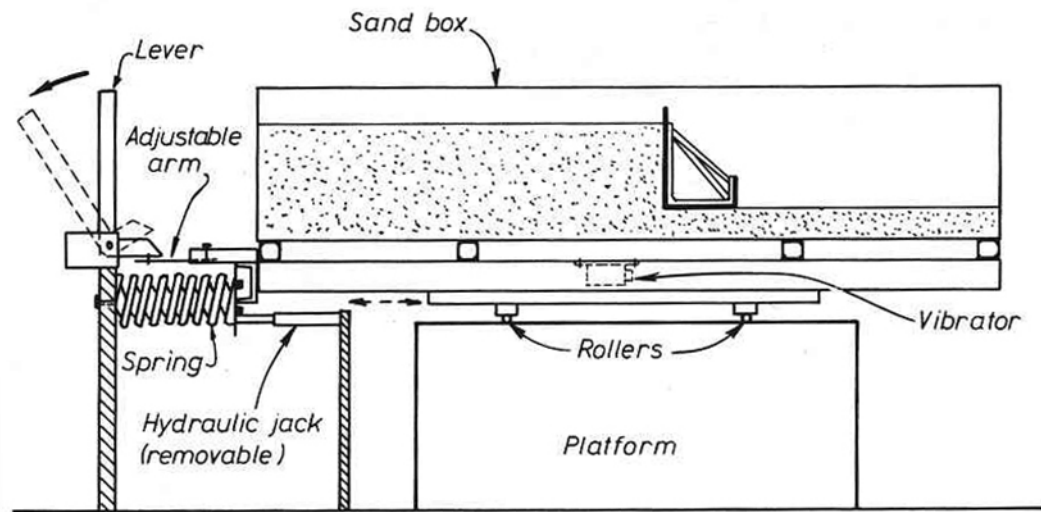
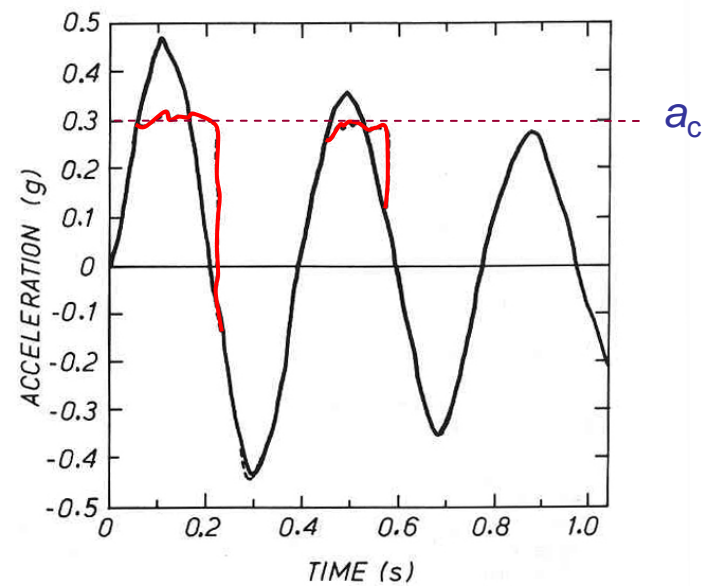
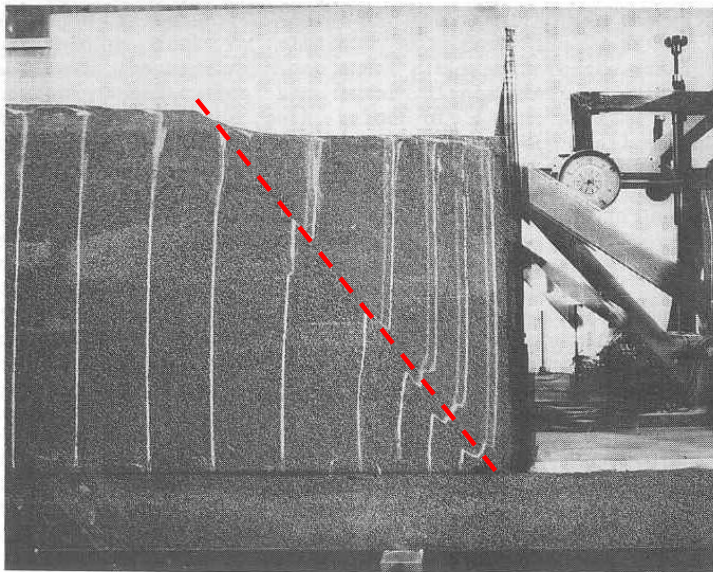


