

DINAMICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

Creare modelli costitutivi avanzati per il terreno e per il rivestimento dei tunnel è di fondamentale importanza per la descrizione della natura irreversibile del comportamento meccanico dei materiali quando soggetti ad azioni cicliche.

Massimo Chiarelli

Ingegnere esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo

www.chiarellimassimo.it info@chiarellimassimo.it

Introduzione

Le opere in sotterraneo in generale ed i tunnel in particolare, rientrano tra le infrastrutture di trasporto meno vulnerabili ai sismi. Ciò è dovuto in parte all'elevato grado di confinamento dei tunnel, in parte all'elevata capacità statica di accettare cerniere plastiche nei rivestimenti. Nonostante ciò, abbiamo una serie di danneggiamenti importanti riportati in letteratura: anche in tunnel profondi.

Queste case histories evidenziano la necessità di adottare criteri antisismici evoluti nella progettazione di queste opere in particolar modo nelle vicinanze delle grandi faglie ed al crescere dell'importanza dell'opera stessa specialmente nel caso in cui è da considerarsi strategica e, quindi, essere fruibile anche a seguito di un evento sismico.

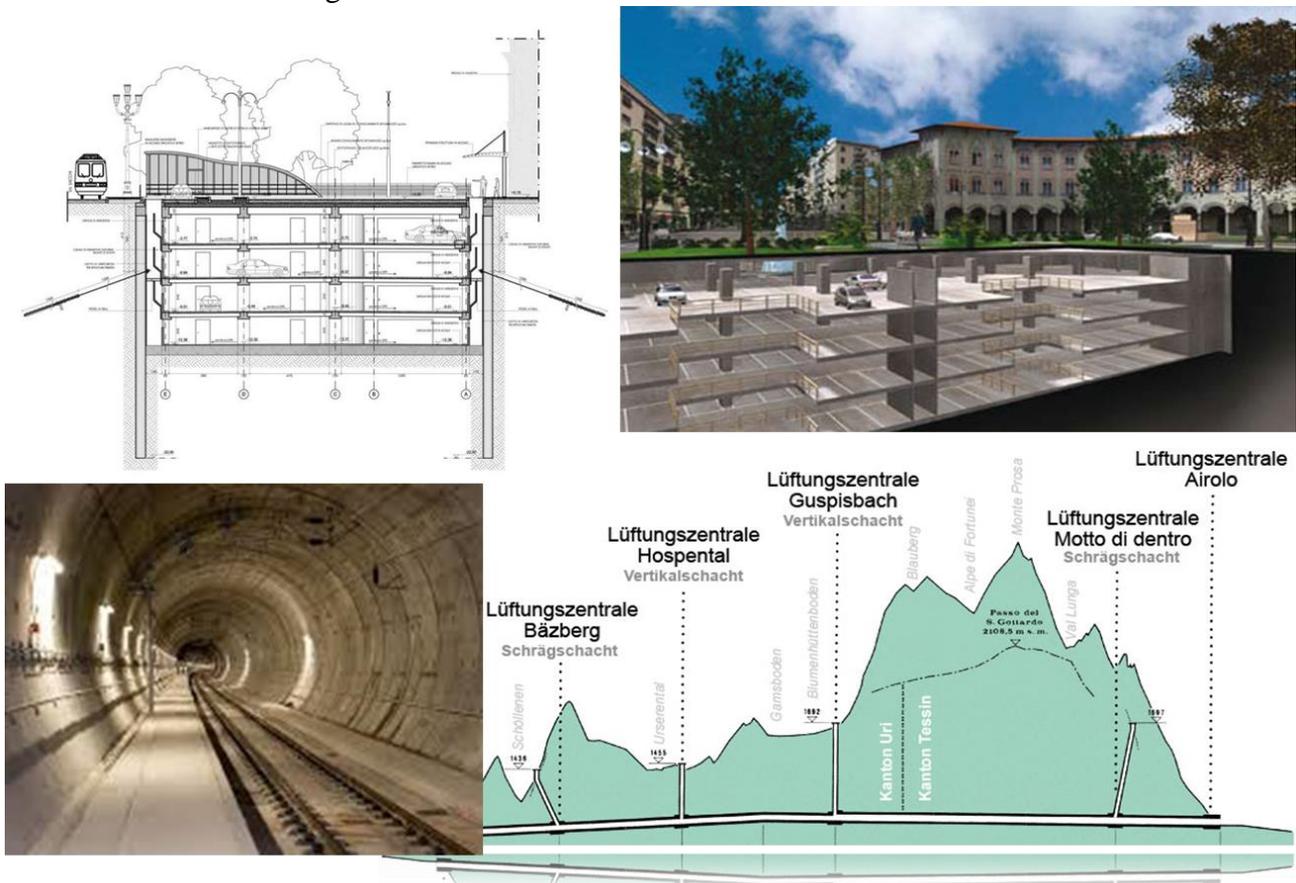


Figura 1 - Due differenti tipologie strutturali di opere sotterranee

Infatti, il collasso o danneggiamento di un tunnel, oltre ad essere, in generale, difficilmente ripristinabile, può causare difficoltà per i soccorsi in caso di emergenza.

Il comportamento delle strutture in sotterraneo soggette ad azioni sismiche va affrontato in maniera diversa rispetto alle strutture in elevazione.

Il comportamento delle strutture in elevazione è regolato dalle caratteristiche inerziali della struttura mentre, la risposta dinamica delle strutture in sotterraneo è governata dalla risposta deformativa del terreno circostante e dalla loro interazione cinematica.

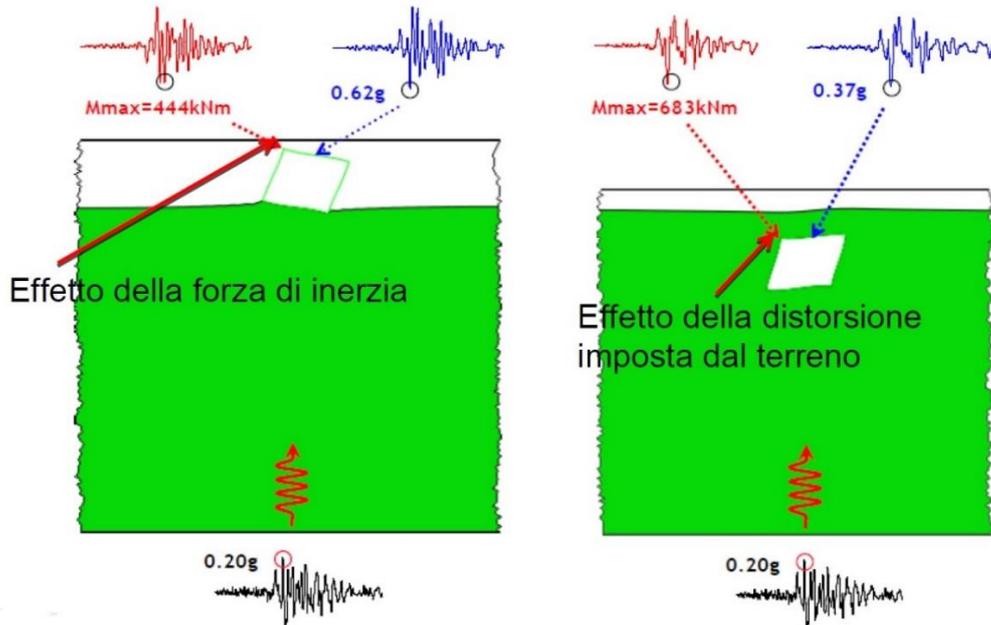


Figura 2 - Schematizzazione del comportamento delle opere in elevazione ed in sotterraneo

