

PARAMETRI DEL MOTO SISMICO

Attività microsismica: caratterizzata da vibrazioni di debole ampiezza e periodi molto grandi tali da non essere percepiti dai più comuni strumenti di registrazione (importante soprattutto per i sismologi)

Attività strong motion: caratterizzata da vibrazioni di ampiezza e periodo tali da produrre danni su ambiente e infrastrutture e rilevabile coi più comuni strumenti (es. ampiezze comprese tra **0.001 g** e **1 g** e frequenze comprese tra **0.06 Hz** e **25 Hz**)

Per valutare gli effetti dell'attività strong motion su un determinato sito occorre una descrizione quantitativa e oggettiva del moto sismico al sito:

- Tre componenti ortogonali della traslazione
- Tre componenti della rotazione (generalmente trascurate)

Le componenti della traslazione vengono generalmente misurate e registrate ad es. in termini di accelerazione (**accelerogrammi**), in forma analogica o numerica (in tal caso per rappresentare adeguatamente ciascun picco o ciascuna inversione occorre un passo sufficientemente piccolo, es **0.01 s**)

Le informazioni utili ai fini ingegneristici per rappresentare il moto sismico al sito sono molto meno rispetto a quelle contenute in una registrazione e riguardano:

- ◆ **l'ampiezza**
- ◆ **il contenuto in frequenza**
- ◆ **la durata**

tali informazioni devono comunque essere ricavate dalla registrazione, ma possono essere sintetizzate in una serie di parametri (**parametri del moto sismico**)

Utilizzando delle opportune leggi (**leggi d'attenuazione**) è possibile prevedere la variazioni di tali parametri con la distanza epicentrale.



N.B. Ogni parametro può da solo descrivere uno o più caratteristiche del moto sismico, ma non esiste nessun parametro che possa da solo descriverlo compiutamente

AMPIEZZA DEL MOTO SISMICO

Il modo più comune e completo, anche se sovrabbondante, di descrivere l'**ampiezza** del moto sismico è quella di utilizzare l'intera **time history** del moto in termini di accelerazione, velocità e spostamento, dove una (generalmente l'accelerazione) viene misurata direttamente e le altre ricavate per successive integrazioni o derivazioni.

☞ **OSS.** generalmente nell'accelerogramma le **frequenze predominanti**, cioè a cui corrispondono i picchi più elevati, sono quelle alte (in corrispondenza del picco i cicli di oscillazione si infittiscono, cioè hanno periodo più piccoli), per cui si può dire che la parte significativa del moto si concentra alle alte frequenze; nel velocigramma e ancora più nel sismogramma tende a spostarsi più verso le basse frequenze, cioè in corrispondenza dei picchi si rilevano basse frequenze (i cicli si “allargano”). Questo è dovuto all'effetto filtraggio prodotto dal processo di integrazione.

AMPIEZZA DEL MOTO SISMICO

Picco d'accelerazione (PGA):

def. picco più alto (in valore assoluto) registrato per l'accelerazione, calcolato generalmente per una delle componenti orizzontali (**PGHA**) e per la componente verticale (**PGVA**)

- ⇒ **PGHA:** è il più interessante ed utile perché
1. l'accelerazione orizzontale è strettamente legata alle forze dinamiche indotte sulle strutture da un sisma
 2. è possibile correlare (solo però in modo indicativo) tale picco con l'intensità macrosismica, in modo da avere una stima del PGA anche per quei terremoti di cui non si dispongono registrazioni e ,nota la mappa delle isosisme, si può ricavare come varia il PGA con la distanza epicentrale

- ⇒ **PGVA:** è il meno interessante ed utile essendo generalmente le strutture più resistenti alle sollecitazioni dinamiche verticali per la forza di gravità che esercita un ruolo conservativo ai fini della stabilità

e generalmente si assume: $PGVA = \frac{2}{3} PGHA$

☞ **OSS.** generalmente i terremoti caratterizzati da elevati PGA sono stati i più distruttivi, anche se, qualora il picco sia di breve durata (corrispondente ad elevate frequenze) e il terremoto sia di breve durata, il danno è assai più limitato soprattutto su certe strutture

⇒ tale parametro da solo non fornisce informazioni sulla durata del moto e sul contenuto in frequenza.

