

Al juzgar los distintos procedimientos de refuerzo hay que considerar la eficiencia en aumentar la seguridad contra sismo, la facilidad de ejecución en una vivienda ya terminada y el costo en cuanto a materiales de construcción. Es evidente que las distintas alternativas propuestas difieren mucho en cuanto a los aspectos mencionados. Una evaluación preliminar de ellas se intentará al final del trabajo, tomando en cuenta los resultados experimentales.

En lo que respecta a las construcciones de bajareque, las recomendaciones para incrementar la seguridad se dirigen esencialmente a evitar el deterioro de los materiales, ya que, como se dijo, el comportamiento sísmico de estas construcciones es excelente cuando los materiales no están intemperizados. La ref 2 recomienda impermeabilizar los morillos con asfalto e hincarlos en una base de concreto o mampostería, sustituir la liga de los elementos mediante un simple amarre con cordeles, por una unión rígida clavada, tratar el techo de palapa para hacerlo más durable o sustituirlo por teja, y resanar periódicamente el aplanado de lodo.

3. PRUEBAS DINAMICAS EN MESA VIBRATORIA

3.1 Planteamiento

Las características peculiares de las construcciones de adobe dificultan el estudio del comportamiento ante cargas laterales mediante ensayos sencillos, principalmente por la dificultad de aplicar cargas a los especímenes sin que se produzcan fallas locales en los puntos en que se concentran las cargas. Un ensayo sencillo y representativo consiste en colocar el modelo en una plataforma cuya inclinación puede variarse gradualmente (ref 10). Una manera más elaborada es por ensayos en mesa vibratoria.

El Instituto de Ingeniería cuenta con una mesa vibratoria de 2.4 x 4.5 m con capacidad para modelos hasta de 15 ton y aplicar movimientos en la dirección longitudinal de la mesa que reproduzcan con fidelidad acelerogramas medidos o simulados. El desplazamiento máximo de la mesa es de ± 2.54 cm.

Se estudió, mediante ensayos, el comportamiento dinámico de la vivienda

de la fig 8, la cual, es típica del medio rural. El tamaño de la mesa vibratoria obliga a reproducir una porción de la vivienda o a ensayar un modelo a escala reducida. Se eligió la segunda opción y se construyó un modelo con una escala geométrica 1:2.5. Para reproducir el comportamiento dinámico del prototipo se requiere respetar en el modelo una serie de condiciones impuestas por el análisis dimensional (fig 9). Existen dos formas de cumplir dichas condiciones: la primera (alternativa 1, fig 9) requiere que los pesos volumétricos de los materiales que forman el modelo sean superiores a los del prototipo en una vez la escala de dimensiones; la otra (alternativa 2) requiere que la resistencia ante todos los posibles modos de falla sea inferior en el modelo en una vez el factor de escala. Con ambas condiciones, y alterando adecuadamente la escala de tiempos y aceleraciones del movimiento sísmico, se puede relacionar directamente la respuesta dinámica del modelo y del prototipo, y reproducir los modos de falla.

Cumplir con cualquiera de las dos condiciones es, sin embargo, problemático: para la alternativa 1 sería difícil y costoso fabricar un material que tuviera 2.5 veces el peso volumétrico del adobe y conservara la misma resistencia y módulo de elasticidad. Una forma aproximada para cumplir con esta condición es colocar masas distribuidas de manera uniforme en el modelo, de manera que la masa total se incremente en la relación deseada, y los esfuerzos no se vean afectados localmente. En estructuras en las que las masas están concentradas en los pisos y techos, es fácil cumplir la condición con sobrecargas colocadas en los distintos niveles. En el modelo que se quiere estudiar, la masa principal es la de los muros y deberían colocarse pesos a distintas alturas del muro. La magnitud de las cargas necesarias es tan alta que se consideró difícil hacerlo sin afectar los muros. En la alternativa 2, aunque es factible obtener un material con una resistencia en tensión 2.5 veces menor que la del adobe, es poco probable que se pueda disminuir en la misma proporción la resistencia en compresión, adherencia en las juntas, fricción y módulo de elasticidad.

Si no se modifican ni la densidad del material ni las resistencias se puede, aun así, reproducir exactamente el comportamiento y esfuerzos dinámicos en el modelo si se siguen las relaciones establecidas en la alternativa

3 (fig 9); sin embargo, los esfuerzos estáticos, debidos al peso propio del modelo, resultan menores que los requeridos, lo que no importaría si tales esfuerzos fueran despreciables. En el modelo en cuestión, el efecto del peso propio no es del todo despreciable, ya que incrementa la resistencia en cortante y en tensión por flexión, de manera que al reproducir una fracción de los esfuerzos verticales, el modelo se ve sometido a una condición más desfavorable que la deseada.

En vista de la imposibilidad práctica de circunscribirse estrictamente a los requisitos que resultan del análisis dimensional, el ensayes de los modelos se realizó para las condiciones de la alternativa 3, en la que no se reproducen exactamente los efectos del peso propio. Para algunos ensayes se siguió una solución intermedia entre las alternativas 1 y 3: se colocaron masas adicionales que equivalían a incrementar la densidad del material en $\sqrt{2.5}$, con lo cual los esfuerzos por cargas verticales resultan en el modelo 63 por ciento de los requeridos por el análisis dimensional, contra 40 por ciento que se tendría con la alternativa 3. Simultáneamente se deben modificar las otras dimensiones con los factores de escala que se deducen en la fig 9 para la alternativa 4. Se consideró que esta diferencia en los esfuerzos verticales por peso propio no debía afectar el modo de falla por flexión horizontal que rige el comportamiento.

