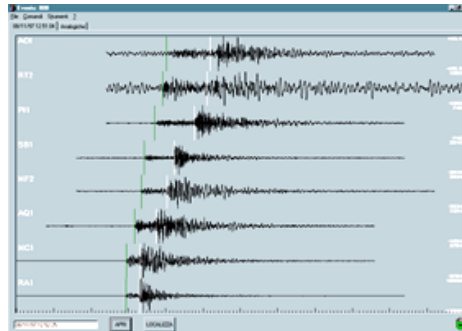




Moto sismico

'misura' e parametri rappresentativi



Prof. Ing. Claudia Madiati



Misura e parametri del moto sismico

Per valutare dal punto di vista ingegneristico gli effetti di un terremoto in un dato sito è necessaria la **conoscenza quantitativa dei movimenti del terreno** conseguenti all'azione sismica (moto sismico)

Il moto sismico è generalmente assai complesso; di norma per le applicazioni pratiche si considera completamente **descritto mediante 3 componenti** traslazionali (2 orizzontali e 1 verticale) tra loro ortogonali

Spesso per scopi ingegneristici non è necessario utilizzare l'intera **storia temporale** del moto, ma solo **alcuni parametri** rappresentativi in grado di caratterizzarlo adeguatamente

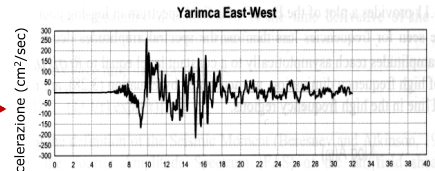
In ogni caso: *"Without a knowledge of the ground shaking generated by earthquakes, it is not possible to assess hazards rationally or to develop appropriate methods of seismic design"* (Housner, 1982)



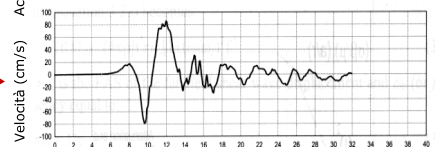
Misura e parametri del moto sismico

Per la misura dello scuotimento sismico sono disponibili 3 diverse categorie principali di strumenti

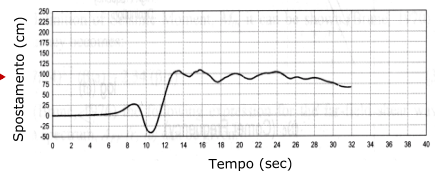
- **Accelerometri**
(misura di accelerazioni)



- **Velocimetri**
(misura di velocità)



- **Sismometri**
(misura di spostamenti)



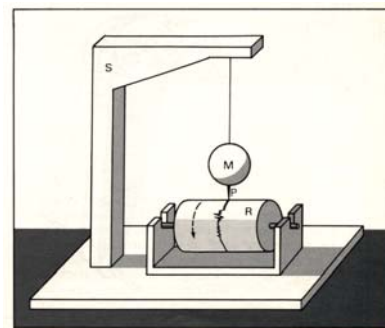
3



Misura e parametri del moto sismico

I tre tipi di strumenti si basano sullo stesso principio (principio di inerzia) e differiscono per il diverso valore del rapporto tra periodo proprio di oscillazione del pendolo T_p e periodo fondamentale del segnale sismico T_g

- Se $T_p \gg T_g$ gli spostamenti del pendolo sono uguali a quelli della base ovvero del suolo (**sismometro** o sismografo a lungo periodo)
- Se $T_p \ll T_g$ gli spostamenti del pendolo sono proporzionali alle accelerazioni del suolo (**accelerometro** o sismografo a corto periodo)
- Se $T_p \approx T_g$ gli spostamenti del pendolo sono proporzionali alle velocità del suolo (**velocimetro**)



NOTA: il periodo di un sistema visco-elastico è proporzionale alla massa e inversamente proporzionale alla costante elastica della molla ($T_0 = 2\pi\sqrt{m/k}$)

4



Misura e parametri del moto sismico

La Teoria delle vibrazioni consentirebbe di passare da una registrazione in termini di accelerazione ad una storia temporale di velocità e/o di spostamento

Tuttavia, per garantire maggiore precisione (l'integrazione produce infatti effetti di filtraggio delle frequenze più alte) **i diversi strumenti, che coprono in maniera ottimale campi diversi del segnale, sono usati con differenti obiettivi:**

