

PROCEDIMIENTOS

En el texto siguiente se describen brevemente los procedimientos internos que emplea ECO en sus funciones principales. Se incluyen las referencias para que el usuario pueda profundizar en los temas que le interesen.

MODELO

En ECO se pueden modelar edificios con diafragmas rígidos o sin ellos. Al ser el modelo tridimensional, cada nudo tiene seis grados de libertad, que pueden ser los seis independientes o tres independientes y tres dependientes, según estén ligados o no a un diafragma rígido. Los diafragmas rígidos son definidos por el usuario al emplear tableros. Todos los tableros que tienen al menos un nudo en común, forman un diafragma rígido. Los nudos que están en el diafragma tienen tres grados de libertad independientes (desplazamiento vertical y rotaciones alrededor de los ejes horizontales) y tres dependientes (desplazamientos horizontales y rotación alrededor del eje vertical). Los desplazamientos en las libertades dependientes son valuados por ECO en función de los desplazamientos del nudo maestro del diafragma. El nudo maestro de cada diafragma es establecido automáticamente por ECO, haciendo las transformaciones apropiadas en las matrices de rigidez de los elementos. Los nudos que no están ligados a un diafragma, tienen sus seis grados de libertad independientes.

ECO no tiene límites preestablecidos en cuanto a cantidad de nudos, miembros, etc. El programa puede direccionar un máximo de 2GB de memoria RAM. El límite se establece desde un punto de vista práctico en cuanto a la dimensión del modelo que pueda ser manejado de forma interactiva.

TABLEROS

Los tableros en ECO cumplen dos funciones principales. La primera es permitir al usuario definir diafragmas rígidos. La segunda es permitir cargar los miembros en el borde según sus áreas tributarias. Los tableros que tienen tres o cuatro lados, ECO los considera “cargables”. Es decir que puede cargar automáticamente las trabes que lo limitan, en función de la carga sobre el tablero. Cada lado puede estar constituido por varios miembros con la condición de que sean colineales. El área tributaria de cada lado lo determina ubicando las líneas que bisectan cada esquina y determinando sus puntos de cruce.

MATRICES DE RIGIDEZ DE BARRAS

Las matrices de rigidez de las barras las genera ECO teniendo en cuenta la zona infinitamente rígida de los extremos, según el factor de zona rígida definido por el usuario. Las matrices incluyen las deformaciones por cortante. Las matrices son calculadas al momento de ser requeridas y se almacenan en memoria principal. Con el objeto de economizar memoria RAM, ECO tiene en cuenta la igualdad entre barras para almacenar sólo las que son diferentes.



MATRICES DE RIGIDEZ DE PANELES

Según los grados de libertad asignados a los nudos de cada panel, ECO genera su matriz de rigidez. En todos los casos la matriz de rigidez la obtiene por integración numérica (Bathe, Wilson 1976). Para el elemento con dos grados de libertad por nudo, emplea el elemento cuadrilátero isoparamétrico en esfuerzos planos descrito en la referencia citada. Para el elemento con tres grados de libertad por nudo, emplea un elemento que tiene rigidez en las direcciones 1-2 de su plano además de la rigidez al giro alrededor de la dirección 3 (Ibrahimbegovic y col. 1990). Para el elemento con seis grados de libertad por nudo, emplea un elemento generado utilizando el de tres grados de libertad por nudo y el elemento de placas en flexión (Zienkiewicz 1971).

MASAS

Para los valores de la matriz diagonal de masas ECO sigue el siguiente procedimiento:

- Crea los vectores de carga que aparecen en la combinación para masas especificada por el usuario y los combina.
- Del vector de cargas obtenido toma los valores que corresponden a desplazamiento en dirección Z . Estos valores, divididos entre g , los considera como la masa adherida al nudo correspondiente.
- Obtiene la masa total y en centro de masas de los nudos que pertenecen al mismo diafragma. La masa así obtenida, la asigna a la masa traslacional en dirección X y dirección Y para el diafragma.
- La masa rotacional la obtiene calculando el momento polar de inercia del diafragma y considerando la masa traslacional uniformemente repartida sobre el diafragma.
- Los nudos que no pertenecen a un diafragma los considera solo con masa traslacional adherida, sin masa rotacional.

ANÁLISIS

El procedimiento de análisis empleado es el método matricial de rigideces. De la matriz de rigidez de la estructura se almacena en memoria sólo el perfil de la misma. Para la solución del sistema de ecuaciones se emplea el método de Gauss adaptado para trabajar la matriz perfilada. Si no hay suficiente memoria sigue un procedimiento de solución por bloques.