AMPIEZZA DEL MOTO SISMICO

Picco di velocità (PGV):

def. picco più alto (in valore assoluto) registrato per la velocità e viene calcolato generalmente per una delle componenti orizzontali (**PGHV**)

util.: è utile perché:

1. essendo la velocità meno sensibile alle componenti del moto di alta frequenza, serve a caratterizzare l'ampiezza del moto sismico alla **frequenze intermedie** ed è perciò utile a indicare il potenziale di danneggiamento per tutte quelle strutture sensibili al campo delle frequenze intermedie (edifici alti, flessibili, ponti)
2. è possibile correlare (solo però in modo indicativo) tale picco con l'intensità macrosismica

Picco di spostamento (PGD):

def. picco più alto (in valore assoluto) registrato per spostamento

util.: è utile perché:

1. essendo lo spostamento associato alle componenti in bassa frequenza del moto, serve a caratterizzare l'ampiezza del moto sismico alla **basse frequenze**.



N.B. A causa degli errori introdotti con l'integrazione doppia lo spostamento se non misurato direttamente è poco affidabile

Accelerazione effettiva:

def. Accelerazione più strettamente correlata alla risposta strutturale e al potenziale di danneggiamento ed è inferiore a quella di picco

- **accelerazione massima sostenuta**
- **accelerazione di progetto effettiva**

CONTENUTO IN FREQUENZA

def. Il **contenuto in frequenza** descrive come le ampiezze del moto sismico sono distribuite tra le varie frequenze.

util.: è utile se non indispensabile perché la risposta dinamica delle strutture dipende fortemente oltre che dalle ampiezze dei carichi applicati dalle relative frequenze in relazione alle proprie frequenze naturali, perciò la descrizione del moto sismico e degli effetti prodotti può essere completa solo se accompagnata ad un'analisi del contenuto in frequenza

Spettri del moto sismico

Ogni funzione periodica $\mathbf{x}(t)$ di periodo \mathbf{T}_f può essere espressa come somma di funzioni armoniche semplici con frequenza ω_n , ampiezza \mathbf{C}_n e fase ϕ_n differenti:

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \text{ con}$$

$$c_0 = a_0; c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right); \omega_n = \frac{2\pi n}{T_f}$$

dove:

$$a_0 = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} x(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T_f} \int_0^{T_f} x(t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T_f} \int_0^{T_f} x(t) \sin(\omega_n t) dt$$

**SERIE DI
FOURIER**

☞ **OSS.** Nota la funzione $x(t)$ si può ricavare la serie di Fourier corrispondente (**trasformata di Fourier**) e nota quest'ultima si può ricavare la funzione $x(t)$ (**trasformata di Fourier inversa**). Inoltre essendo la $x(t)$ generalmente funzione discreta anche la trasformata di Fourier viene ricavata in forma discreta (**Fast Fourier Transform**)

CONTENUTO IN FREQUENZA

Spettro di Fourier

def. Esprime, al variare della frequenza o del periodo, come variano le ampiezze o le fasi delle singole armoniche ricavate dalla trasformata di Fourier.

☞ **OSS.** Lo spettro in termini di ampiezza può essere **stretto o ampio** a seconda che le frequenze in cui si concentrano le ampiezze più significative corrispondano ad una banda limitata, in cui sia evidenziabile una **frequenza predominante**, o ad una banda piuttosto vasta.