La differenza è una diretta conseguenza della trascurabile inerzia dell'opera in sotterraneo rispetto a quella del terreno che la circonda.

Danni causati dal sisma

Cause di danni alle strutture possono essere:

- movimenti di faglia;
- deformazioni del terreno;
- liquefazione;
- frane o DGPV (per opere in aree/versanti instabili);
- diversa rigidezza strutturale tra elementi che costituiscono l'opera interrata (es: collegamento tra tunnel e pozzo di ventilazione).

I danni si verificano per:

- profondità delle opere minori di 50 metri;
- terreni deformabili;
- accelerazioni al suolo di picco (misurate in superficie) maggiori di 0,15 g;
- magnitudo del sisma maggiore di 6;
- un raggio massimo di 50 km dall'epicentro del sisma.



Figura 3 - Metropolitana Dakai, Kobe, 1995

Dirette conseguenze sono:

- tunnel e opere profonde sono meno vulnerabili delle opere in superficie;
- tunnel realizzati in ammassi rocciosi sono meno vulnerabili rispetto a quelli in terreni deformabili;
- il miglioramento del terreno circostante il tunnel riduce la vulnerabilità;
- all'aumentare della durata dello scuotimento sismico aumentano le deformazioni plastiche.

Le opere sotterranee nei pressi di frane indotte da eventi sismici manifestano spesso danni significativi.

Le deformazioni dipendono da:

- propagazione delle onde;
- variazione delle caratteristiche del terreno;
- potenza degli strati;
- variabilità del moto dovuta alla “incoerenza” delle onde sismiche.

Risposta sismica in superficie ed in profondità

Ai fini ingegneristici si assume che le opere sotterranee subiscano, durante lo scuotimento sismico, tre modi di deformazione principale (Owenand Scholl, 1981):

- compressione/estensione;
- flessione longitudinale;
- ovalizzazione della sezione.

I meccanismi deformativi di un'opera sotterranea investita da onde sismiche, interessano sia la sezione trasversale dell'opera che il suo sviluppo longitudinale.

In genere, l'analisi del comportamento della struttura nella sezione trasversale è condotta nelle ipotesi di deformazione piana, quella lungo l'asse, schematizzando la galleria come una trave di lunghezza infinita o finita.

In relazione ai danni prodotti dalle vibrazioni del terreno al passaggio delle onde sismiche, gli stati deformativi che può subire una galleria in seguito ad esso possono essere sintetizzati secondo gli schemi riportati in Figura 5.

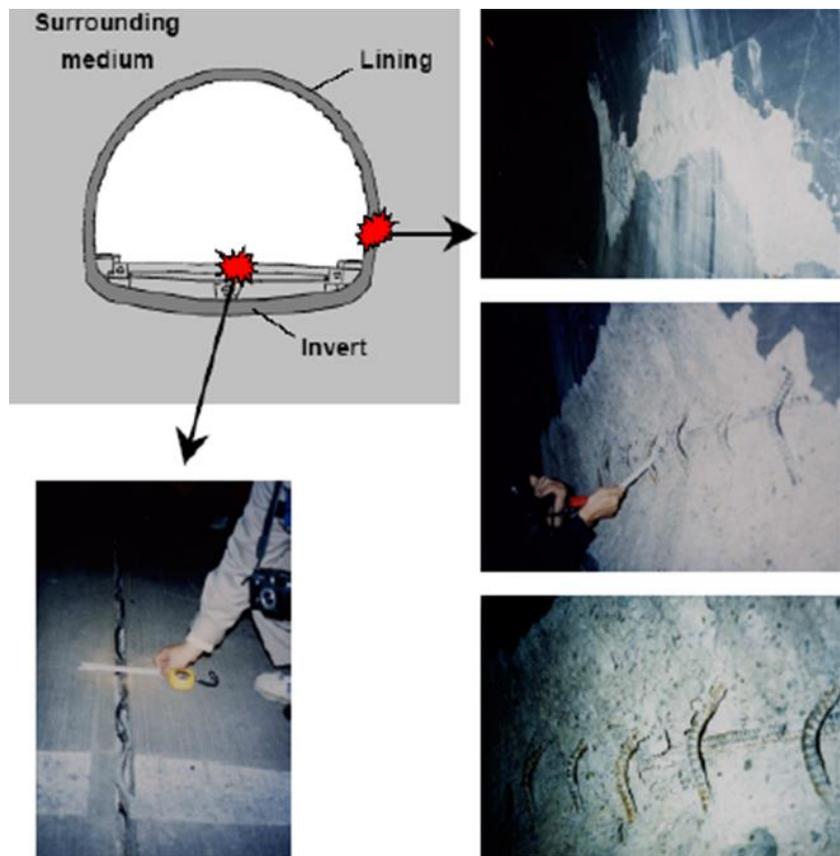


Figura 4 - Danni causati dal sisma sul rivestimento del tunnel e sull'arco rovescio – Uenishi et al., 2001

