

INTRODUZIONE AL CONTROLLO STRUTTURALE NELL'INGEGNERIA SISMICA

Marco BOZZA *

* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

INTRODUZIONE

L'azione sismica (terremoto) agente su di una struttura esercita sulla stessa delle vibrazioni che, che a seconda dell'intensità, possono pregiudicare il comfort per gli utenti, la destinazione d'uso o, nei casi più gravi, la stabilità complessiva della costruzione. Per attenuare gli effetti causati da queste pericolose vibrazioni si cerca di esercitare sulla costruzione un controllo strutturale.

In Ingegneria Sismica, per *controllo strutturale* si intende l'insieme delle tecniche di intervento che si realizzano su di una struttura per modificarne la risposta quando è soggetta ad una sollecitazione sismica, in particolare per attenuare gli effetti delle vibrazioni indotte sulla struttura stessa. In altre parole il controllo strutturale va quindi inteso come il complesso di concetti e tecniche che mirano a fornire alle costruzioni una adeguata protezione dalle conseguenze di brevi ma intensi carichi sismici.

A partire dai primi anni '70 sono stati fatti notevoli progressi, teorici e sperimentali, in tema di controllo strutturale: i maggiori contributi vengono da ricerche condotte negli Stati Uniti, Giappone ed Europa. Il "controllo" del comportamento di una struttura si realizza dotando la costruzione di opportuni sistemi ausiliari che, nel breve intervallo di durata dell'azione sismica, intervengono a modificare le caratteristiche strutturali (rigidezza, smorzamento), con l'effetto di migliorarne la risposta e proteggerne lo stato di servizio. Questi sistemi ausiliari costituiscono il:

- *CONTROLLO STRUTTURALE ATTIVO* o *ASC (Active Structural Control)* se sono azionati da energia esterna,
- *CONTROLLO STRUTTURALE PASSIVO* o *PSC (Passive Structural Control)* se non hanno bisogno di energia esterna.

EQUAZIONE DEL MOTO DELL'OSCILLATORE SEMPLICE

Per cogliere gli aspetti fondamentali del comportamento dinamico di una costruzione sollecitata da un sisma e, quindi, comprendere come poter intervenire sul controllo strutturale è necessario qualche richiamo analitico di dinamica delle strutture. Supponendo in prima approssimazione che il comportamento dinamico di un edificio possa essere simulato come quello di un oscillatore semplice ad un grado di libertà di massa M , rigidezza K e smorzamento viscoso C , l'equazione del moto si scrive come:

$$(1) \quad M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = F(t)$$

che rappresenta l'equilibrio dinamico tra tutte le forze agenti sul sistema. Nella (1) i tre addendi a primo membro rappresentano, rispettivamente, la *forza d'inerzia*, la *forza viscosa* e la *forza elastica*, essendo $x(t)$ lo spostamento della sommità dell'edificio rispetto a terra, mentre a secondo membro $F(t)$ rappresenta la forzante. Nel caso in esame la forzante $F(t)$ rappresenta l'azione sismica con accelerazione del suolo $\ddot{y}_s(t)$ alla base della struttura, ovvero una forza d'inerzia pari a $F(t) = -M\ddot{y}_s(t)$ applicata alla massa M della struttura su suolo fisso, per cui:

$$(2) \quad M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = -M\ddot{y}_s(t)$$

Per evidenziare i parametri caratteristici dell'oscillatore l'equazione del moto (2) può essere scritta anche nella forma:

$$(3) \quad \ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = -\ddot{y}_s(t)$$

dove le quantità:

$$(4) \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \xi = \frac{C}{C_{cr}}$$

rappresentano, rispettivamente, la *pulsazione naturale* e il *rapporto di smorzamento* del sistema, essendo:

$$(5) \quad C_{cr} = 2M\omega_n$$

lo smorzamento critico. La frequenza naturale del sistema è data da:

$$(6) \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

Caso di forzante di tipo armonico

Se la forzante è armonica del tipo $F(t)=F\cos(\omega t)$, con $\omega=2\pi f$, l'equazione del moto:

$$(7) \quad M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F\cos(\omega t)$$

ha una soluzione particolare del tipo:

$$(8) \quad x(t) = X\cos(\omega t - \phi)$$

essendo:

$$(9) \quad X = \frac{F}{\sqrt{(K - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2}}$$

$$(10) \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{C\omega}{K - M\omega^2}\right)$$

rispettivamente l'*ampiezza* e l'*angolo di fase*, ovvero l'intensità massima e il ritardo della risposta $x(t)$ rispetto all'ingresso $F(t)$.