Figure 3. Experimental Set-up



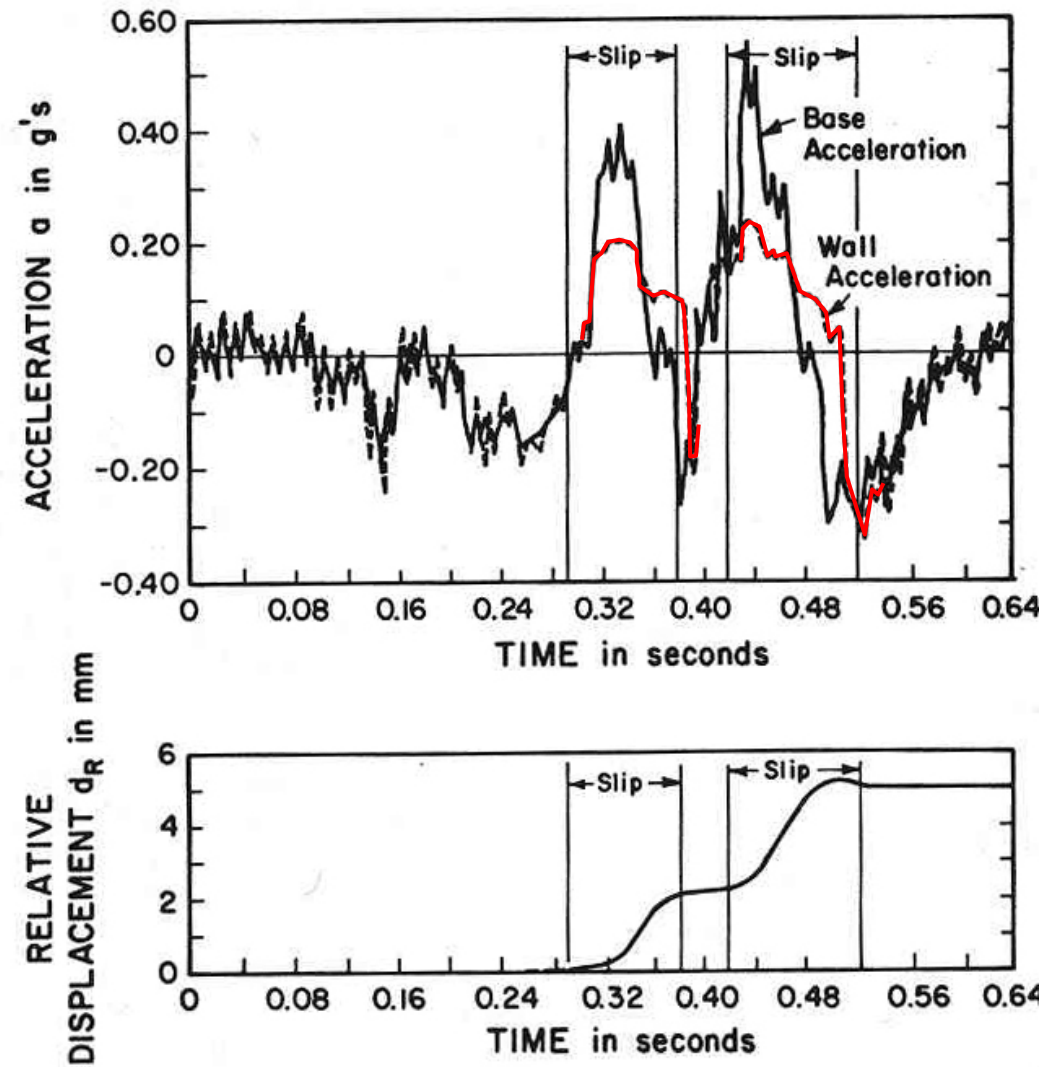
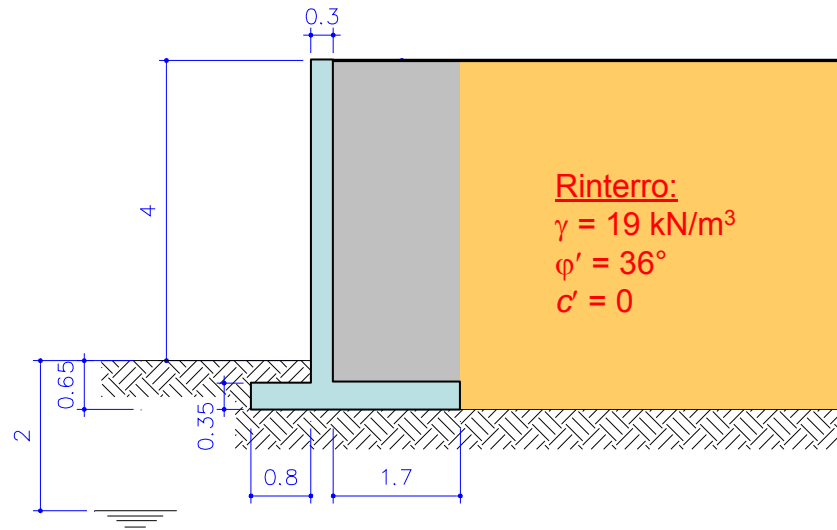


Figure 3 Accelerations and slip during shaking table tests by Lai. (adapted from Jacobson, 1980.)