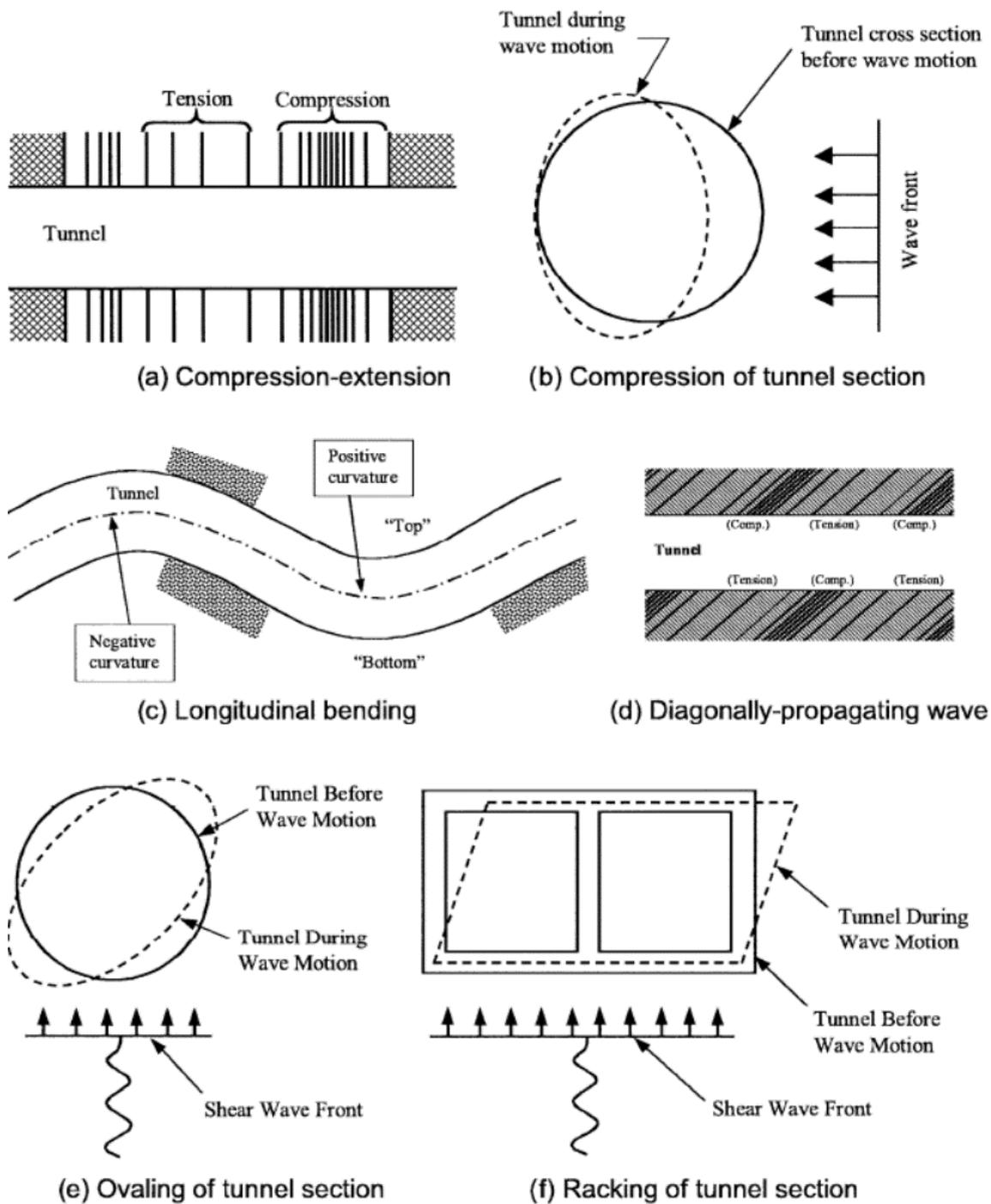


Figura 5 - Tipi di deformazione di tunnel a causa delle onde sismiche – Owen and Scholl, 1981

Quando le onde sismiche investono una galleria, il rivestimento si deforma sia in direzione trasversale, sia in direzione longitudinale.

1. In direzione trasversale la sezione della galleria si ovalizza per effetto delle deformazioni di taglio del terreno e dei conseguenti momenti flettenti.
2. In direzione longitudinale gli effetti del terremoto possono essere decomposti in azioni di **compressione-trazione** lungo l'asse della galleria e in azioni di **taglio-flessione** trasversali all'asse della galleria.

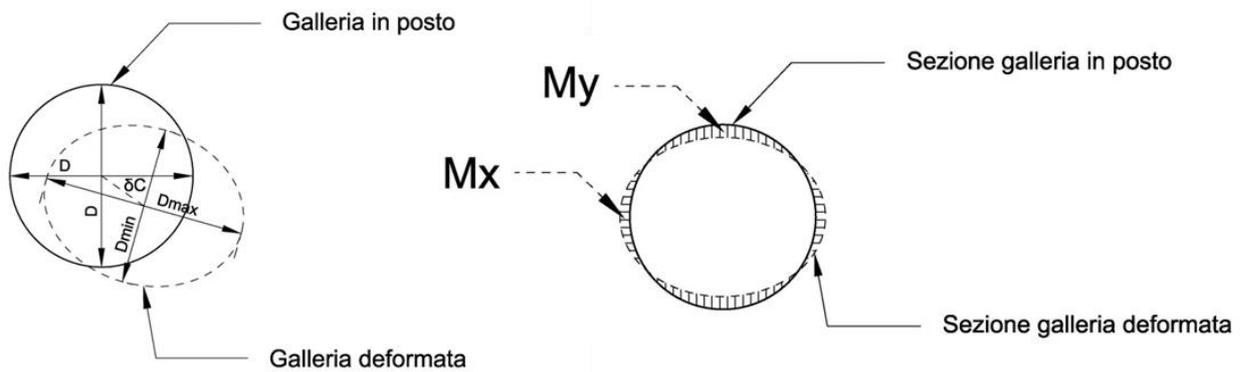


Figura 6 - Ovalizzazione della sezione del tunnel e momenti flettenti agenti. Figura tratta da "metodo smartGDE" M. Chiarelli.

L'effetto delle azioni sismiche agenti in direzione longitudinale può essere analizzato assumendo che il segnale sismico sia perfettamente coerente, cioè che differenti punti nello spazio siano soggetti allo stesso segnale con differenti tempi di arrivo.

Le onde incontrano la superficie del tunnel causando distorsioni del rivestimento, come schematizzato nella figura seguente. In generale le sollecitazioni dovute alla propagazione delle onde nella direzione longitudinale del tunnel (casi a e c in figura 7) inducono fessure radiali, meno pericolose e non critiche per la stabilità dell'opera.

Le sollecitazioni indotte invece dalle onde di taglio hanno l'effetto di ovalizzare la sezione della galleria (figura 8 - caso e), ciò causa fessure longitudinali che possono arrivare a compromettere la stabilità del rivestimento stesso.