- i **sismometri** per la localizzazione dei terremoti
- i **velocimetri** per misure geofisiche di superficie
- gli **accelerometri** nell'ambito della progettazione antisismica per definire (in base alla II legge della Dinamica) le forze agenti. A tali fini vengono utilizzati **accelerometri 'strong motion'**, cioè strumenti capaci di registrare le scosse di terremoti forti (lo scuotimento viene registrato quando l'accelerazione verticale del moto supera una certa soglia, di norma 0.005g)

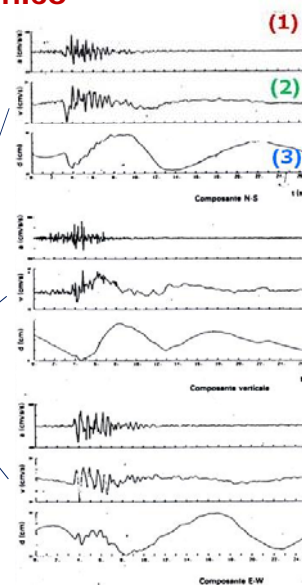
5



Misura e parametri del moto sismico

Gli strumenti di registrazione forniscono l'andamento nel tempo di tre componenti del moto sismico tra loro ortogonali (NS, EW, Up)

(1) accelerogramma
(2) velocigramma
(3) sismogramma
delle tre componenti
di una scossa
sismica

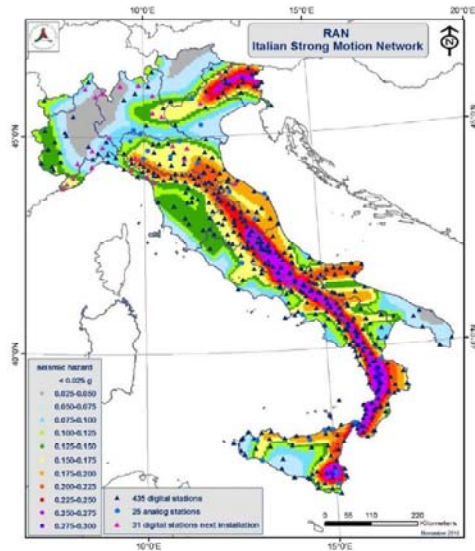


6



Rete Sismica Nazionale (RAN)

In Italia il monitoraggio dei terremoti è gestito dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) con una rete di oltre 400 stazioni sismiche, che comprende diverse reti locali, permanenti e non



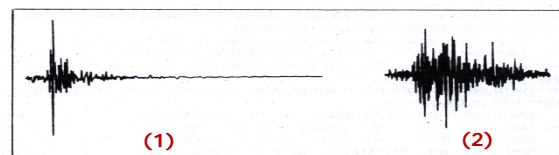
7



Misura e parametri del moto sismico

Dalle registrazioni possono essere desunti alcuni parametri rappresentativi del moto sismico, di cui i principali sono:

- **ampiezza massima** (in termini di accelerazione, velocità, spostamento)
- **contenuto in frequenza** e **periodo predominante**
- **durata**
- un altro elemento significativo è la **forma** del segnale (es. (1) impulsivo; (2) vibratorio)



8



Parametri rappresentativi del moto sismico

AMPIEZZA DEL MOTO SISMICO

Per caratterizzare l'ampiezza del moto sismico il parametro più utilizzato è il **picco di accelerazione** (PGA: peak ground acceleration) o **accelerazione massima** (a_{max}), cioè il picco più alto in valore assoluto dell'accelerogramma

In alcuni problemi ingegneristici può essere utile riferirsi al **picco di velocità*** (PGV o v_{max}) per caratterizzare l'ampiezza del moto alle frequenze intermedie) o al **picco di spostamento*** (PGD o d_{max}) per caratterizzare l'ampiezza del moto alle basse frequenze)

I valori di ampiezza più elevati (e dello stesso ordine di grandezza) competono generalmente alle due componenti orizzontali; la componente verticale presenta di norma ampiezza inferiore

*NB: i valori possono essere poco affidabili se ricavati da velocigramma o sismogramma ottenuti per integrazione dell'accelerogramma