# esempio: muro di sostegno a mensola



Terreno in posto:  
Limo deb. argilloso  
normalmente  
consolidato

$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$   
 $\phi' = 27^\circ$   
 $c' = 5 \text{ kPa}$

**terreno tipo D**

$a_{\max} = 0.34 \text{ g}$   
 $\beta_m = 0.31 \rightarrow k_h = 0.105$   
 $k_v = 0$

## verifiche allo scorrimento

### Condizioni statiche DM 88

$K_a = 0.26$   
 $S_a = 53.3 \text{ kN/m}$   
 $W = W_m + W_t = 56.8 + 138.9 = 195.7 \text{ kN/m}$

$$F_T = \frac{W \tan \phi'}{S_a} = \frac{195.7 \tan 27^\circ}{53.3} = 1.87 > 1.3$$

### Condizioni statiche NTC:

$K_{ad} = 0.331$   
 $S_a = 68 \text{ kN/m}$   
 $W = W_m + W_t = 56.8 + 138.9 = 195.7 \text{ kN/m}$

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{W \tan \phi'_d}{S_{ad}} = \frac{195.7 \tan 22.2^\circ}{68} = 1.17$$

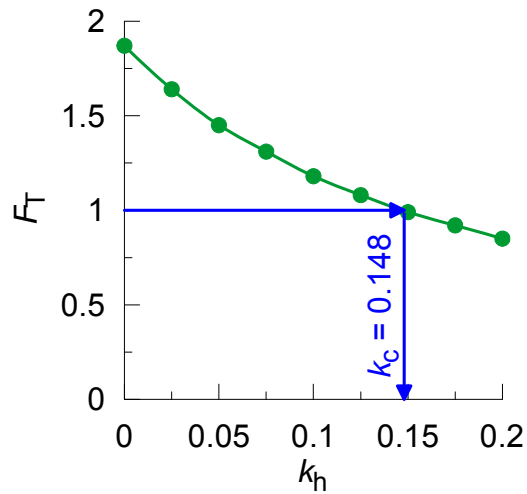
### Condizioni sismiche NTC (DA1 C2):

$K_{aEd} = 0.367$   
 $S_{aEd} = 75.3 \text{ kN/m}$   
 $k_h W = 0.105 \cdot 195.7 = 20.5 \text{ kN/m}$

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{W \tan \phi'_d}{S_{aEd}(k_h) + k_h W} = \frac{195.7 \tan 22.2^\circ}{75.3 + 20.5} = 0.83$$

