

Sistemas de protección estructural

Propósito

En esta sección se revisan los sistemas de protección adaptados a las estructuras para mitigar el daño de fuerzas ambientales adversas como los sismos, los vientos y las mareas. Se entienden como dispositivos que se agregan a las estructuras para desarrollar el efecto mitigante aludido.

Para una mejor comprensión de estos sistemas, se revisan los conceptos básicos sobre teoría de vibraciones aplicables a estructuras.¹

Tipos de sistemas de protección

Se identifican tres tipos de estos sistemas: de aislamiento sísmico, de disipación pasiva de energía, y controles activos. Se describen sus efectos y se listan los más conocidos.

De aislamiento sísmico

Estos dispositivos son colocados en la base o cimentación de la estructura. Se distinguen los siguientes:

- Soportes con elastómeros.
- Soportes de plomo y caucho.
- Soportes con elastómeros con dispositivos disipadores de energía.
- Péndulo de fricción deslizante.
- Soportes deslizantes planos con dispositivos de restauración de fuerzas.
- Soportes deslizantes lubricados con dispositivos de disipación de energía.

La flexibilidad y capacidad de absorción de estos dispositivos les permite absorber y reflejar parcialmente la energía del sismo antes de su transmisión a la estructura. Con ello se reduce la demanda de disipación de la energía en la estructura aumentando su tiempo de vida útil.

De disipación pasiva de energía

Los dispositivos de este tipo son usados tanto para solicitaciones sísmicas como para cargas de vientos. Introducen el concepto de disipación de energía asociado al de amortiguación suplementaria. Se incorporan a las estructuras con la finalidad de absorber o consumir una porción de la energía de ingreso. Se trata de los siguientes.

- Amortiguadores metálicos.
- Amortiguadores de fricción.
- Amortiguadores visco-elásticos.
- Amortiguadores viscosos.

¹ Referencia principal: International Centre for Mechanical Sciences. *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*. Springer - Verlag. Wien - New York, 1994.



- Amortiguadores de masa calibrados.
- Amortiguadores líquidos calibrados.

Estos dispositivos reducen la demanda de disipación de energía en los principales componentes de la estructura y minimizan los posibles daños estructurales.

De controles activos

Se dispone de un área de protección estructural y de un suministro externo de energía. El movimiento de la estructura es controlado o modificado por la acción de sistemas de control. Se distinguen los siguientes.

- Sistema activo de abrazaderas.
- Amortiguadores activos de masa.
- Sistema activo de amortiguación rigidez variable.
- Sistemas de pulso.
- Apéndices aerodinámicos.

Elementos de vibraciones mecánicas y control de vibraciones

Caso de oscilaciones forzadas con un grado de libertad

Considérese un grupo de elementos de masa, amortiguación y rigidez, en distintos arreglos y que es requerido por la fuerza $f(t)$. La relación típica de equilibrio es:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = f(t)$$

Con los coeficientes: m de masa, d de amortiguación y c de rigidez. La solución general se plantea en la forma.