9



Parametri rappresentativi del moto sismico deducibili da un accelerogramma

Ai fini ingegneristici i parametri e i grafici più significativi e utilizzati sono quelli che si ricavano dagli accelerogrammi delle due componenti orizzontali (NS, EW) del moto e sono:

- **ampiezza massima** dell'accelerazione (a_{max} , **PGA**)
- **durata** (T_d)
- **periodo predominante (o fondamentale)** (T_p)

Dagli accelerogrammi possono essere ricavati molti altri parametri e grafici rappresentativi del moto sismico, tra cui:

- spettro di Fourier
- spettro di risposta
- intensità di Arias
- intensità di Housner

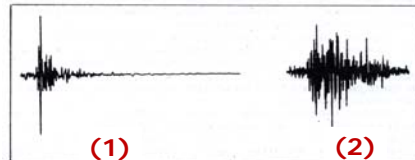
10



Parametri rappresentativi del moto sismico

ACCELERAZIONE MASSIMA E ACCELERAZIONE 'EFFICACE'

E' da notare che da solo il valore di picco dell'accelerazione può non essere rappresentativo della reale severità del moto sismico



In generale i terremoti caratterizzati da valori elevati di PGA sono stati i più distruttivi. Tuttavia se il **picco è isolato** e relativo ad una **frequenza particolarmente elevata** e il terremoto è di **breve durata**, il danno è assai più limitato

Per tener conto del potenziale di danneggiamento reale del terremoto è più utile riferirsi ad un **valore di accelerazione 'efficace'**, ottenuto moltiplicando PGA per un fattore riduttivo (per alcune applicazioni geotecniche si assume ad es. 0.65)

11



Parametri rappresentativi del moto sismico

DURATA

E' un parametro molto importante e che influenza in modo rilevante la risposta dei terreni all'azione sismica

Dipende da molti fattori: meccanismi di faglia, distanza ipocentrale, natura dei terreni attraversati, ecc.

La durata totale (nominale) di un segnale è legata anche alla sensibilità e al valore di soglia dello strumento di registrazione

Per le applicazioni si definiscono pertanto convenzionalmente dei valori 'efficaci' della durata (T_d)

12

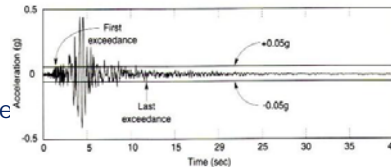


Parametri rappresentativi del moto sismico

DURATA

I principali tipi di durata definiti in modo convenzionale per le diverse applicazioni sono:

1. 'durata bracketed' (D_B): tempo compreso tra il primo e l'ultimo superamento di un valore di soglia dell'accelerazione



2. 'durata uniforme' (D_U): somma degli intervalli di tempo in cui si verifica il superamento di un valore di soglia dell'accelerazione

I valori di soglia per le due precedenti definizioni possono essere fissati in termini assoluti (generalmente pari a 0.05g) ('durata....' assoluta) o come valore percentuale del PGA (generalmente pari al 5% o 10%) ('durata....' relativa)

13



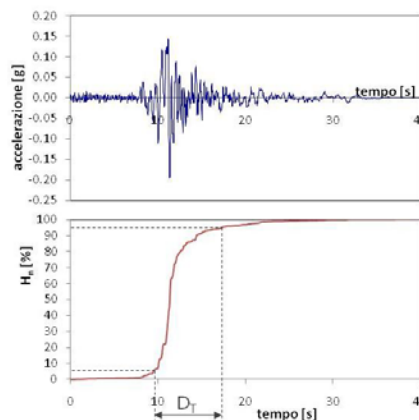
Parametri rappresentativi del moto sismico

DURATA

3. 'durata di Trifunac' (D_T): tempo in cui l'energia della registrazione è compresa tra il 5% e il 95% dell'energia totale

La quantità percentuale di energia associata al moto sismico fino all'istante t , rispetto all'energia totale, può essere espressa mediante il parametro di Husid:

$$H_n(t) = \frac{\int_0^t [a(t)]^2}{\int_0^\infty [a(t)]^2} \cdot 100$$



14



Parametri rappresentativi del moto sismico

CONTENUTO IN FREQUENZA

- Descrive come varia l'ampiezza del moto sismico in relazione alle frequenze contenute nel segnale
- È un parametro molto utile, perché la risposta dinamica di un sistema dipende, oltre che dalle ampiezze, dalle frequenze dei carichi applicati in relazione alle proprie frequenze naturali
- Per il teorema di Fourier una funzione periodica $x(t)$ di periodo T si può esprimere come sommatoria infinita di funzioni armoniche

