

Progetto RELUIS – DPC 2005-2008

Assemblea annuale 2006

SVILUPPI DELL'INGEGNERIA SISMICA A TRENT'ANNI DAL TERREMOTO DEL FRIULI

La ricerca applicata in Italia

Risultati del primo anno di progetto

Udine – 22-23 novembre 2006



Linea di ricerca 6

Metodi innovativi per
la progettazione di opere di sostegno e
la valutazione della stabilità dei pendii

**Linea di ricerca 6.2 - COSTRUZIONI IN SOTTERRANEO,
GALLERIE E CAVERNE IN ROCCIA**

Coordinatore: Giovanni Barla

Attività I anno

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno



**POLITECNICO DI
TORINO**

**Dipartimento di
Ingegneria Strutturale e
Geotecnica**



EUCENTRE

**Centro Europeo di Ricerca e
Formazione in Ingegneria
Sismica**



**POLITECNICO DI
MILANO**

**Dipartimento di
Ingegneria Strutturale**

Premessa

**Principali
obiettivi ed
argomenti**

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

PRINCIPALI OBIETTIVI

- Individuazione delle modalità di analisi progettuale da adottare per le opere in sotterraneo soggette ad un evento sismico
- Sviluppo di sistemi di monitoraggio atti a ridurre la vulnerabilità delle infrastrutture in sotterraneo
- Linee Guida

EFFETTI DEI TERREMOTI SULLE OPERE IN SOTTERRANEO

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

Dowding e Rozen (1978) hanno individuato tre livelli di danneggiamento causati dallo scuotimento per gallerie realizzate in roccia:

- Nessun danno: questo livello implica che ispezioni successive all'evento sismico non rivelano la formazione di apparenti nuove fessure o caduta di blocchi ($PGA < 0.19g$ - $PGV < 20$ cm/sec)
- Danno minore: questo livello comporta la caduta di blocchi e la formazione di nuove fessure ($0.19g < PGA < 0.5g$ - 20 cm/sec $< PGV < 90$ cm/sec)
- Danno: diffusa caduta di blocchi e formazione di nuove fessure con possibile collasso del cavo ($PGA > 0.5g$ - $PGV > 90$ cm/sec)



EFFETTI DEI TERREMOTI SULLE OPERE IN SOTTERRANEO

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

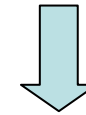
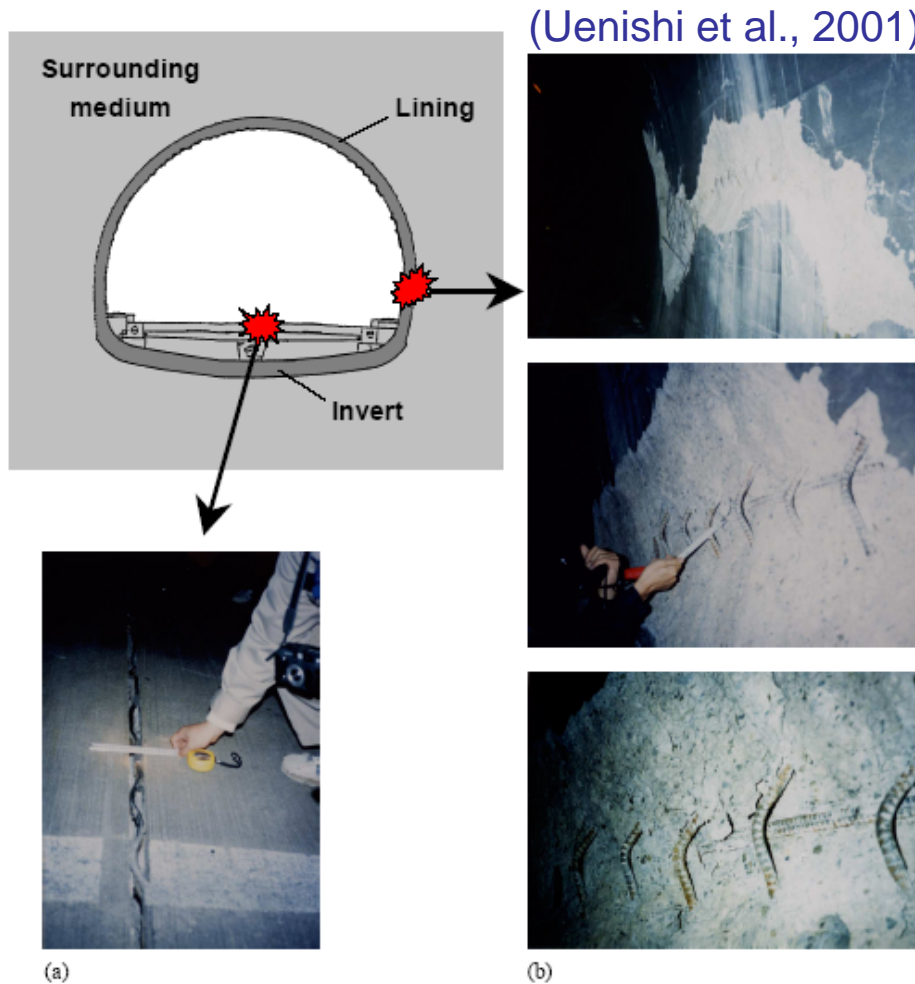
**Effetti dei
terremoti**