BILANCIO ENERGETICO DEL SISTEMA

Per capire quando la risposta (8) può assumere valori elevati (spostamenti elevati) si consideri l'ampiezza X (il fattore temporale armonico non dà contributi in questo senso). La (9) può essere riscritta nella forma seguente:

$$(11) \quad X = \frac{F}{K} \cdot D\left(\xi, \frac{f}{f_n}\right)$$

con:

$$(12) \quad D\left(\xi, \frac{f}{f_n}\right) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi\frac{f}{f_n}\right)^2}}$$

Dalla (11) si vede che l'ampiezza X è pari allo spostamento elastico F/K dovuto alla forza statica F moltiplicato per la quantità $D(\xi, f/f_n)$, detta *fattore di amplificazione*, dipendente dallo smorzamento strutturale ξ e dal rapporto f/f_n . La risposta $x(t)$ assume allora la forma:

$$(13) \quad x(t) = \frac{F}{K} \cdot D\left(\xi, \frac{f}{f_n}\right) \cdot \cos(2\pi f t - \phi)$$

Dalla (13) si vede subito che l'intensità della risposta dipende direttamente dal fattore di amplificazione D : per $f \approx f_n$ (condizioni di risonanza) $D(\xi, 1) = 1/2\xi$, per cui:

$$(14) \quad x(t) = \frac{F}{2\xi K} \cdot \cos(2\pi f t - \phi)$$

Integrando la (2) rispetto allo spostamento si ottiene il *bilancio energetico* del sistema oscillatore-forzante sismica:

$$(15) \quad T = L_k + L_c + L_e$$

dove:

$$(16) \quad T = \int M \ddot{x}(t) dx = \int M \ddot{x}(t) \dot{x}(t) dt = \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

energia cinetica dell'oscillatore

$$(17) \quad L_k = - \int K x(t) dx = - \frac{1}{2} K x^2$$

lavoro elastico

$$(18) \quad L_c = - \int C \dot{x}(t) dx = - \int C \dot{x}(t)^2 dt$$

lavoro dissipativo viscoso

$$(19) \quad L_e = - \int M \ddot{x}_s(t) dx$$

lavoro esterno

INTERVENTI DEL CONTROLLO STRUTTURALE

Le relazioni fin qui trovate suggeriscono immediatamente i possibili criteri del controllo strutturale. Dalla (14) si vede che bassi valori dello smorzamento ξ causano, in condizioni di risonanza, grandi amplificazioni della risposta, mentre nella (15) grandi valori dell'energia sismica in ingresso provocano elevati valori dell'energia cinetica dell'oscillatore. Si conclude quindi, da queste semplici considerazioni, che le grandi linee di intervento proposte dal controllo strutturale antisismico sono costituite da:

- tecniche di aumento artificiale dello smorzamento strutturale;
- tecniche di variazione ad hoc della rigidità globale della struttura;
- tecniche di attenuazione dell'energia in ingresso;
- tecniche ibride dei casi precedenti.

Tecniche di aumento artificiale dello smorzamento strutturale

Consentono di attenuare la risposta risonante. Infatti poiché in risonanza la forzante $F(t)$ e la velocità sono in fase l'amplificazione dinamica dello spostamento può essere controllato solamente con forze in controfase alla velocità, ovvero aumentando artificialmente lo smorzamento viscoso. I dispositivi che consentono di raggiungere tale scopo sono:

- dissipatori viscosi (coulombiani) di interpiano o di piano-suolo;
- controventature attive controllate da un meccanismo elettroidraulico;
- dissipatore inerziale (passivo) a massa ausiliaria accordata.

Tecniche di variazione ad hoc della rigidità globale della struttura

Queste tecniche hanno lo scopo di rendere la costruzione "insensibile" all'azione sismica. Esiste un intervallo di rigidità per costruzioni medio-basse (particolarmente vulnerabili ai terremoti) in cui l'accelerazione del suolo viene amplificata dalla costruzione stessa, con gravi conseguenze. Quello che si cerca di ottenere è di modificare artificialmente la rigidità complessiva della struttura, in modo tale da farla uscire dal suddetto intervallo di sensibilità al sisma. Questo può essere ottenuto con due procedimenti:

- riduzione della rigidità della costruzione facendola appoggiare su appoggi elastomerici (tecnica di base isolation);
- aumento della rigidità attivando automaticamente controventature che in condizioni non-sismiche vengono disattivate. Se la variazione di rigidità viene automatizzata con tecnica AVS (Active Variable Stiffness), il dispositivo di controllo può "decidere" di attivare o meno le controventature ai singoli piani della costruzione.

Tecniche di attenuazione dell'energia in ingresso

Consentono di aumentare lo smorzamento naturale della costruzione, applicando le seguenti tecniche:

- una tecnica passiva consiste nell'inserimento nella costruzione di dissipatori ad attrito viscoso o coulombiano agenti nel ciclo di escursione di interpiano;
- una tecnica attiva consiste nell'inserimento di controventature azionate, da energia esterna, da un servocomando elettroidraulico: dei trasduttori rilevano l'inizio del moto del suolo e attivano l'azione di contrasto per il breve intervallo di durata del sisma.
- smorzatore inerziale di Frahm: consiste nell'accoppiamento di un oscillatore secondario di massa m all'oscillatore principale M . Accordando opportunamente m con M , la risposta di m ritarda di un quarto di ciclo rispetto a quella di M e quindi l'azione di richiamo elastico che m esercita su M è in controfase alla velocità di M : esso equivale dunque per M ad uno smorzamento viscoso.

Tecniche ibride dei casi precedenti

Le tecniche ibride combinano più azioni meccaniche per aumentare la prestazione complessiva del sistema ausiliario.