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t)$$

$c_n \sin(\omega_n t + \phi_n)$

con

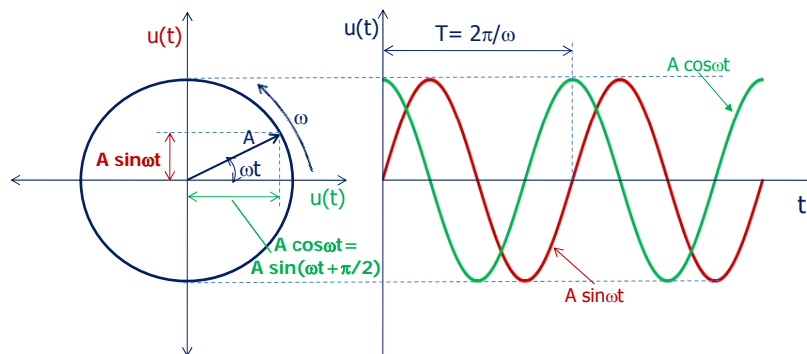
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(\omega_n t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(\omega_n t) dt$$

c_n : ampiezza; ϕ_n : fase; $\omega_n = 2\pi f_n = 2\pi n/T$: frequenza circolare n -esima

15



FUNZIONE ARMONICA



- la frequenza circolare ω (in rad/s) è la velocità angolare del vettore A
- il periodo di vibrazione T (in s) è il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa (ovvero un giro completo del vettore A)
- la frequenza (in Hz) è il numero di cicli nell'unità di tempo

NB: se lo spostamento è una funzione armonica $u(t) = A \sin \omega t$, anche velocità $\dot{u}(t) = \omega A \cos \omega t$ e accelerazione $\ddot{u}(t) = -\omega^2 A \sin \omega t$ sono funzioni armoniche

16



Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI FOURIER

Un accelerogramma è generalmente rappresentato da una funzione discreta (numero finito di punti N ad intervalli di tempo regolari: $x(t_k)$; $t_k = k \cdot \Delta t$; $k = 1, N$)

⇒ vengono determinati N coefficienti $X(\omega_n)$ della serie di Fourier in forma discreta (**Trasformata di Fourier Discreta**) con
 $\omega_n = 2\pi f_n = 2\pi n / (N\Delta t)$

Lo **spettro di Fourier** è un grafico che contiene:

- in ascissa la **frequenza** (o il **periodo**)
- in ordinata l'**ampiezza** (spettro di ampiezza) o la **fase** (spettro di fase)

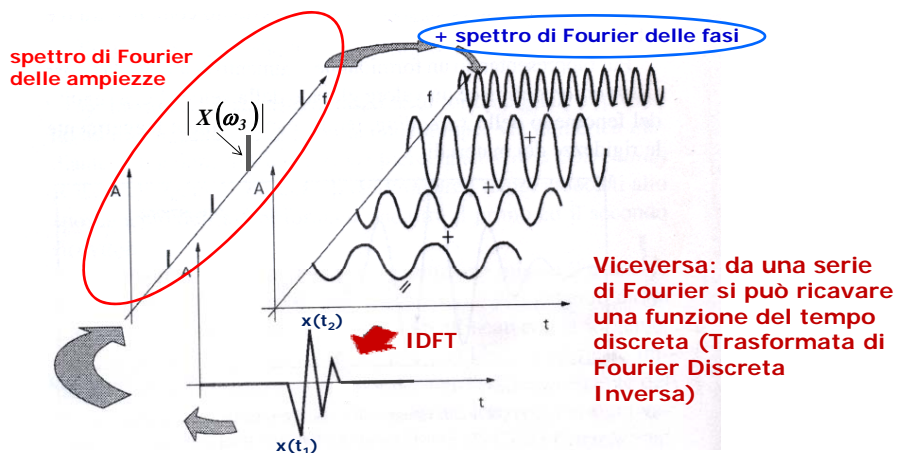
delle singole armoniche della serie di Fourier