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno



**Effetti in prossimità di
Faglie Attive**

- a) Fessure in arco rovescio
- b) Sfogliettamento del rivestimento in parete e snervamento delle barre di armatura

CARATTERISTICHE DEL MOTO IN PROSSIMITÀ DELLA SORGENTE

- Condizioni di campo vicino → 20÷60 km dalla faglia → danno solo entro 10÷15 km
- Il moto del terreno in prossimità della sorgente è significativamente influenzato da:
 - ✓ Meccanismo di rottura
 - ✓ Direzione della rottura di propagazione rispetto al sito in esame
 - ✓ Spostamenti permanenti
- Il moto del terreno in prossimità della faglia è caratterizzato da:
 - ✓ Spostamento dinamico → propagazione delle onde
 - ✓ Spostamento permanente → componente statica

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

**Moto in
prossimità
della
sorgente**

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

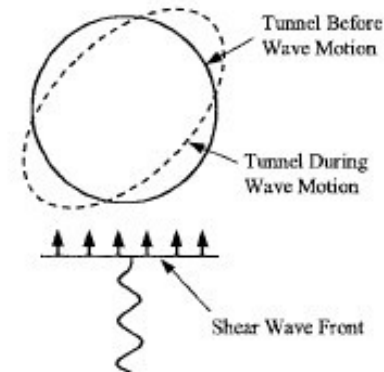
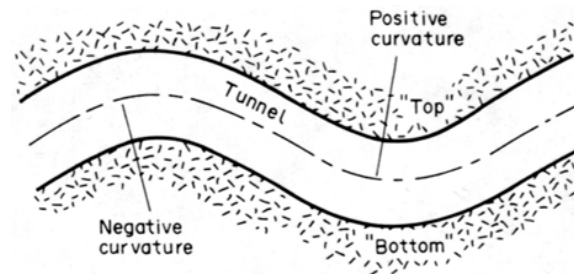
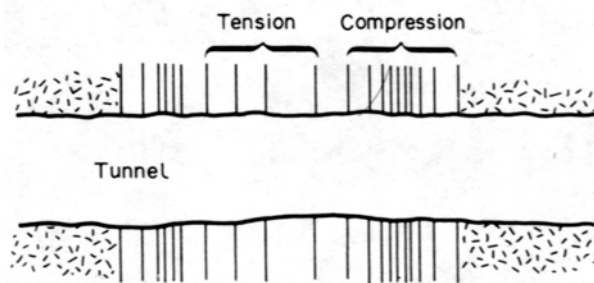
Prossimo
anno



COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Ai fini ingegneristici si può assumere che le opere sotterranee subiscano durante lo scuotimento tre modi di deformazione principale (Owen and Scholl, 1981):

- Compressione/estensione
- Flessione longitudinale
- Ovalizzazione della sezione trasversale



Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Premessa

Principali obiettivi ed argomenti

Effetti dei terremoti

Moto in prossimità della sorgente

Risposta dinamica semplificata

Risposta dinamica completa

Prossimo anno

Analisi sismica di gallerie in roccia

Approccio semplificato per la valutazione degli effetti indotti da un terremoto → incremento dello stato di sforzo nel rivestimento per effetto del terremoto (effetti di campo vicino, interazione terreno struttura)

Analisi della sezione trasversale (Ovalizzazione della sezione)

Condizioni di deformazioni piane 2D

Due condizioni di contatto all'interfaccia roccia rivestimento:

Scorrimento completo

Scorrimento impedito

$$\sigma_{r=R} = \sigma_R$$

$$\sigma_{r=R} = \sigma_R$$

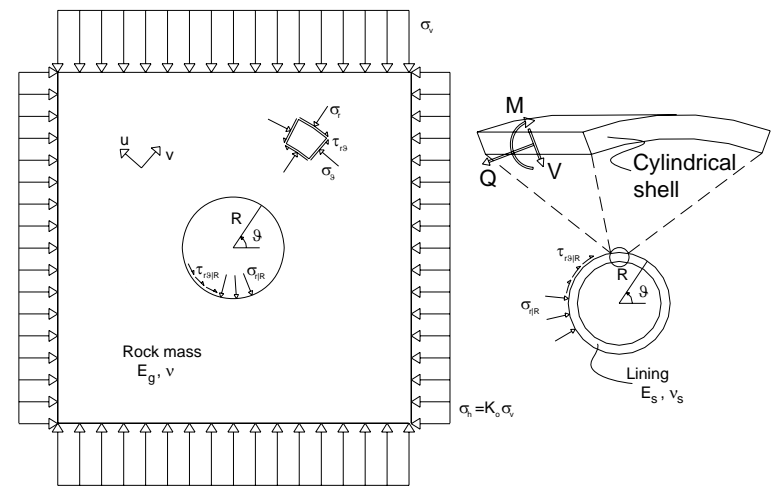
$$\tau_{r\theta} = 0$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{R\theta}$$

$$u = u_s$$

$$u = u_s$$

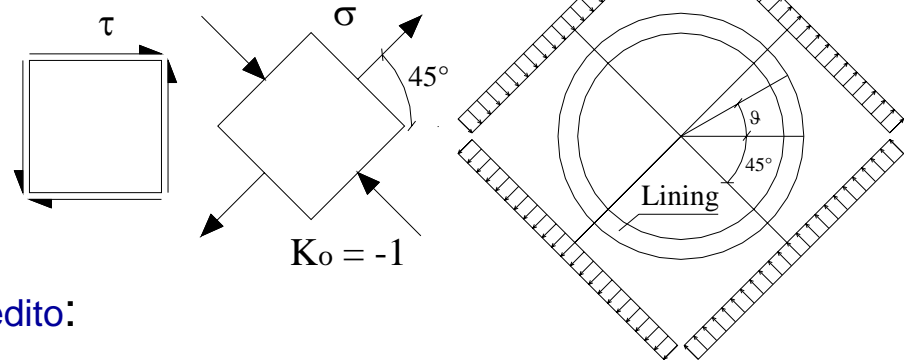
$$v = v_s$$



COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Analisi della sezione trasversale (Ovalizzazione della sezione)

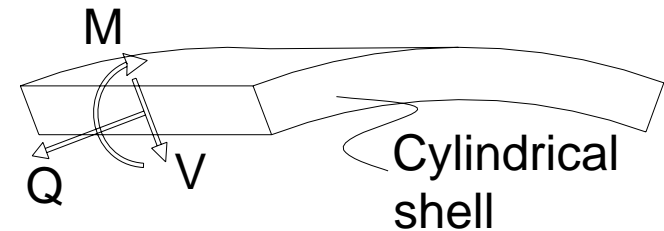
- L'effetto del terremoto è modellato applicando un campo di deformazione uniforme, in modo pseudo-statico, che simula una deformazione di taglio puro