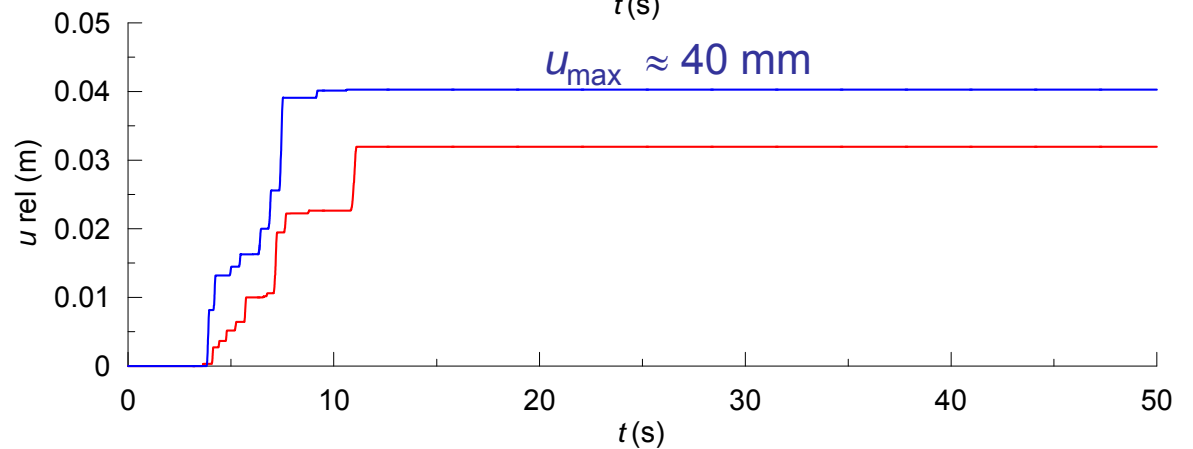
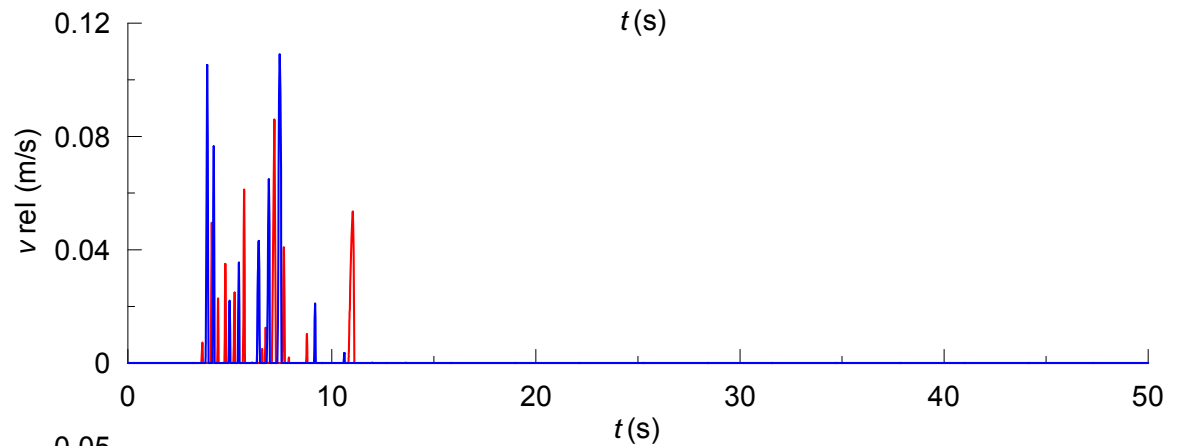
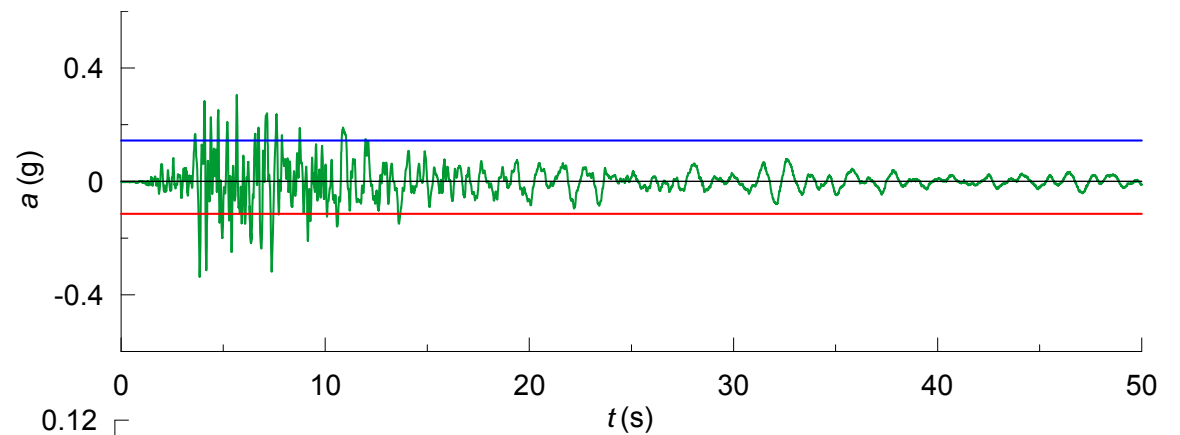