17



Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI FOURIER



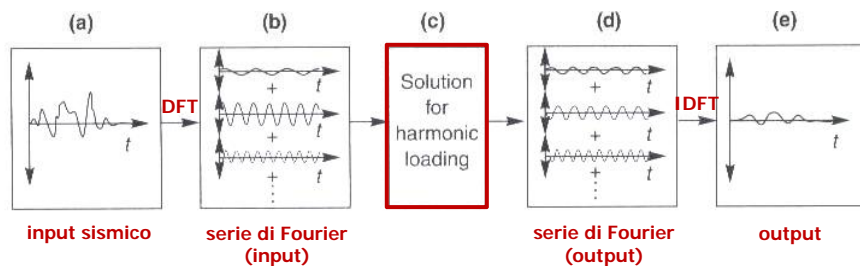
18



Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI FOURIER

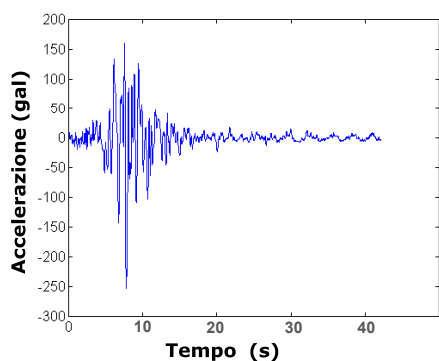
Nei casi in cui vale il **principio di sovrapposizione** degli effetti, la **trasformazione di una funzione complessa** (come ad es. un accelerogramma) in una **serie di N funzioni armoniche** permette di ricavare la soluzione di un problema complesso mediante la sovrapposizione delle N soluzioni, ciascuna relativa ad una singola funzione armonica



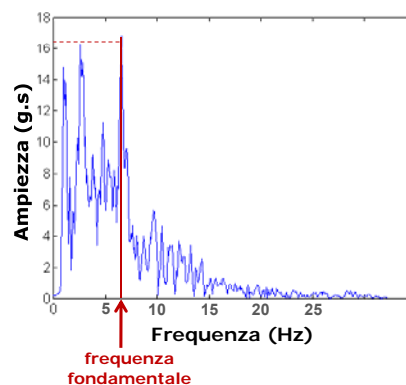
19



Parametri rappresentativi del moto sismico



SPETTRO DI FOURIER



Dallo spettro di Fourier si ricava il valore della **frequenza** (o del **periodo**) **fondamentale** o predominante, cioè quello in corrispondenza del quale si ha il valore dell'**ampiezza massima**

20



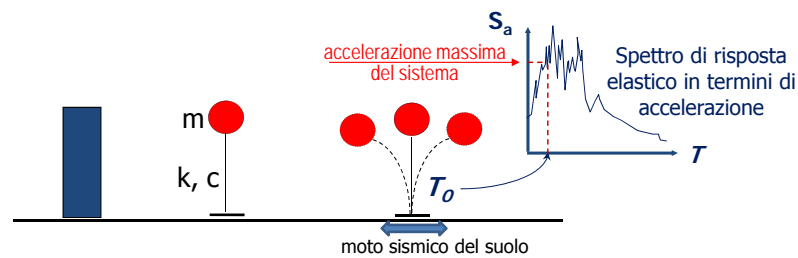
Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

Grafico che descrive la massima risposta (picco in termini di spostamento, velocità o accelerazione) ad un moto di input di un sistema ad un grado di libertà (SDOF) (massa m ; costante elastica k ; coefficiente di viscosità c)

in funzione del suo periodo naturale $T_0 = 2\pi\sqrt{m/k} = 2\pi/\omega_0$
(o della frequenza naturale $f_0 = \omega_0/2\pi$)