- Condizione di scorrimento impedito:

$$Q = \frac{E_g}{2(1+\nu)} \gamma_{ff \max} R \left(1 - \frac{\delta}{3} \right) \cos 2 \left(\vartheta + \frac{\pi}{4} \right)$$

$$M = \frac{1}{2} \frac{E_g}{2(1+\nu)} \gamma_{ff \max} R^2 \left[1 + \frac{\delta}{3} + \varepsilon \right] \cos 2 \left(\vartheta + \frac{\pi}{4} \right)$$



Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

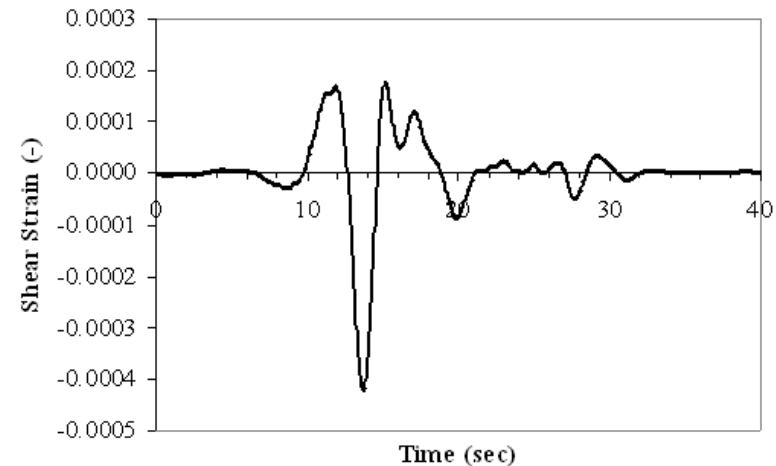
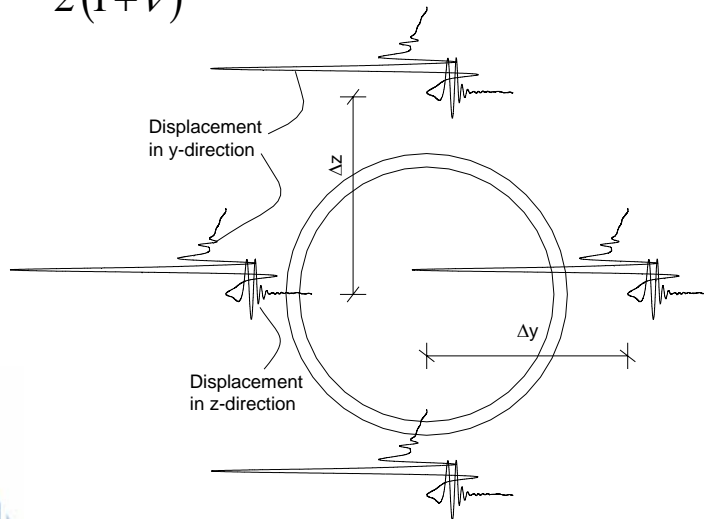
COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Analisi della sezione trasversale (Ovalizzazione della sezione)

- Deformazione tangenziale:

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \cong \frac{1}{2 \Delta z} [v(y_o, z_o + \Delta z) - v(y_o, z_o - \Delta z)] + \frac{1}{2 \Delta y} [w(y_o + \Delta y, z_o) - w(y_o - \Delta y, z_o)]$$

$$\sigma = \tau = \frac{E_g}{2(1+\nu)} \gamma_{ff \max}$$



Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

**Risposta
dinamica
semplificata**

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Analisi della sezione longitudinale (Deformazioni assiali e flessionali)