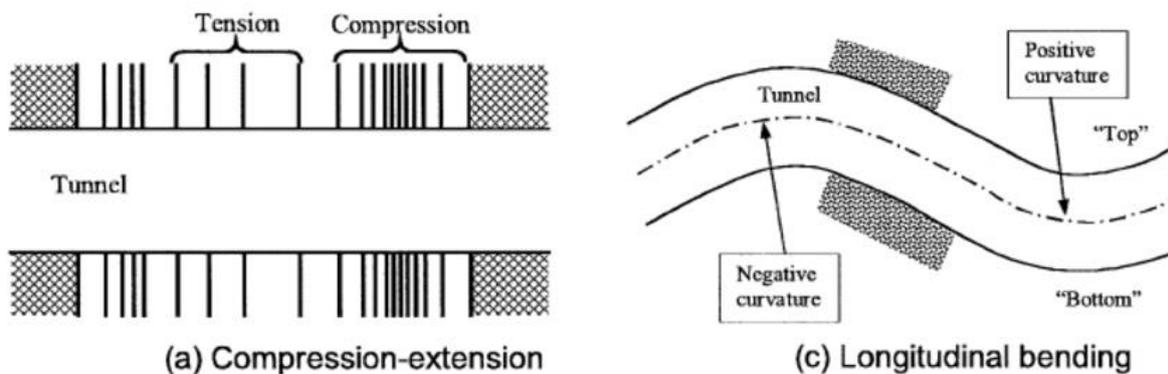


Figura 7 - Schematizzazione delle distorsioni causate dalle onde sismiche sul rivestimento

Le osservazioni sul comportamento delle gallerie interrate in occasione di terremoti (Okamoto et al., 1973), hanno mostrato che gli effetti delle forze d'inerzia possono essere trascurate ai fini della valutazione della risposta sismica di un'opera in sotterraneo.

L'interazione cinematica, invece, deve essere debitamente considerata nelle analisi.

L'attenzione della progettazione sismica va concentrata sulla valutazione delle deformazioni indotte dal moto sismico nel terreno e della sua interazione con la struttura.

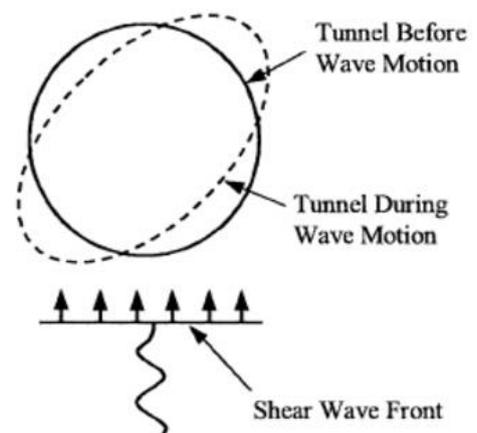


Figura 8 - Caso (e) – Ovalizzazione della sezione del tunnel

Progettazione di un'opera in sotterraneo

Abbiamo detto che i tunnel rientrano tra le strutture meno vulnerabili ai sismi: difatti fino a qualche anno fa la loro verifica sismica non era molto diffusa nella pratica professionale.

Ciò era dovuto in parte all'elevato grado di confinamento dei tunnel, in parte all'elevata capacità statica di accettare cerniere plastiche nei rivestimenti.

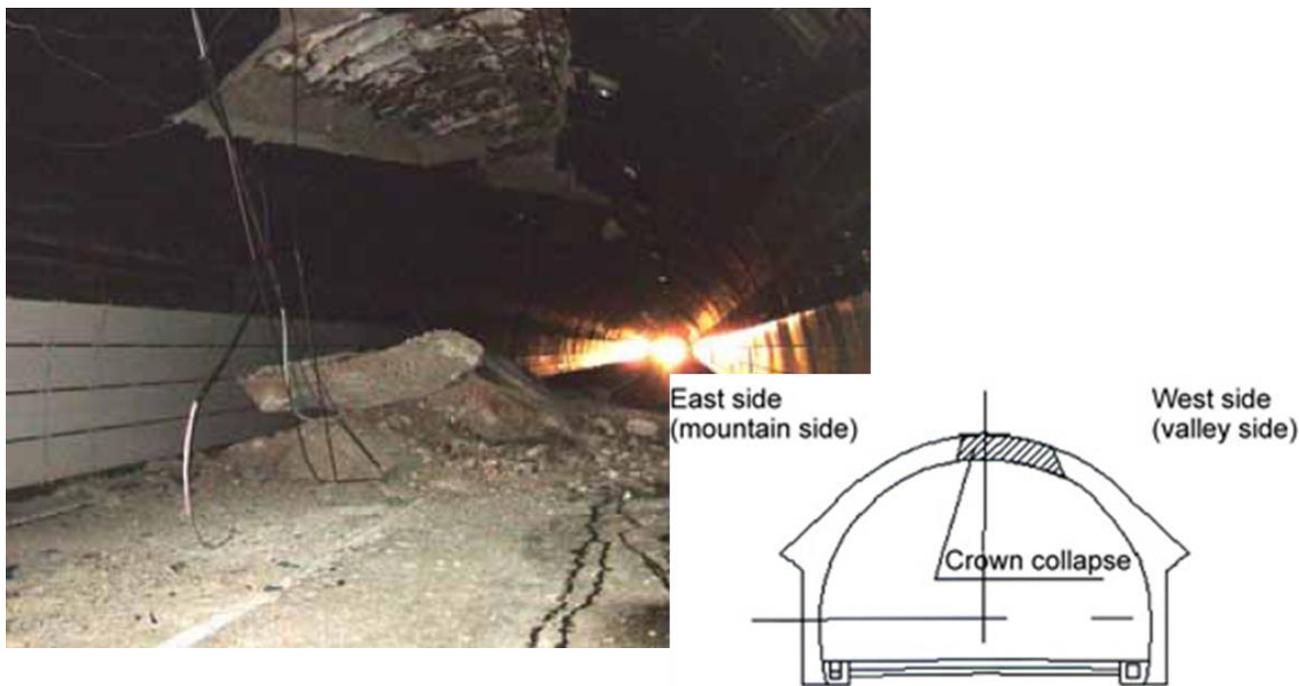


Figura 9 - Tunnel Lining Falling from Tunnel Crown - 2004 Niigata Earthquake, Japan

Nonostante ciò, sono riportati danneggiamenti importanti in tunnel profondi a seguito, ad esempio, dei terremoti di Kobe (J), Loma Prieta (USA) e Dtizce (T). La verifica sismica di manufatti sotterranei non è ad oggi normata in modo specifico né a livello nazionale (*il D.M. 14 gennaio 2008, contiene solo indicazioni di indirizzo generale*), né internazionale.

Il segnale sismico si modifica profondamente sia con la profondità, sia con la stratigrafia.

Criteri di progetto

È necessario trasformare gli accelerogrammi selezionati in superficie in altri riferibili alla tipologia di terreno o roccia e alla profondità del manufatto sotterraneo.

Questa operazione è detta di deconvoluzione e viene effettuata con software appositi che restituiscono un accelerogramma riferito ad un "bedrock" (Letto roccioso profondo sottostante il manufatto).