ANÁLISIS MODAL

Para la obtención de los valores característicos de la matriz generada para el análisis modal, emplea el método de iteración del subespacio (Bathe y Wilson 1972). La modelización de las masas se hace de la forma anteriormente descrita. La normalización de modos la hace de tal manera que $\mathbf{Z}_n^t \mathbf{m} \mathbf{Z}_n = 1$, donde \mathbf{Z}_n es el vector modal del modo n y \mathbf{m} es la matriz diagonal de masas.



ANÁLISIS P-DELTA

El análisis *P-delta* se realiza obteniendo la matriz de rigidez geométrica y adicionándosela a la matriz de rigidez elástica del miembro (Wilson 1998). Para determinar la carga P que interviene en la matriz geométrica de cada miembro sigue un procedimiento iterativo. En la primera iteración considera todas las cargas $P=0$. Con las fuerzas axiales obtenidas, modifica las matrices de rigidez de cada miembro y recalcula, hasta que llega a la convergencia cuando la diferencia máxima de cargas P entre dos iteraciones es menor que un valor máximo preestablecido. Las matrices de rigidez de los miembros modificadas con la matriz de rigidez geométrica, son empleadas al realizar el análisis estático o el análisis modal.

ANÁLISIS SÍSMICO DINÁMICO

El análisis sísmico dinámico que realiza ECO es un análisis de respuesta a espectro. Una vez hecho el análisis modal, calcula los siguientes valores:

$$C_n = \frac{Z_n m J}{Z_n^t m Z_n}$$

C_n coeficiente de participación del modo n
 J vector con unos en la dirección que interesa y ceros en las demás
 m matriz diagonal de masas
 Z_n vector modal para el modo n

$$X_n = \frac{a_n g}{\omega_n^2 Q_n} C_n Z_n$$

X_n vector de desplazamientos
 a_n ordenada del espectro de diseño para el modo n
 g aceleración de la gravedad
 Q_n factor de reducción por ductilidad del modo n
 ω_n frecuencia circular del modo n

$$F_n = m \omega_n^2 X_n$$

F_n vector de fuerzas sísmicas equivalentes para el modo n

Con estos valores, determinados para cada modo en cada dirección de análisis, hace lo siguiente:

- Si se selecciona *Combinación de respuestas - Fuerzas equivalentes en Parámetros de análisis sísmico*, obtiene las fuerzas respuesta realizando la combinación modal de los vectores de fuerzas sísmicas equivalentes empleando el método **CQC**. Las fuerzas obtenidas las aplica sobre los diafragmas considerando la excentricidad estática con respecto a sus centros de masa y genera los estados de carga $SIFx1$, $SIFx2$, $SIFy1$ y $SIFy2$. La excentricidad dinámica la determina dividiendo la respuesta de torsión M_z en el nivel entre la fuerza sísmica calculada.



- Si se selecciona *Combinación de respuestas – Cortantes equivalentes* en *Parámetros de análisis sísmico*, sigue un procedimiento similar al descrito anteriormente, sólo que la combinación de respuestas modales la hace a nivel de cortantes, no de fuerzas. Una vez obtenida la combinación de cortantes, regresa a fuerzas y genera los estados de carga que se describen en el párrafo anterior.
- Si se selecciona *Combinación de respuestas – Elementos mecánicos* en *Parámetros de análisis sísmico*, no genera fuerzas sísmicas equivalentes, sino que para cada vector de desplazamientos modales calcula los elementos mecánicos en cada sección intermedia de cada miembro. Posteriormente realiza la combinación modal, empleando el método **CQC**, de los valores obtenidos para cada modo. Para tener en cuenta la torsión accidental especificada por el reglamento en particular que se esté utilizando, genera los estados de carga de torsión estática accidental pura **SIMx** y **SIMy**.

Si los estados de carga SIMx o SIMy intervienen en una combinación de diseño, ECO combina los valores calculados modalmente, que se obtienen sin signo, con los valores de estados de carga estáticos, asignándoles el signo según lo defina el usuario con la opción Estructura - Parámetros Globales – Signo respuesta análisis modal.

ANÁLISIS SÍSMICO ESTÁTICO

Para realizar el análisis sísmico estático ECO sigue el siguiente procedimiento:

Para poder realizar en ECO un análisis sísmico estático debe existir en cada nivel un diafragma cuya masa traslacional sea al menos el 90% de la masa total en el nivel.