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

**Risposta
dinamica
semplificata**

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

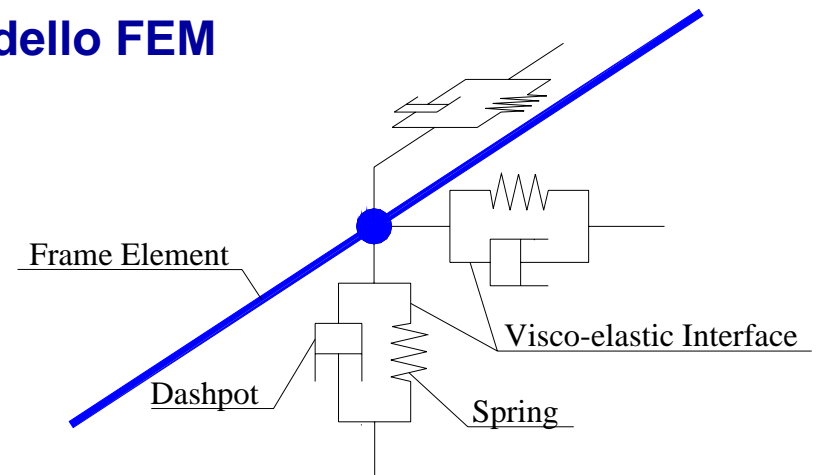
Elemento trave 3-D con
massa concentrata

- Molle e smorzatori in parallelo dipendenti dalla frequenza (i.e. modello Kelvin-Voigt)

- Input sismico:

Storie temporali di spostamento e velocità applicate agli elementi di interfaccia

Modello FEM



Elemento trave 3-D connesso al terreno circostante con elementi di interfaccia visco-elastici

COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Simulazione Numerica

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

**Risposta
dinamica
semplificata**

Risposta
dinamica
completa

Prossimo
anno

Terremoto di scenario:

- $M_W = 7$
- Faglia trascorrente (strike 0° - dip 90°)
- Lunghezza 24.5 km profondità 16.0 km

Parametri dell'ammasso roccioso:

- Modulo di Young 5,200 MPa
- Rapporto di Poisson 0.3
- Velocità dell'onda di taglio 1000 m/s

Galleria Circolare rivestita

- Modulo di Young 24,800 MPa
- Rapporto di Poisson 0.2
- Raggio esterno 3.15 m
- Spessore del rivestimento 30 cm
- Profondità 400 m
- Distanza dalla faglia 4 km
- Galleria in direzione parallela alla faglia

COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Premessa

Principali obiettivi ed argomenti

Effetti dei terremoti

Moto in prossimità della sorgente

Risposta dinamica semplificata

Risposta dinamica completa

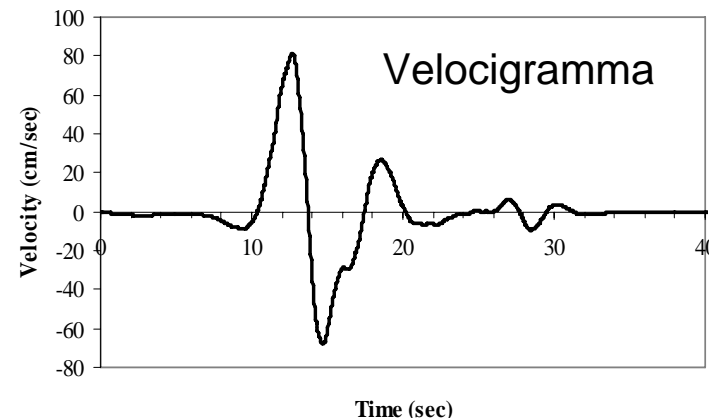
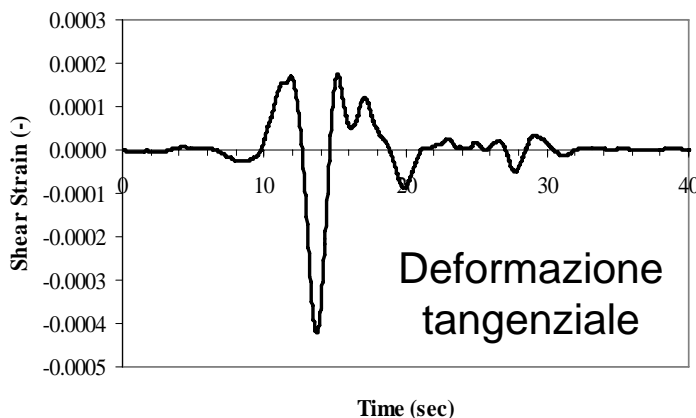
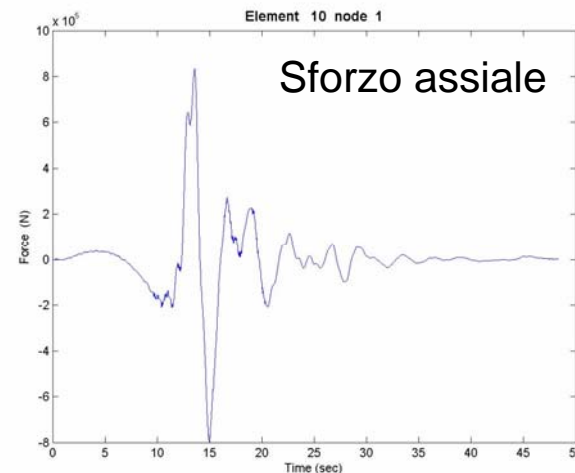
Prossimo anno