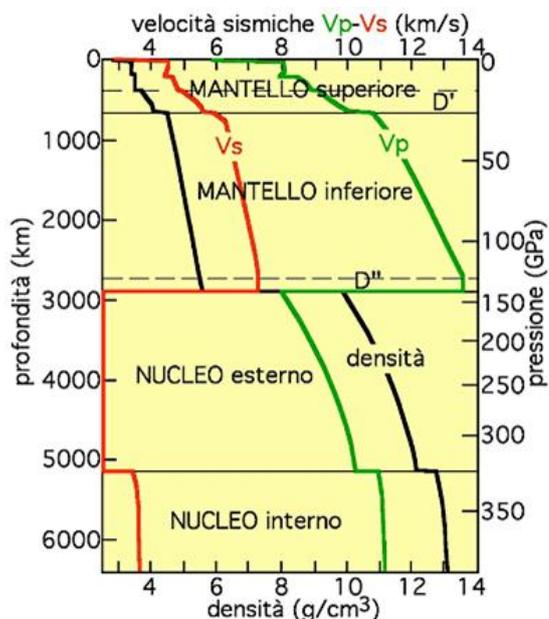
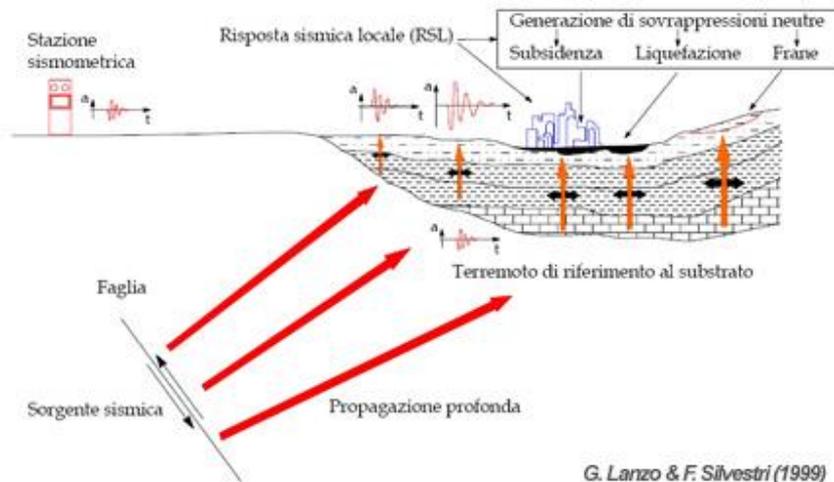


Figura 10 – Rappresentazione del segnale sismico al variare della profondità e della stratigrafia



La determinazione ingegneristica degli incrementi di carico indotti da un terremoto sul rivestimento di una galleria può essere conseguita mediante tre differenti approcci progettuali, corrispondenti a crescenti livelli di complessità dei modelli analitici, caratterizzazione del sottosuolo e descrizione del segnale sismico.



G. Lanzo & F. Silvestri (1999)

Figura 11 – Risposta sismica locale

1. **Analisi pseudo-statiche**, in cui il segnale in ingresso è ridotto a una forza d'inerzia equivalente o a un valore massimo di deformazione, calcolato attraverso un'analisi pseudo-statica in condizione di free-field, e successivamente considerato agente staticamente sul rivestimento della galleria.

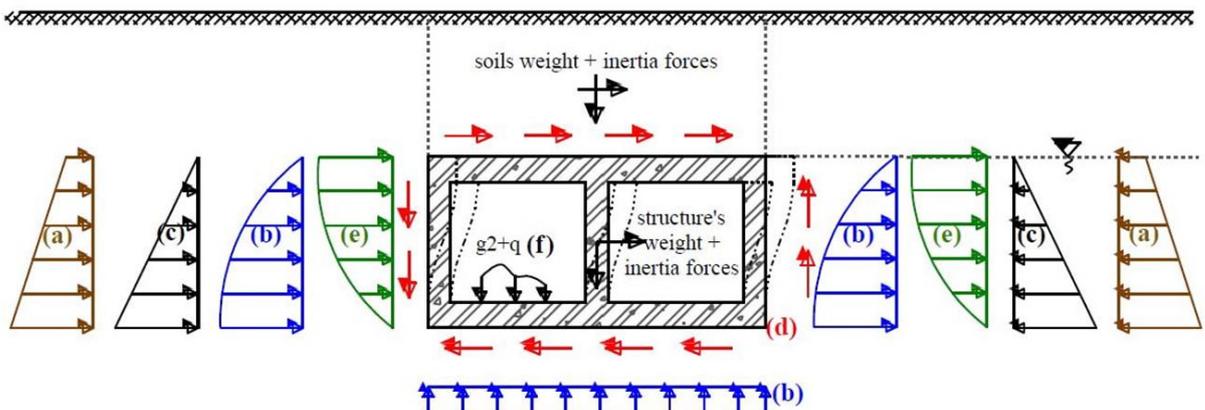


Figura 12 – Analisi Pseudo-statiche - (a) Pressione statica; (b) pressione idrodinamica; (c) pressione idrostatica; (d) forze sismiche di taglio; (e) pressione sismica del terreno; (f) pesi propri e sovraccarichi variabili.

2. **Analisi dinamiche semplificate**, in cui la deformazione del mezzo è valutata tramite un'analisi free-field ed è applicata alla sezione della galleria (oppure lungo il suo asse) ancora in maniera statica, tenendo conto dell'interazione cinematica terreno-struttura in maniera semplificata.

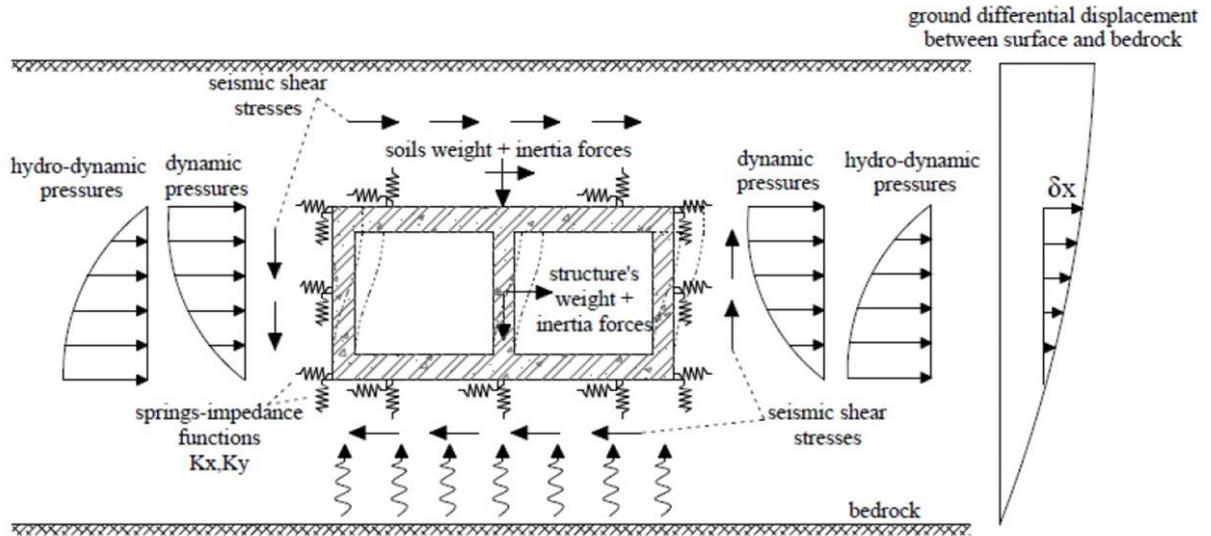


Figura 13 - Analisi pseudo statiche con componenti dinamiche

L'analisi dinamica semplificata presuppone, quindi:

- a) l'analisi della sezione trasversale (*ovalizzazione della sezione*) in condizioni di deformazioni piane 2D con due condizioni di contatto all'interfaccia roccia-rivestimento:

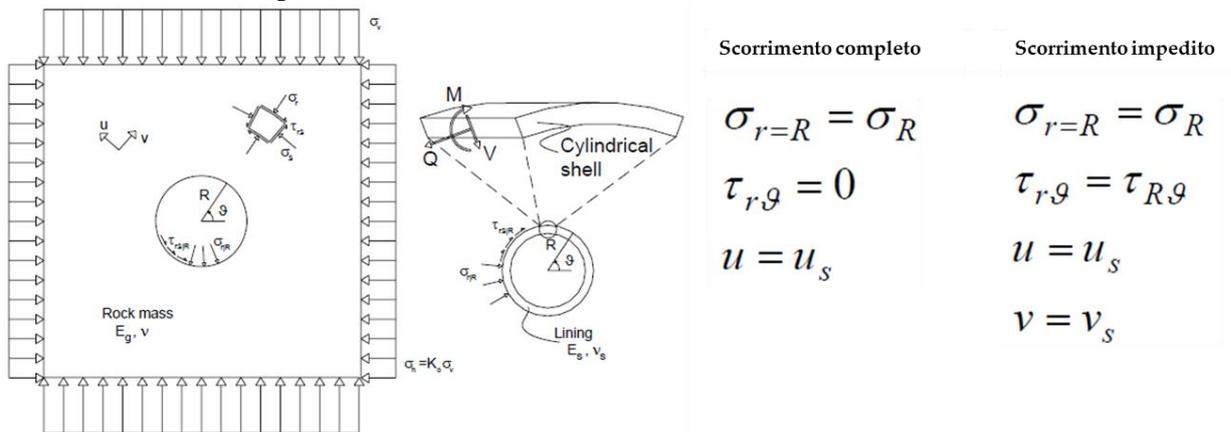


Figura 14 - Condizioni di deformazioni piane 2D

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

Aspetto importante riveste anche la valutazione della deformazione tangenziale della sezione.

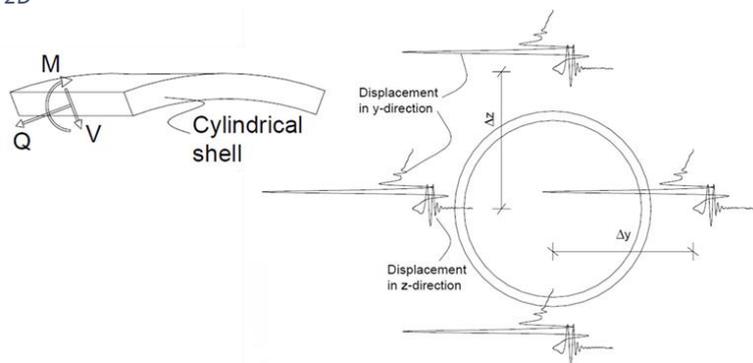


Figura 15 – Applicazione di M, Q e V – Schema di valutazione deformazione tangenziale

b) l'analisi della sezione longitudinale (*deformazioni assiali e flessionali*). Allo scopo, si considera un elemento trave 3D con massa concentrata – Modello FEM

- ✓ 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.

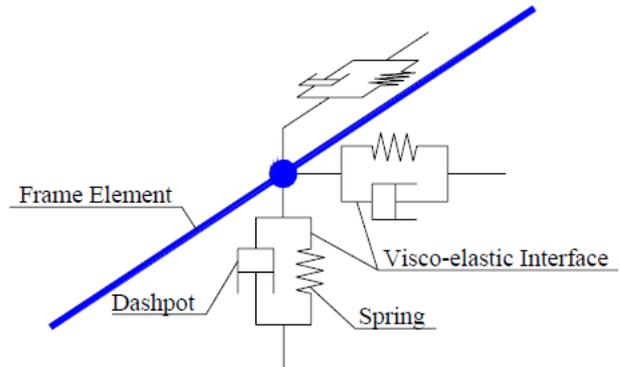


Figura 16 - Elemento trave 3-D connesso al terreno circostante con elementi di interfaccia visco-elastici.

3. **Analisi dinamiche complete**, in cui la risposta al sisma del mezzo e della struttura sono meccanicamente accoppiati e analizzati tramite una modellazione numerica, come il metodo agli elementi finiti o alle differenze finite.

Valutazione dell'azione sismica

Le norme definiscono l'azione in superficie: su roccia o su terreno A, B, C, D, E. Nel caso specifico di opere in sotterraneo, abbiamo bisogno della deformazione del terreno in profondità, ove l'azione sismica è di minore entità.