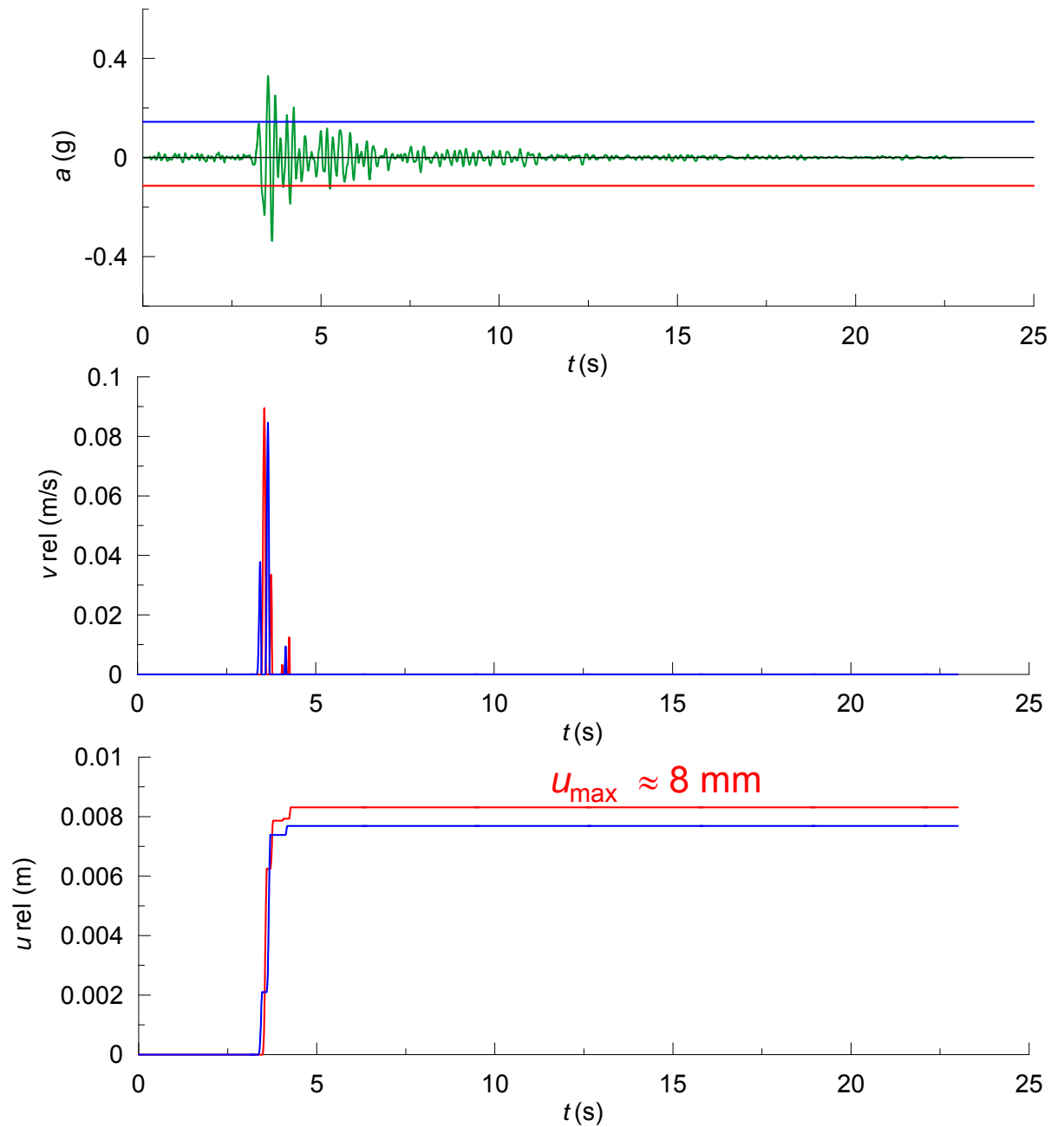
terremoto dell'Umbria  
(Castelnuovo-Assisi)  
su terreno deformabile  
 $a_{\max} = 0.105 \text{ g}$

scalato a:  
 $a_{\max} = 0.34 \text{ g}$   
fattore di scala: 3.2



terremoto dell'Umbria  
(registrazione di Assisi)  
 $a_{\max} = 0.15 \text{ g}$

scalato a:  
 $a_{\max} = 0.34 \text{ g}$   
fattore di scala: 2.3



procedure semplificate basate sul metodo degli spostamenti

## Newmark (1965)

$$u_r = \frac{v_{\max}^2}{2g \cdot k_c} \left( 1 - \frac{k_c}{k_{\max}} \right) \frac{k_{\max}}{k_c}$$

## Franklin & Chang (1977)

integrazione di 169 accelerogrammi

## Richards & Elms (1979)

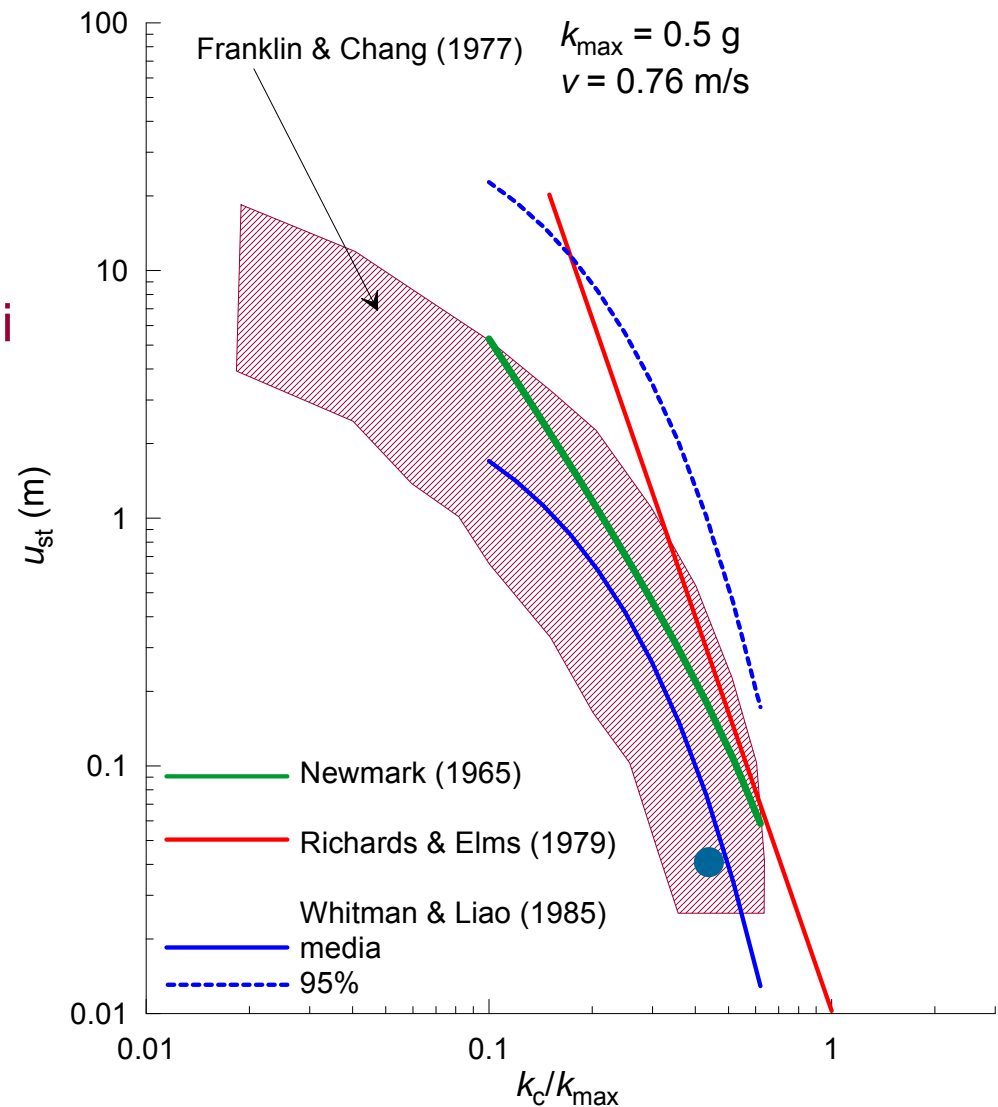
$$u = 0.087 \frac{v_{\max}^2}{a_{\max}} \cdot \left( \frac{a_{\max}}{a_c} \right)^4$$