e del rapporto di smorzamento $\xi = c/2\sqrt{k m} = c \cdot \omega_0 / 2k$



21

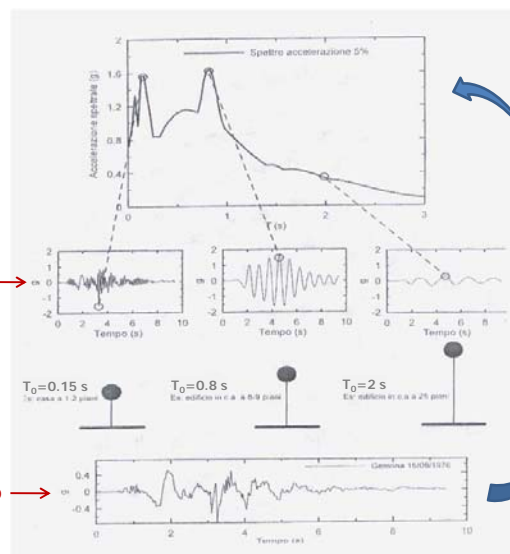


Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

risposta del sistema
in accelerazione

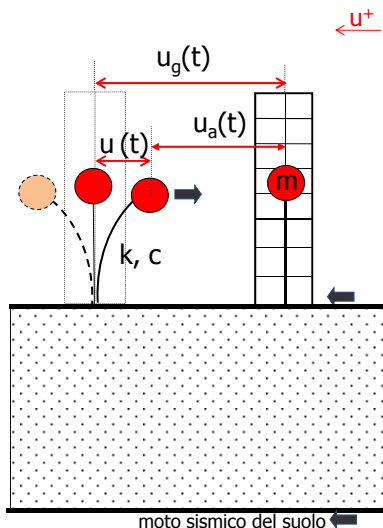
moto sismico del suolo



22



Schema di comportamento sismico di una struttura



$u_g(t)$ = spostamento del terreno

$u(t)$ = spostamento relativo dell'oscillatore

$u_a(t)$ = spostamento assoluto dell'oscillatore

$u_a(t) = u_g(t) + u(t)$

lo stato di sollecitazione dipende da u

$$m\ddot{u}_a(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0$$

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

In generale non interessa l'intera storia di spostamento $u(t)$, ma solo il valore u_{\max}

Per un dato accelerogramma alla base $\ddot{u}_g(t)$ il valore di u_{\max} è funzione di T_0 e ξ

23



Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

- Il grafico che rappresenta i valori di $|u_{\max}| = S_{De}$ al variare di T_0 , per un dato valore di ξ , è lo spettro di risposta in termini di spostamento ($S_{De}(T)$)
- La massima forza statica equivalente agente sul sistema è data da $k \cdot |u_{\max}|$
- Il rapporto $k \cdot |u_{\max}| / m = \omega_0^2 \cdot S_{De} = S_a$ è l'accelerazione corrispondente allo spostamento massimo
- Il grafico che rappresenta i valori di S_a al variare di T_0 , per un dato valore di ξ , è lo spettro di risposta in termini di (pseudo)accelerazione ($S_a(T)$)
- Il grafico che rappresenta i valori di $S_v = \omega_0 \cdot S_{De}$ al variare di T_0 , per un dato valore di ξ , è lo spettro di risposta in termini di (pseudo)velocità ($S_v(T)$)

NB: si può dimostrare che S_a e S_v rappresentano con buona approssimazione la max accelerazione ($\max|\ddot{u}|$) e la max velocità ($\max|\dot{u}|$) assoluta della massa per effetto del moto sismico del suolo

24

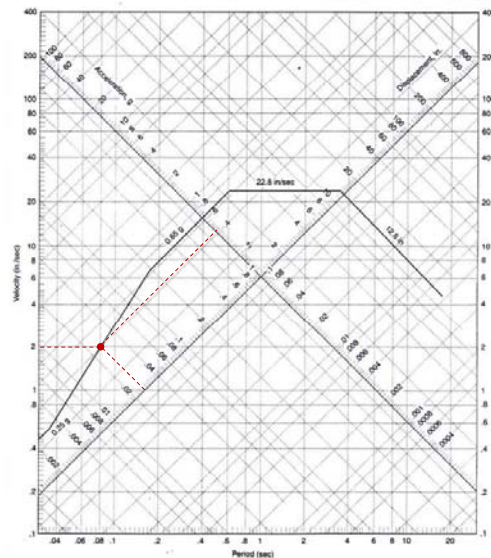


Parametri rappresentativi del moto sismico

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

Gli spettri di risposta in termini di accelerazione, velocità e spostamento possono essere rappresentati su uno stesso grafico denominato

diagramma tripartito



25



Vibrazioni forzate di un SDOF

Per il teorema di Fourier una forzante irregolare nel tempo può essere trasformata in una serie di armoniche (lo studio del moto di un SDOF soggetto ad un carico armonico è agevole)