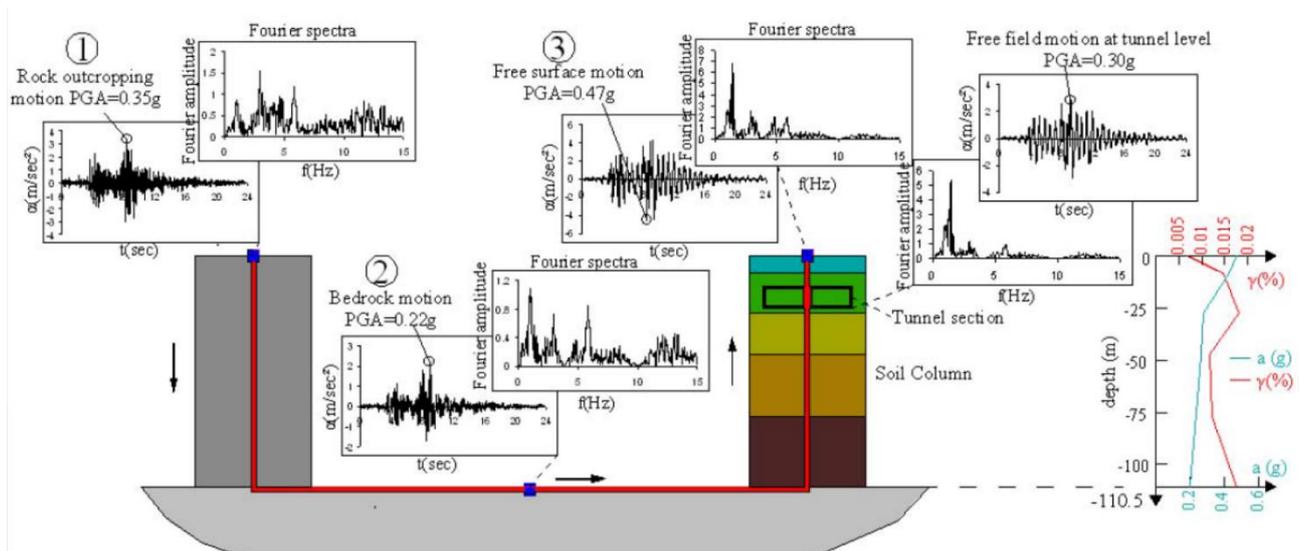


Figura 17 – Fasi per la determinazione dell'azione sismica in corrispondenza della sezione del tunnel

Per ciascuna sezione rappresentativa di galleria vengono sviluppati uno o più modelli numerici che rappresentano il manufatto e la roccia circostante in due o in tre dimensioni. I modelli sono finalizzati ad evidenziare gli effetti sul rivestimento.

Tali modelli vengono assoggettati ad un'analisi dinamica nel dominio del tempo, assumendo come input uno o più accelerogrammi imposti alla base del modello (*bedrock*).

I risultati espressi in termini di spostamenti e sollecitazioni dei rivestimenti di galleria vengono poi utilizzati per la verifica di resistenza degli stessi.

Definizione dell'input sismico

Abbiamo detto che l'input sismico locale, definito su un suolo roccioso affiorante deve quindi essere "trasformato" per essere riportato ad un "bedrock" profondo rispetto al manufatto in esame.

Esistono due approcci:

TRADIZIONALE, nato nell'University of California nei primi anni '70, basato su un'ipotesi di comportamento lineare della roccia o del terreno (*codice SHAKE*); poiché la roccia e il terreno non sono elastici lineari a livelli di deformazione sismica, è necessario definire un comportamento elastico equivalente, adottando dei moduli elastici di taglio compatibili con i livelli di deformazione dei singoli strati di terreno.

Approccio molto veloce (anche facendo variare i moduli di taglio iterativamente) perché, grazie all'ipotesi di linearità, applica la sovrapposizione degli effetti conducendo un'analisi armonica del segnale. La dissipazione di energia causata dal comportamento non lineare del terreno è interamente affidata ai parametri di smorzamento;

COMPLESSO, reso applicabile dai computer, si è diffuso a partire dagli anni '90, impiegando codici non lineari agli elementi finiti o alle differenze finite; oltre a poter considerare la non linearità del terreno (limiti di resistenza e leggi sforzi – deformazioni non lineari), questi codici consentono di tener conto dell'interazione struttura – terreno (Es. FLAC, PLAXIS, etc.).

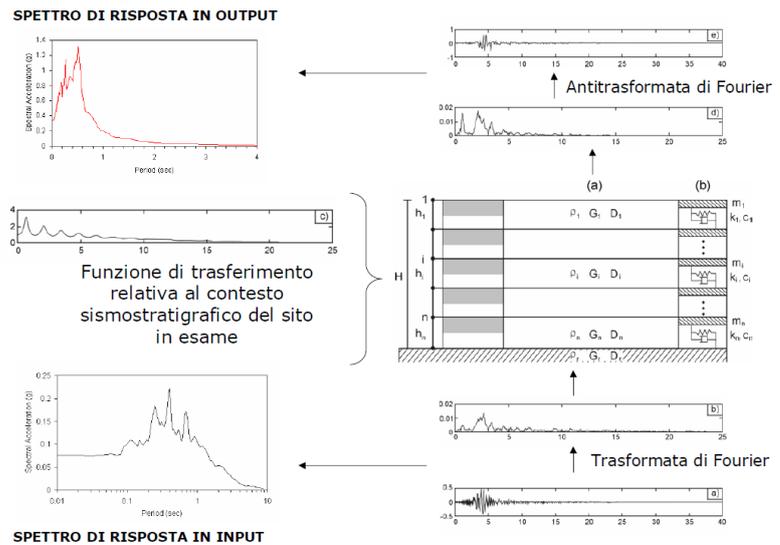


Figura 18 - Passi per l'ottenimento dell'input sismico

Modelli di calcolo

Modelli al continuo - Per le sezioni di calcolo, vengono allestiti dei modelli numerici a due e tre dimensioni impiegando codici di calcolo tipo FLAC o PLAXIS, con i quali si rappresenta la roccia come un continuo elasto-plastico.

Nello specifico si sviluppano:

1. modelli della sezione trasversale di galleria e della roccia circostante, piani alle deformazioni, mediante i quali definire le sollecitazioni massime nelle sezioni di rivestimento (azione assiale, flessione e taglio sismico "ovalizzazione");
2. modelli tridimensionali del sistema galleria terreno, nei quali la galleria è schematizzata come una sequenza di elementi finiti di tipo "trave" elasto-plastici a due nodi, molto semplici ed espressivi del comportamento longitudinale e in grado di simulare la propagazione tridimensionale dell'onda sismica; questi modelli servono a determinare gli ordini di grandezza delle sollecitazioni longitudinali nel rivestimento "beccheggio";
3. eventuali modelli di dettaglio in due o tre dimensioni di tratti particolari dei manufatti interrati e della roccia circostante, ai quali imporre condizioni al contorno ricavate dai modelli tipo 1) e 2) per la determinazione di dettaglio delle sollecitazioni in casi particolari.