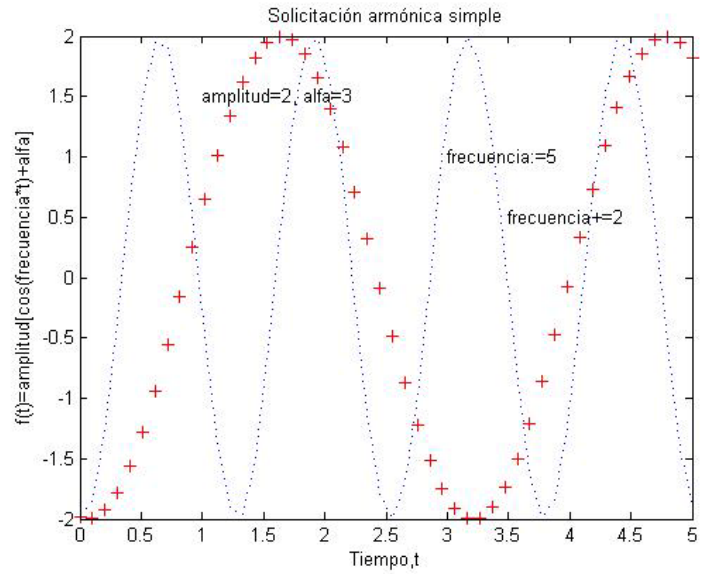
$$x(t) = x_H(t) + x_p(t)$$

Una excitación armónica simple se presenta en la forma sinusoidal

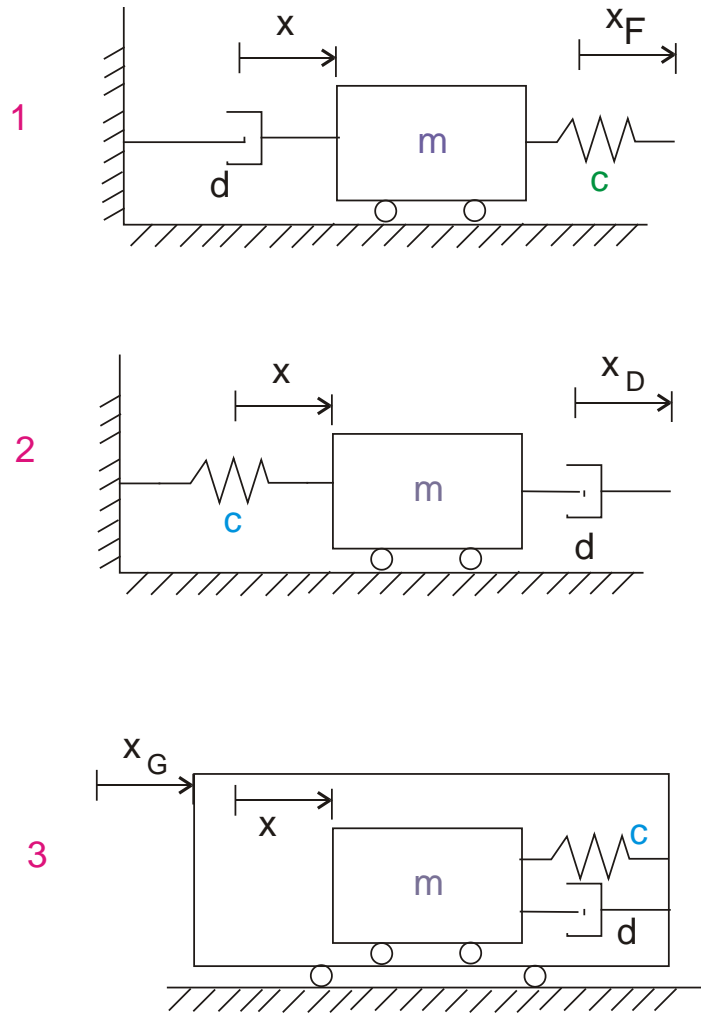
$$f(t) = \hat{f} \cos(\Omega t + \alpha)$$

Donde el símbolo \hat{f} (llamado acento circunflejo) se utiliza para identificar la amplitud. Ω es la frecuencia. Le corresponde el periodo $T=2\pi/\Omega$ (a mayor frecuencia, menor el periodo). También se expresa como $\Omega=2\pi N$, donde N es el número de ciclos por unidad de tiempo (es más alto ante mayor frecuencia).

Tiene la forma según se ilustra en el siguiente gráfico.



Este tipo de solicitaciones pueden estudiarse para los siguientes casos.



CASOS DE EXCITACIONES ARMÓNICAS

En todos los casos, se trata de resortes lineales, amortiguadores lineales y masa rígida.



◆ **Caso 1**

Por un desplazamiento x_f en el extremo, al fin del resorte. La relación de equilibrio obedece a la siguiente expresión.

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = cx_f(t)$$

◆ **Caso 2**

Por un desplazamiento x_D en el amortiguador. La expresión correspondiente es la siguiente.

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = d\dot{x}_D(t)$$

◆ **Caso 3**

Por una excitación x_G en la base. La expresión de equilibrio es como sigue.

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = -m\ddot{x}_G(t)$$

En este caso, x es el desplazamiento relativo de la masa m con respecto a la base en movimiento.

Caso de amortiguación estructural

Aquí, la amortiguación y la fuerza de restauración no están separadas. En el modelo, el amortiguador y el resorte forman un solo elemento físico. Se presentan los siguientes casos.

Caso 1. Modelo visco-elástico lineal que obedece a la expresión.

$$f = cx + d\dot{x}$$

Caso 2. Combinación de resorte no lineal con amortiguador no lineal, que responde a la siguiente expresión de equilibrio.

$$f = c(x) + d(\dot{x})\dot{x}$$

Caso 3. Elemento general, con la expresión igualmente genérica.

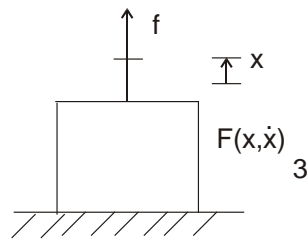
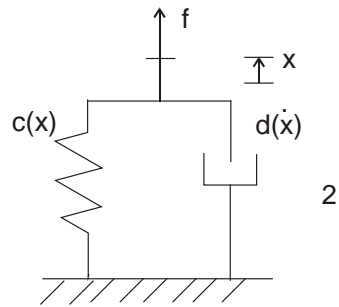
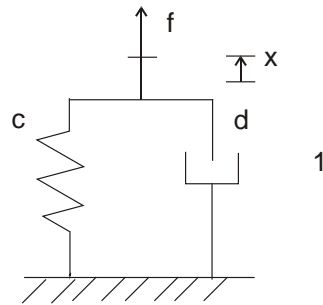
$$f = F(x, \dot{x})$$

Para el caso lineal 1, la pérdida de energía por ciclo se puede aproximar con:

$$\Delta E = k\hat{x}_p^2 \quad d = \frac{k}{\pi\Omega}$$

Siendo d una constante. \hat{x} es el símbolo para la amplitud. Ω es la frecuencia. La expresión es conocida como amortiguación estructural. Es ilustrativo conocer que la mayoría de la energía mecánica es disipada en las fronteras y en las uniones de partes de la estructura.





MODELOS DE AMORTIGUACIÓN ESTRUCTURAL

El control óptimo

Considérese nuevamente el caso de la relación de equilibrio, con participación de m , d y c .

En este caso, la función $f(t)$ se interpreta como la fuerza capaz de amortiguar las vibraciones para conducir el sistema al equilibrio, en un tiempo mínimo. En este caso, en la teoría de control óptimo, se trata de determinar la función $f(t)$.