Nel caso di carico armonico di ampiezza Q_0 e frequenza circolare ω_g , l'equazione di moto di un SDOF è:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -Q_0 \sin \omega_g t$$

La soluzione $u(t)$ è la somma di un termine di moto transitorio tendente a zero (vibrazioni libere smorzate) e di un termine stazionario che rappresenta un moto armonico con frequenza uguale a quella del carico e diversa fase

$$u(t) \cong A \sin (\omega_g t + \phi)$$

dove l'ampiezza A vale:
$$A = \frac{Q_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

con $\xi = c/2m\omega_0$ e $\beta = \omega_g/\omega_0$

26

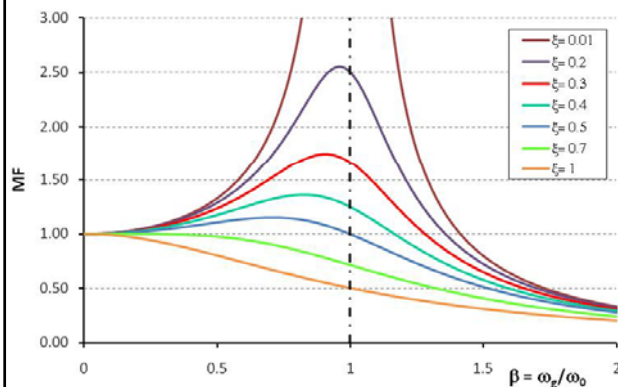


Vibrazioni forzate di un SDOF

Si definisce fattore di amplificazione di un SDOF il rapporto tra l'ampiezza A e l'ampiezza della risposta nel caso statico (Q_0/k)

$$MF(\beta, \xi) = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

è detta funzione di amplificazione dinamica



Si osserva che:

per $\xi=0$ e $\beta=1 \Rightarrow MF \rightarrow \infty$
(condizione di risonanza)

per $\xi \neq 0$ e $\beta = (1-2\xi^2)^{0.5}$ il
fattore di amplificazione è
massimo e vale:

$$MF_{max} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

27



Osservazioni sugli strumenti di misura del moto sismico

Data una massa m soggetta ad una forzante armonica $Q_0 \sin \omega_g t$

l'accelerazione vale: $\ddot{u}_g = (Q_0/m) \sin \omega_g t$

e lo spostamento: $u_g = (Q_0/m \cdot \omega_g^2) \sin \omega_g t$

Assimilando lo strumento ad un SDOF (di caratteristiche m, k, c) l'ampiezza del suo spostamento indotto dalla forzante vale:

$$A = |u| = \frac{Q_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (\xi = c/2m\omega_0; \beta = \omega_g/\omega_0; \omega_0 = \sqrt{k/m})$$

Sismometro \Rightarrow spostamenti

$$\frac{|u|}{|u_g|}(\beta, \xi) = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

Accelerometro \Rightarrow accelerazioni

$$\frac{|u|}{|\ddot{u}_g|}(\beta, \xi, \omega_0) = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot \sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

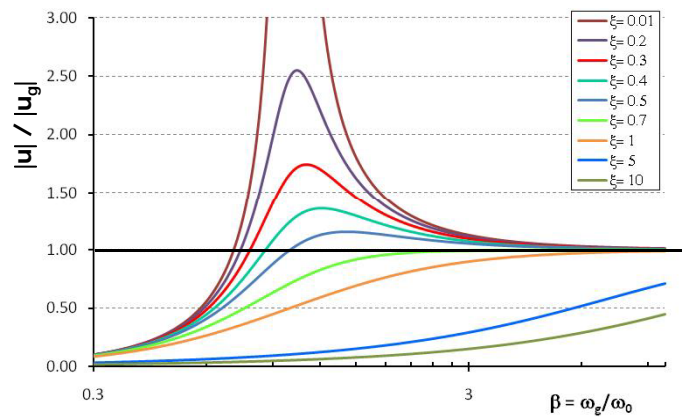
28



Osservazioni sugli strumenti di misura del moto sismico

Sismometro \Rightarrow spostamenti

Per $\xi < 60\%$ e β molto grande ($\omega_0 < \omega_g$, ovvero $T_0 > T_g$) si ha $|u| \approx |u_g|$