Risposta trasversale

C*	2.32	F*	3073	$\gamma_{cr,max}$	$4.22 \cdot 10^{-4}$
Full-slip condition			No-slip condition		
Analytical solution					
Q (kN/m)	M (kNm/m)	V (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	V (kN/m)
10.3	32.6	20.7	1857.4	29.4	18.6
Numerical solution					
66.2	35.1	23.2	2156.2	27.1	18.0

Risposta longitudinale

Axial force x-dir	Shear y-dir	Shear z-dir	Moment x-dir	Moment y-dir	Moment z-dir
(kN)	(kN)	(kN)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
840.4	11.4	13.4	0.0	77.2	66.8



COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Caso di studio – “Galleria Serro Montefalco” Linea ferroviaria Caserta Foggia

Progetto di opere sotterranee in condizioni sismiche:

- Caratterizzazione dell'ammasso roccioso
- Analisi statiche (FLAC)
- Definizione dell'input sismico
- Analisi dinamiche (Metodo Elementi Spettrali → approccio semi-analitico di Hisada e Bielak e Metodo di Riduzione dei Domini)

Sorgente sismica e propagazione ondosa
Metodo semianalitico 3D – Hisada e Blelak (2003)

Interazione terreno-struttura
Metodo Elementi Spettrali (Faccioli e al. 1997)



Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

**Risposta
dinamica
completa**

Prossimo
anno

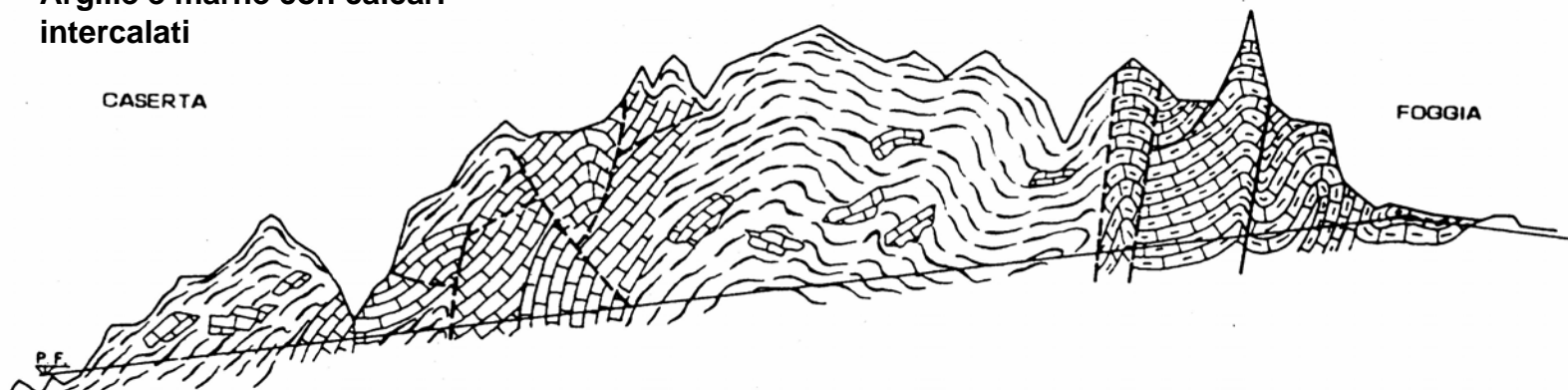
COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Caso di studio – “Galleria Serro Montefalco” Linea ferroviaria Caserta Foggia