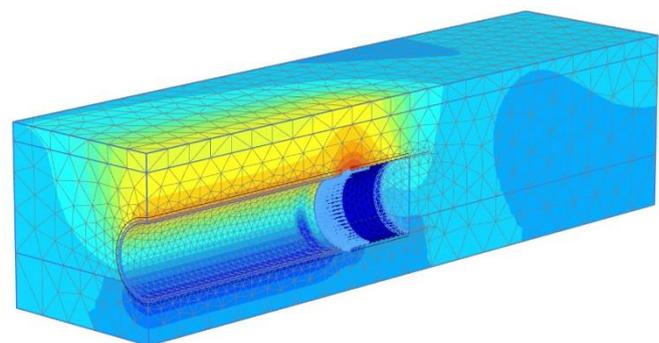


Figura 19 – Modello continuo in Plaxis 3D

Per ciascun modello si procede come segue:

- a) definizione del reticolo del modello, delle caratteristiche geometriche della galleria ecc;
- b) definizione dei contorni “*artificiali*” (inferiore e superiore);
- c) definizione delle condizioni al contorno statiche;
- d) applicazione dei carichi statici e definizione (attraverso una modellazione numerica per fasi) delle sollecitazioni statiche nel rivestimento. In questo tipo di modellazione, solitamente, il rivestimento di prima fase e gli interventi di pre-sostegno, considerati nel calcolo delle fasi di scavo della galleria, vengono “eliminati” dal modello dopo la formazione del rivestimento finale, perché considerati strutture provvisorie e non durevoli;
- e) definizione delle condizioni al contorno dinamiche che includono:
 - ✓ condizioni al contorno di tipo “*quiet boundary*” per impedire la riflessione delle onde sui contorni in quiete;
 - ✓ condizioni al contorno “*free field*” per simulare il moto sismico del terreno soggetto al sisma ai lati del modello.
- f) definizione del moto “*free field*” alla base del modello (*bedrock*) attraverso il procedimento di deconvoluzione;
- g) analisi sismica del modello nel dominio del tempo e definizione delle sollecitazioni dinamiche nel rivestimento di galleria e degli spostamenti indotti dal sisma;
- h) registrazione e restituzione grafica di tutti i dati di interesse. In particolare, verranno ricercate le massime sollecitazioni a flessione, taglio e compressione assiale nel rivestimento.

Modellazione della roccia come mezzo discontinuo

L’approccio fornito da FLAC è valido e completo a condizione che il comportamento della roccia sia governato essenzialmente dai parametri d’ammasso, ovvero che la fratturazione della roccia sia tale da rendere ininfluente l’effetto del giunto singolo (fratturazione decimetrica).

Laddove la spaziatura dei giunti sia su scala metrica, occorrerà tenere conto degli effetti del singolo giunto e della sua collocazione rispetto al manufatto sotterraneo. Si potranno allora implementare le medesime procedure di calcolo statico e dinamico, facendo però riferimento a codici agli “*elementi distinti*” (DEM).

Dimensionamento del rivestimento di galleria in calcestruzzo armato

Le sollecitazioni calcolate secondo quanto descritto precedentemente, vengono adottate come base per il dimensionamento del rivestimento di galleria, che verrà sviluppato in sede di progettazione esecutiva.

I criteri di base per tale dimensionamento sono i seguenti:

- ✓ la presenza di forti flessioni e tagli porta all’esigenza di rivestimenti armati, essenzialmente con armature circolari e staffe/spilli;
- ✓ le sollecitazioni di distorsione longitudinale, prevedibili soprattutto nelle zone di attraversamento di faglie, possono richiedere un consistente incremento delle armature longitudinali;
- ✓ nel complesso, le armature devono conferire al rivestimento un comportamento di tipo duttile, per evitare importanti perdite di resistenza (e conseguente collasso della sezione) a seguito di deformazioni di una certa entità. Le armature devono quindi svilupparsi in tutte le direzioni e deve sempre essere presente un’armatura di legatura efficace fra armature esterne e interne.

I criteri di dimensionamento sono quelli riportati nelle vigenti norme per le convenzionali strutture in c.a. (Costruzioni civili e industriali – Costruzioni in calcestruzzo), “Progettazione geotecnica – Opere in sotterraneo” e “Progettazione per azioni sismiche – Opere e sistemi geotecnici”.

Definizione dell’ambiente sismico

L’obiettivo della progettazione antisismica per un’opera in sotterraneo è quello di sviluppare una struttura in grado di sopportare un dato livello di moto sismico con danni non superiori ad un livello predefinito accettabile. Ci sono due metodi di analisi:

1. DSHA - Deterministic Seismic Hazard Analysis;
2. PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Analysis.

DSHA – Un’analisi di pericolosità sismica deterministica prevede lo sviluppo di un particolare scenario sismico che riassume il pericolo di scuotimento sismico in un dato sito;

PSHA – Un’analisi di pericolosità sismica probabilistica fornisce un quadro in cui le incertezze nella magnitudo, posizione, frequenza di accadimento possono essere quantificate e combinate in modo razionale. Questo metodo offre ai progettisti una più completa descrizione del rischio sismico in un sito.

Terremoto di progetto massimo MDE

MDE – Il terremoto massimo di progetto è definito in una DSHA come il massimo livello di scuotimento che si può verificare nell’area considerata.

In una PSHA, l’MDE è definito come un evento con una bassa probabilità di essere superato durante la vita di un’opera (3 ÷ 5 %). L’obiettivo di considerare nella progettazione l’MDE è quello di garantire la sicurezza che deve essere mantenuta durante e dopo l’evento di design.

La progettazione terrà conto con l’MDE del carico generato dal caso peggiore tra le combinazioni di vita, carichi statici, e carichi da sisma.

Tabella 1 - Rapporto tra lo scuotimento sismico in profondità e quello in superficie al variare della profondità della galleria

Profondità galleria	Rapporto Ground Motion dept/Ground Motion Surface
≤ 6	1,0
6÷15	0,9
15÷30	0,8
>30	0,7

Lo scuotimento sismico generalmente diminuisce con la profondità. Per la valutazione dell’input sismico su un’opera in sotterraneo è necessaria l’esecuzione di un’analisi di propagazione delle onde in quanto l’ampiezza e il periodo di vibrazione dello scuotimento come l’onda di taglio può passare per depositi soffici del terreno.

In assenza di dati numerici accurati, si può utilizzare la *tabella 1* che fornisce la relazione tra lo scuotimento sismico in profondità e quello sulla superficie del terreno. ■

Bibliografia

- [1]. M. Chiarelli – “L’Arte del costruire gallerie” – Editrice | Uni Service, Trento, 2009
- [2]. M. Chiarelli – “La realizzazione di gallerie in formazioni geologicamente complesse” - “INGENIO” n° 36 del 30 Settembre 2015, Imready Srl - RSM
- [3]. M. Chiarelli – “Analisi dei cedimenti per gallerie a doppia canna” - “Strade & Autostrade” n°125, EDI-CEM Srl, Milano
- [4]. M. Chiarelli – “Interazione tra gallerie metro e scavi profondi: metodo *smartGDE*” - “Strade & Autostrade” n°108, EDI-CEM Srl, Milano
- [5]. M. Chiarelli – “Rivestimenti definitivi di tunnel in elementi prefabbricati” - “INGENIO” n° 34 del 01 Luglio 2015, Imready Srl – RSM
- [6]. M. Chiarelli – “Il metodo Top-Down e Bottom-Up - Le stazioni della nuova metropolitana di Roma” - “Strade & Autostrade” n°119, EDI-CEM Srl, Milano
- [7]. C. Nuti – “La sismica nelle costruzioni in sotterraneo” - “Atti del Convegno”, 22 Marzo 2012 - Roma