- Obtiene las fuerzas sísmicas estáticas.
- Reduce las fuerzas sísmicas estáticas, si se capturó el período fundamental en cada dirección al definir los datos sísmicos.
- Obtiene el centro de torsión. La definición de centro de torsión que se considera es la siguiente: “centro de torsión es el punto por el que debe pasar la línea de acción de la **fuerza cortante** sísmica para que el movimiento relativo entre dos niveles consecutivos que limitan el entrepiso sea exclusivamente de traslación” (Bazán y Meli 1985).
- Con las excentricidades calculadas y excentricidades accidentales, obtiene la posición de las fuerzas sísmicas en el diafragma y genera los estados de carga **SIFx1**, **SIFx2**, **SIFy1** y **SIFy2**.

*Adicionalmente a estos estados de carga, ECO genera los estados de carga **NGx** y **NGy**, con el procedimiento que se detalla a continuación. Estos estados de carga tienen las fuerzas sísmicas aplicadas en los diafragmas en una posición tal que no exista giro.*

Para determinar el centro de torsión sigue el siguiente procedimiento:



- Analiza el edificio para los vectores de fuerzas sísmicas estáticas reducidas F_x y F_y aplicadas en el centro de masa, obteniendo los giros que se producen en cada nivel y los almacena en los vectores G_x y G_y , que corresponden a los giros producidos por las fuerzas aplicadas en dirección X y Y respectivamente.
- Obtiene una matriz de flexibilidades F . Para cada nivel n aplica un momento unitario en el nivel n y determina los giros en cada nivel del edificio, obteniendo el renglón n de la matriz de flexibilidades F .
- Obtiene la matriz de rigideces K invirtiendo la matriz de flexibilidades F .
- Multiplica $K * G_x$ y $K * G_y$, obteniendo los vectores M_{gx} y M_{gy} , que son los momentos que se deben aplicar con las fuerzas sísmicas para evitar el giro.
- Con los momentos M_{gx} , M_{gy} y las fuerzas F_x , F_y obtiene el punto donde se deben aplicar las fuerzas para que no exista giro.
- Obtiene el centro de torsión en cada nivel, que viene siendo la posición de la cortante cuando las fuerzas sísmicas en cada dirección se encuentran en una posición tal que no producen giro al edificio.

DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL

ECO puede realizar el diseño de elemento a flexocompresión biaxial considerando que el elemento esta reforzado con cero tubular o concentrado.

Para las secciones transversales que se diseñan a flexocompresión en que se escoge acero tubular utiliza las formulas de Bresler (Bresler 1960).

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_x} + \frac{1}{P_y} - \frac{1}{P_o} \quad \text{y} \quad \left(\frac{M_x}{M_{x_o}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_y}{M_{y_o}} \right)^\beta = 1$$

ECO emplea la primera formula si se selecciona Bresler en los parámetros de información para diseño a flexocompresión. Si se selecciona Gouwens, ECO emplea la segunda, siguiendo para este caso el procedimiento propuesto por Gouwens (Gouwens 1975) para determinar los exponentes α y β .

Para las secciones transversales que se diseñan a flexocompresión en que se escoge acero concentrado, ECO obtiene la superficie del diagrama de interacción de manera “exacta” para la distribución de armado indicada por el usuario. Para realizar esto sigue un procedimiento similar al propuesto por Davister (Davister 1986).



REFERENCIAS

- K.J. BATHE y E.WILSON. “Numerical Methods in finite element analysis”. PRENTICE-HALL, 1976.
- E. BAZAN y R. MELI. “Manual de diseño sísmico de edificios”. LIMUSA, 1985.
- B. BRESLER. “Design criteria for reinforced concrete columns under axial load and biaxial bending”, Journal ACI, Vol. 57, nov.1960, 481-490.
- R. D. COOK. “Concepts and applications of finite element analysis”. JOHN WILEY & SONS. 1981.
- M.D. DAVISTER, “Analysis of reinforced concrete columns of arbitrary geometry subjected to axial load and biaxial bending” Concrete International. Julio 1986.
- GOUWENS. “Biaxial bending simplified”. ACI Publicación especial SP50. 1975.
- IBRAHIMBEGOVIC, R.L. TAYLOR y E.L. WILSON. “A robust quadrilateral membrane finite element with drilling degrees of freedom”. International Journal for numerical Methods in Engineering, Vol. 30, 445-457, 1990.
- H. NAEIM. “The seismic design handbook”. VAN NOSTRAND REINHOLD. 1989.
- E. L. WILSON, “Tree dimensional static and dynamic analysis of structures”, Computers and Structures, Inc. Julio 1998.
- O. C. ZIENKIEWICZ. “The finite element method in engineering science”. McGraw-HIL, 1971.