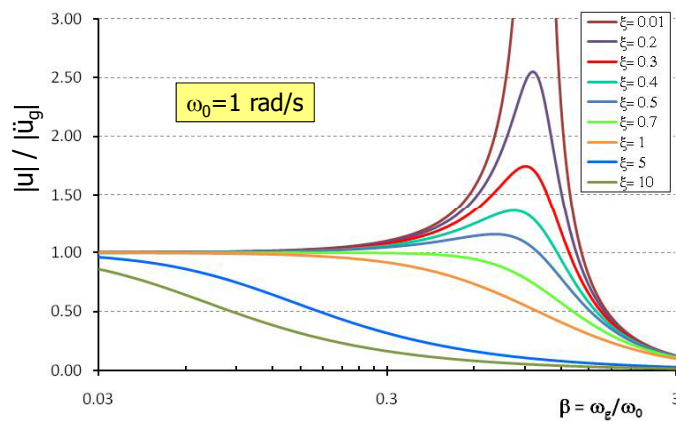
29



Osservazioni sugli strumenti di misura del moto sismico

Accelerometro \Rightarrow accelerazioni

Per $\xi < 60\%$ e β molto piccolo ($\omega_0 > \omega_g$, ovvero $T_0 < T_g$) si ha $|u| \propto |\ddot{u}_g|$



30



Parametri rappresentativi del moto sismico

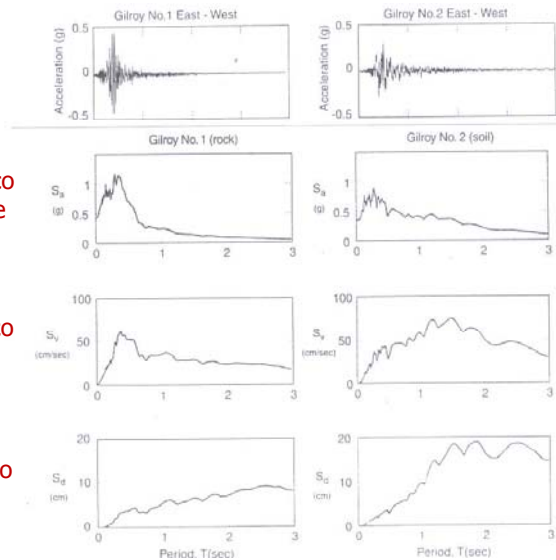
SPETTRI DI RISPOSTA

accelerogramma

Spettro di risposta elastico
in (pseudo)accelerazione

Spettro di risposta elastico
in (pseudo)velocità

Spettro di risposta elastico
in spostamento

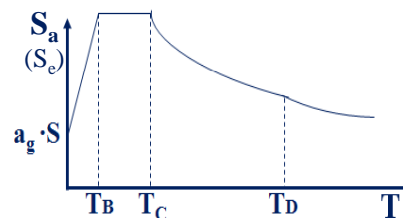


31



Spettri di risposta e normative sismiche

- A partire dagli spettri di risposta elastici si ricavano le sollecitazioni di progetto in ambito strutturale, una volta determinati il periodo proprio T e il rapporto di smorzamento ξ (funzione di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione)
- La normativa fornisce per un dato sito la forma dello spettro di risposta elastico (ricavato mediante studi di tipo probabilistico, facendo riferimento all'insieme di eventi che possono produrre risentimento in una data area e tenendo conto della risposta del sottosuolo)
- Gli spettri di normativa sono definiti assegnando il valore di a_g (accelerazione massima su terreno rigido di riferimento), il valore di S (fattore di amplificazione stratigrafica e topografica), e la **forma** dello spettro in relazione alla classe di sottosuolo e al valore di ξ



32



Altri parametri rappresentativi del moto sismico

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

con g =accelerazione di gravità; $a(t)$ =accelerazione

Ha le dimensioni di una velocità

➤ Intensità di Housner
$$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi, T) dT$$

con S_v =spettro di risposta in pseudovelocità

Ha le dimensioni di uno spostamento; generalmente è calcolata per $\xi=5\%$

N.B. : l'intensità di Arias e l'intensità di Housner permettono di tener conto contemporaneamente sia dell'ampiezza sia del contenuto in frequenza del moto sismico