## Whitman & Liao (1985)

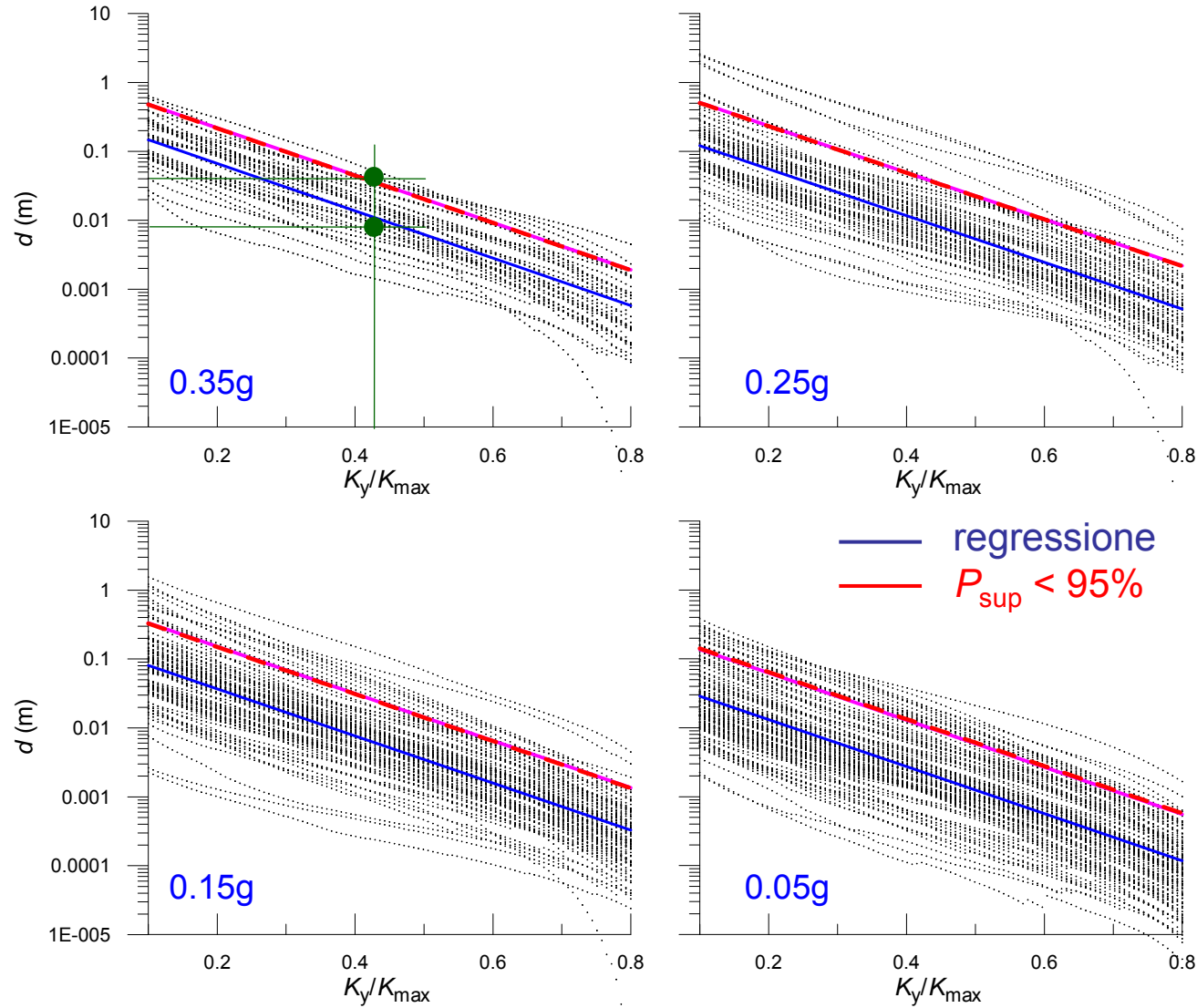
$$u_E = 37 \frac{v_{\max}^2}{a_{\max}} \exp\left(-\frac{9.4 a_c}{a_{\max}}\right)$$