Argille scagliose varicolori

Marne e calcari marnosi

Argille e marne con calcari
intercalati



Lunghezza 11.9 km – Profondità max 225 m

Formazioni geologiche complesse

Elevata sismicità

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

**Risposta
dinamica
completa**

Prossimo
anno

COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Caso di studio – “Galleria Serro Montefalco” Linea ferroviaria Caserta Foggia

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

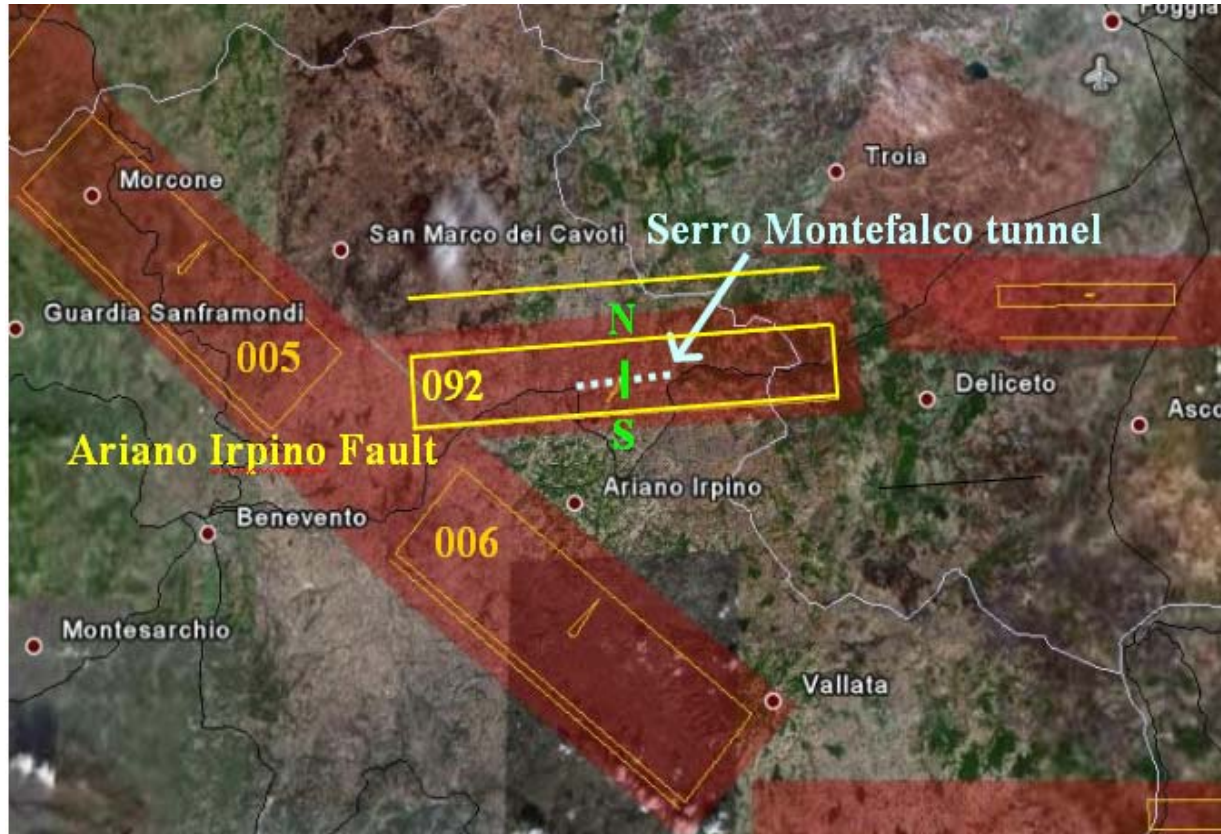
Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