Riportando in scala logaritmica nel caso di spettro a banda stretta:

f_c = frequenza “corner”

f_{\max} = frequenza di “cutoff”, dipende dagli effetti di sito e di sorgente e
 $\approx 1 / \sqrt[3]{M_0}$

CONTENUTO IN FREQUENZA

Spettro o funzione di densità spettrale di potenza

def. Esprime, al variare della frequenza, l'intensità del moto sismico.

util.: Serve a determinare le proprietà statistiche del moto sismico e fornire una valutazione stocastica della risposta sismica

$$I_0 = \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_n} c_n^2 d\omega$$

dove $\omega_n = \frac{\pi}{\Delta t}$ è la **frequenza di Nyquist**

Intensità totale del moto sismico di durata T_d

(più alta frequenza nella serie di Fourier)

$$\lambda_0 = \frac{I_0}{T_d} = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi T_d} \int_0^{\omega_n} c_n^2 d\omega$$


Intensità media del moto sismico di durata T_d

Definendo la densità spettrale di potenza come quella funzione **$G(\omega)$** :

$$\lambda_0 = \int_0^{\omega_n} G(\omega) d\omega$$

risulta

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} c_n^2$$

 **N.B.** serve a caratterizzare processi aleatori stazionari (parametri statistici costanti), mentre l'intensità cresce subito fino al massimo valore poi rimane costante e decresce solo nella parte finale

CONTENUTO IN FREQUENZA

Spettro di risposta

def. Esprime la massima risposta di un sistema ad un solo grado di libertà (SDOF) ad un particolare moto di input al variare della frequenza, (o periodo) naturale e del rapporto d'attenuazione.

util.: è utile soprattutto nel campo ingegneristico perché consente di valutare direttamente la massima risposta all'input sismico di varie strutture, anche se semplificate.



N.B. lo spettro di risposta riflette solo in maniera indiretta le caratteristiche del moto sismico, essendo esse filtrate attraverso la risposta della struttura SDOF

1. la massima risposta del sistema può essere espressa in termini di accelerazione, velocità o spostamento; per ciascuna di esse lo spettro può essere rappresentato separatamente oppure nello stesso diagramma riportando la velocità spettrale sull'asse verticale e la frequenza o il periodo naturale sull'asse orizzontale e l'accelerazione e lo spostamento spettrale sugli assi inclinati;
2. bastano gli spettri di Fourier in termini di ampiezza di e di fase e quello di potenza a descrivere completamente il moto sismico, mentre quello di risposta tende più a valutarne gli effetti;
3. Indicato con \mathbf{u} lo spostamento del sistema e con ω_0 la sua attenuazione l'accelerazione \mathbf{S}_a , la velocità \mathbf{S}_v e lo spostamento \mathbf{S}_d spettrale massimo possono essere così approssimati:

$$\mathbf{S}_d = |\mathbf{u}_{\max}|; \mathbf{S}_v = |\dot{\mathbf{u}}_{\max}| = \omega_0 \mathbf{S}_d = \text{PSV}; \mathbf{S}_a = |\ddot{\mathbf{u}}_{\max}| = \omega_0^2 \mathbf{S}_d = \text{PSA};$$

CONTENUTO IN FREQUENZA

Parametri spettrali

def. Sono parametri calcolabili a partire dagli spettri e che contengono importanti informazioni.

util.: consentono di estrarre dagli spettri solo quelle informazioni utili ai fini della caratterizzazione del moto sismico

□ **Periodo predominante (T_p):** è il periodo corrispondente alla massima ampiezza dello spettro di Fourier;

□ **Ampiezza di banda:** è l'ampiezza della banda di frequenza in corrispondenza della quale l'ampiezza dello spettro di Fourier è al di sopra di una certa soglia ($1/\sqrt{2}$ volte la massima ampiezza)

□ **Frequenza centrale (Ω):** definito il momento spettrale di ordine n del moto sismico λ_n , la frequenza centrale risulta:

$$\lambda_n = \int_0^{\omega_n} \omega^n G(\omega) d\omega; \quad \Omega = \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}}$$

e rappresenta la frequenza dove è maggiormente concentrata la funzione di densità e insieme alla durata T_d del moto e all'intensità media λ_0 consente di stimare il picco medio teorici d'accelerazione:

$$u_{\max} = \sqrt{2\lambda_0 \ln\left(2.8 \frac{\Omega T_D}{2\pi}\right)}$$

□ **Fattore di forma (δ):** indica la dispersione della funzione di densità spettrale rispetto alla frequenza centrale e varia tra 0 e 1 ed è:

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}}$$

DURATA

☞ **OSS.** Un accelerogramma contiene generalmente tutte le accelerazioni registrate dall'inizio dell'evento all'istante in cui lo strumento riprende a registrare il solo rumore di fondo, ma ai fini ingegneristici interessa solo la **porzione strong motion** dell'accelerogramma per cui:

def. La **durata del moto sismico** (T_d) è intesa come la durata relativa alla porzione strong motion dell'accelerogramma e può essere calcolata:

- ⇒ l'intervallo di tempo compreso tra il primo e l'ultimo superamento di una soglia di accelerazione (di solito **0.05 g**);
- ⇒ l'intervallo di tempo compreso tra gli istanti in cui l'energia complessiva registrata è del **5%** e **95%**;
- ⇒ il reciproco della frequenza “corner” dello spettro di Fourier

La durata ha una notevole influenza sul danneggiamento soprattutto quando comincia ad essere elevata per effetto del numero di carichi ciclici che produce a cui sia le strutture che i terreni sono sensibili (**degradazione ciclica e liquefazione**).

La durata è legata al tempo richiesto per liberare l'energia accumulata lungo la superficie di rottura e dipende quindi dall'entità di tale energia e quindi dal momento sismico e dalla magnitudo e si ritiene che :

$$T_d \approx \sqrt[3]{M_0}$$

ALTRI PARAMETRI SISMICI

A differenza dei parametri finora visti, prevalentemente correlati ad uno solo degli aspetti del moto sismico, esistono una serie di altri parametri che ne riflettono contemporaneamente più aspetti.

⇒ **Accelerazione RMS (a_{rms})** definita come:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_0}$$

- riflette sia il contenuto in frequenza che l'ampiezza del moto sismico
- è particolarmente utile ai fini ingegneristici non essendo influenzata di picchi d'alta frequenza e dipendendo dalla durata
- è però influenzata dal criterio adottato per definire la durata *strong motion*

⇒ **Intensità di Arias (I_a)** definita come:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt$$

- riflette sia il contenuto in frequenza che l'ampiezza del moto sismico
- è una velocità, generalmente espressa in m/s
- non influenzata dal criterio adottato per definire la durata *strong motion*, dipendendo dall'intera durata

⇒ **Intensità dello spettro di risposta (SI)** definita come:

$$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi, T) dT$$

- riflette sia il contenuto in frequenza che l'ampiezza del moto sismico, in un range del periodo **T** nel quale sono contenuti i periodi fondamentali di gran parte delle strutture
- può esser calcolata per ogni valore del rapporto di smorzamento ξ

⇒ **Accelerazione di picco effettiva (EPA)** definita come l'accelerazione spettrale media ricavata sull'intervallo del periodo compreso tra 0.1 e 0.5 s diviso 2.5

⇒ **Velocità di picco effettiva (EPV)** definita come la velocità spettrale media ricavata su periodo di 1s diviso 2.5

PARAMETRI SISMICI

CONCLUSIONI. I parametri sismici che è possibile utilizzare sono molti: alcuni focalizzano solo uno degli aspetti del moto sismico, altri più di uno, comunque è sempre opportuno utilizzare sempre più di un parametro per caratterizzare il moto sismico al sito avendo cura di scegliere quelli che meglio evidenziano l'aspetto del moto che interessa per il problema in esame.

PARAMETRI DEL MOTO SISMICO	CARATTERISTICHE DEL MOTO DEL TERRENO		
	AMPIEZZA	CONT. FR.	DURATA
Picco d'accelerazione (PGAH o PGV)			
Picco di velocità (PGVH)			
Accelerazione massima sost. (SMA)			
Accelerazione eff. di prog. (EDA)			
Periodo predominante (T_p)			
Ampiezza di banda			
Frequenza centrale (Ω)			
Fattore di forma (δ)			
Intensità spettrale di potenza ($G(\omega)$)			
Durata (T_d)			
Accelerazione RMS (a_{rms})			
Intensità di Arias (I_a)			
Intensità di risposta spettrale ($SI(\xi)$)			
Accelerazione di picco eff. (EPA)			
Velocità di picco eff. (EPV)			