$$u_{95} = \frac{v_{\max}^2}{a_{\max}} \exp\left(9.4 \left(0.66 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)\right)$$

$$v_{\max} = \frac{T_C}{2\pi} a_{\max} = \frac{C_C \cdot T_C^*}{2\pi} \cdot S_S \cdot S_T \cdot a_g$$



# integrazione database accelerometrico italiano



stiff soils

$$u = B \cdot e^{A \frac{k_c}{k_{max}}}$$

Rampello, Callisto e Fargnoli (2006)

spostamenti calcolati utilizzando i valori caratteristici dei parametri di resistenza  $\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = \gamma_{Cu} = 1$

metodo degli spostamenti - valutazione del livello di danno

“...la scelta dei valori limite di spostamento deve essere effettuata e opportunamente motivata dal progettista”

PIANC (2001)

	livello di danno	$u/H$ (%)
I	ammissibile	< 1.5
II	riparabile	1.5 - 5
III	prossimo al collasso	5 - 10
IV	collasso	> 10

Huang et al (2009):  $u/H < 2 - 5\%$

esempio precedente:

$$u/H = 0.040 / 4.65 = 0.86 \%$$



## NTC: Stati Limite Ultimi (SLU)

### SLV (salvaguardia della vita)

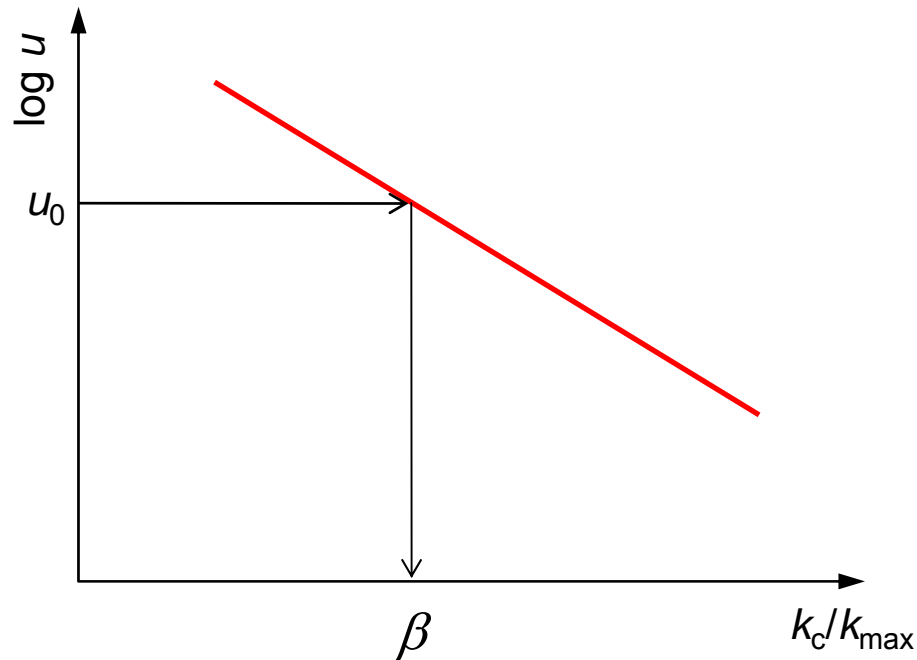
“la costruzione subisce (...) significativi danni dei componenti strutturali (...) conserva invece un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali”

### SLC (prevenzione del collasso)

“la costruzione subisce (...) danni molto gravi dei componenti strutturali (...) conserva invece un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali”



## equivalenza tra metodo pseudo-statico e metodo degli spostamenti



valori di $\beta_m$		
categoria di sottosuolo		
$a_g/g$	A	B, C, D
0.2 - 0.4	0.31	0.31
0.1 - 0.2	0.29	0.24
$\leq 0.1$	0.20	0.18