**Risposta
dinamica
completa**

Prossimo
anno



COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GALLERIE

Caso di studio – “Galleria Serro Montefalco” Linea ferroviaria Caserta Foggia



Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

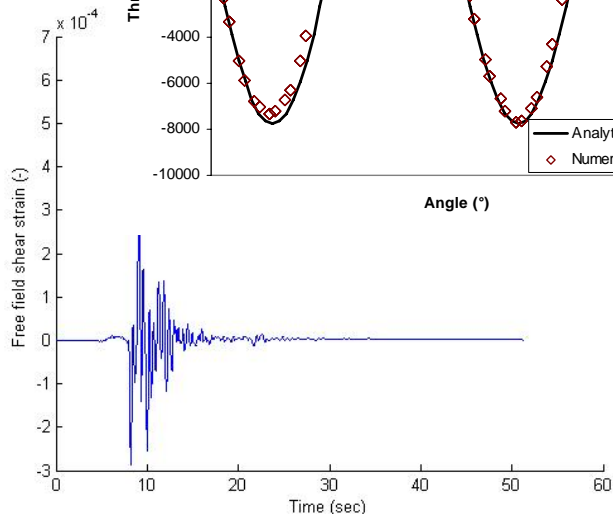
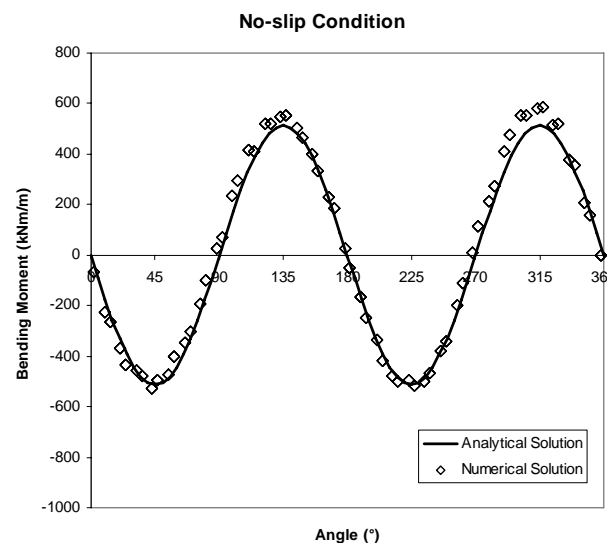
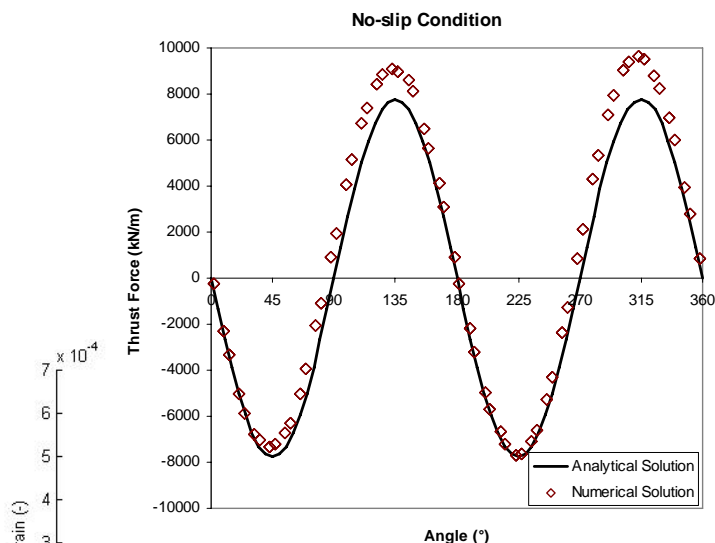
Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

**Risposta
dinamica
completa**

Prossimo
anno



Confronti

Premessa

Principali
obiettivi ed
argomenti

Effetti dei
terremoti

Moto in
prossimità
della
sorgente

Risposta
dinamica
semplificata

Risposta
dinamica
completa

**Prossimo
anno**

- Analisi sistematica di casi di studio di gallerie profonde con i metodi sviluppati sinora e definizione di procedure di analisi progettuale
- Sviluppo di metodi di analisi di gallerie in ammassi rocciosi giuntati (imbocchi, gallerie di bassa copertura, caverne)
- Sviluppo di sistemi di monitoraggio innovativi per gallerie in esercizio
- Emissione in draft di Linee Guida