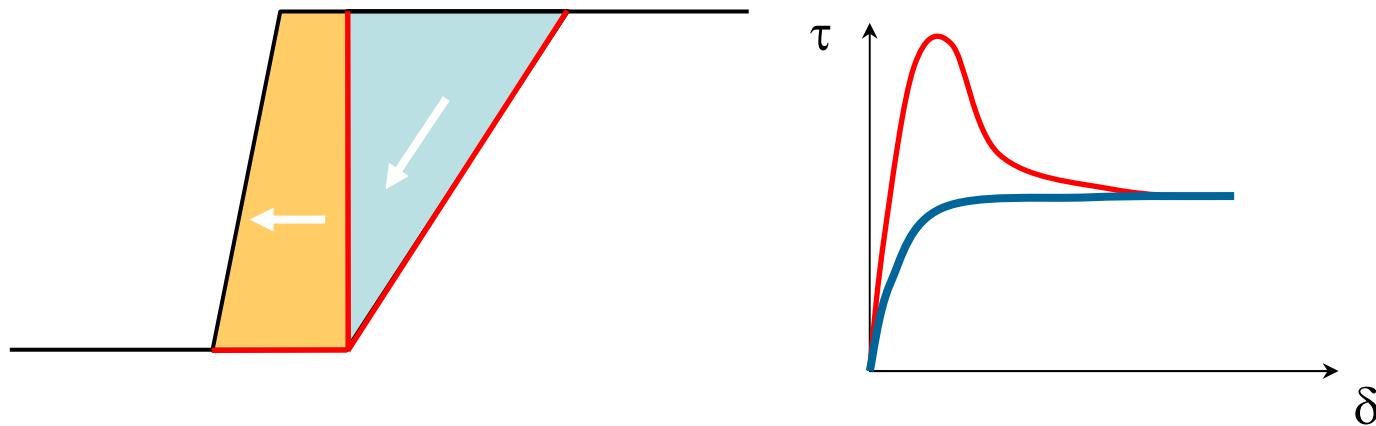
progettando con  $k_h = k_c = \beta \cdot k_{\max}$  e con  $F = 1$   
 si otterrà (al più)  $u = u_0$

$$u = B \cdot e^{A \frac{k_c}{k_{\max}}}$$

$$\beta = \frac{k_c}{k_{\max}} = \frac{1}{A} \ln \frac{u}{B}$$

si ammette che possano verificarsi spostamenti

- in condizioni sismiche ( $\beta < 1$ )
- in condizioni statiche ( $K_a$ )



è necessario che il comportamento sia **duttile**  
→ scelta parametri di resistenza

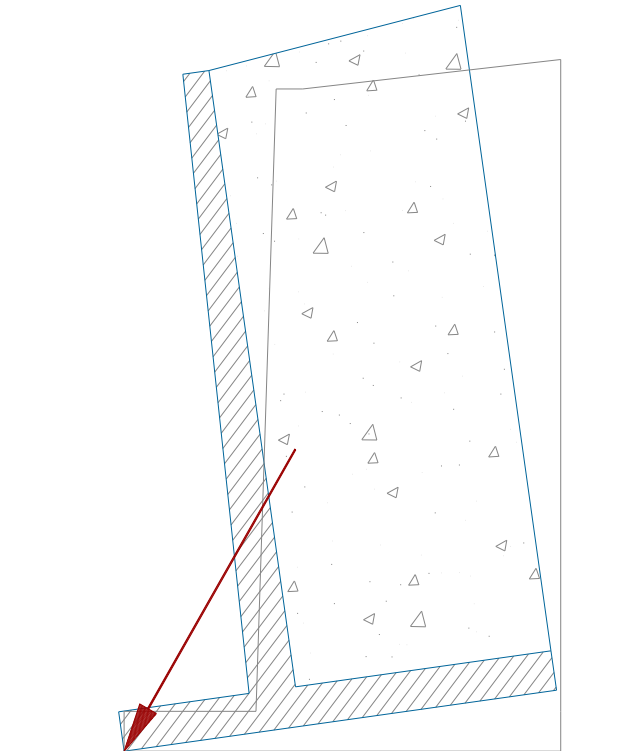




# verifica al ribaltamento → combinazione EQU

- meccanismo poco realistico
- non si mobilita la resistenza del terreno di fondazione
- **meccanismo fragile**

**EQU** + M2 ( $\gamma_{\phi} = \gamma_c = 1.25$ )



carichi		$\gamma_F (\gamma_E)$	EQU
permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.9
	sfavorevoli		1.1
permanenti non strutturali	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.0
	sfavorevoli		1.5
variabili	favorevoli	$\gamma_{G3}$	0.0
	sfavorevoli		1.5

## stato limite di danno (SLD)

$P_{VR} = 63 \%$  azione sismica meno severa

è richiesta una prestazione migliore  
(spostamenti modesti)

- metodo degli spostamenti
- procedure semplificate
- metodo pseudo-statico con  $\beta = 1 \rightarrow u = 0$