3.2 Movimientos sísmicos aplicables en las pruebas

Los ensayes consistieron en sujetar la base de los modelos a la mesa vibratoria y someter esta a movimientos similares a los ocurridos durante temblores representativos.

El equipo de control de la mesa permite múltiples opciones para generar el movimiento; en el caso particular de simulación de un temblor, la información requerida se puede proporcionar con datos de aceleraciones, velocidades o desplazamientos. Es posible además escalar las amplitudes con factores prefabricados para simular diferentes intensidades.

Cualquiera que sea el tipo de excitación seleccionado, electrónicamente se transforma en una serie de señales que impone a la mesa sendos

desplazamientos; por tal motivo se decidió realizar los ensayes alimentando la consola de operación con las historias de desplazamientos correspondientes a los acelerogramas registrados durante tres temblores importantes.

Los acelerogramas seleccionados tienen la característica común de presentar ordenadas espectrales altas para periodos pequeños, o sea los tipos de movimientos que causan efectos más graves en las estructuras en estudio. Se eligió la componente N-S del temblor de El Centro por ser el más empleado en estudios de este tipo y permitir comparaciones con los de ensayes de otras estructuras; se utilizó un acelerograma del sismo de Managua por ser un movimiento que provocó muchos daños en construcciones similares a las aquí estudiadas; finalmente se escogió un registro obtenido en Oaxaca del sismo de Puebla y Orizaba por dar lugar a aceleraciones muy altas con pequeños desplazamientos del terreno.

Dichos acelerogramas (fig 10) se integraron para obtener las historias de desplazamientos correspondientes. El desplazamiento máximo (dividido entre el factor de escala), salvo en el caso del temblor registrado en Oaxaca, resultó mayor que el que aceptaba la mesa vibratoria; se cree que, al menos en parte, los desplazamientos que resultan de los acelerogramas empleados están exagerados por una corrección inadecuada de la línea base. Buscando obtener una historia de desplazamientos compatibles con la que admite la mesa, se hizo una corrección de la línea base de la gráfica de desplazamientos original, ajustándole tramos de senoides de periodo grande (5 s o más). La fig 11 muestra un ejemplo de corrección de este tipo. La corrección se realizaba por tanteos hasta lograr que el desplazamiento máximo del movimiento original se redujera lo más posible sin que se afectara el espectro en forma importante. Se imponía además la restricción que las velocidades inicial y final del movimiento resultaran casi nulas.

Esta forma de corrección elimina errores en la línea base original, pero también movimientos reales de terreno con periodos largos. Se consideró que por ser estos periodos varias veces superiores al natural de la construcción, la eliminación de esos movimientos no debía afectar la respuesta.

Los requisitos del análisis dimensional se satisfacen si en la

alternativa 3 los desplazamientos y los tiempos en el modelo se dividen entre la escala geométrica, con lo cual las aceleraciones se multiplican simultáneamente por el mismo factor (2.5); en la alternativa 4, los tiempos se deben reducir a la mitad, y al disminuir los desplazamientos a 40 por ciento las aceleraciones se incrementan en 60 por ciento.

La tabla 1 presentan los valores máximos de aceleraciones y desplazamientos correspondientes a los registros originales, los obtenidos con la corrección de línea base descrita y los escalados para el modelo según el análisis dimensional (alternativa 3). Si se toma en cuenta que el desplazamiento máximo posible en la mesa es 2.54 cm, es fácil aceptar que en los casos de El Centro y Managua únicamente fue posible aplicar una intensidad del orden de 90 por ciento de la del sismo real; en cambio, con el temblor registrado en Oaxaca, la intensidad correspondiente al máximo desplazamiento posible en la mesa vibratoria sería equivalente a un sismo nueve veces más severo que el real.

La fig 12 muestra para cada uno de los sismos el espectro calculado para el acelerograma original y el que se obtuvo a partir del movimiento registrado en la mesa, afectado por las constantes impuestas por el análisis dimensional para hacerlo equivalente al prototipo. La comparación entre ambos espectros es muy aceptable, mostrando un funcionamiento satisfactorio del sistema de excitación y de la mesa misma. De la observación de los espectros mencionados se desprende que la reproducción fiel de los efectos del movimiento inducido, solo se consigue para periodos mayores de 0.25 s (0.1 en los modelos), pues para menores (en los tres casos), las ordenadas espectrales correspondientes al registro de aceleraciones durante la prueba superan a las del espectro original. Esta amplificación afectó los ensayos puesto que todos los modelos, aun los desprovistos de refuerzo, tenían periodos menores de 0.1 s, por lo cual la excitación a que se sometieron fue en realidad mayor que la pretendida. La diferencia entre el espectro original y el que resultó de las mediciones en la mesa aumentaba con la intensidad del movimiento aplicado. Se deduce que la vibración de la mesa misma inducía movimientos espurios con periodos dominantes dentro del intervalo mencionado. No haber reproducido fielmente un acelerograma prefijado no

tiene gran repercusión en cuanto a la interpretación de los resultados, lo importante es que los acelerogramas medidos se mantuvieron muy similares en los ensayos de los diferentes modelos para una misma intensidad y que los resultados pueden interpretarse cuantitativamente a partir de las ordenadas espectrales de los acelerogramas medidos.

3.3 Descripción de los ensayos

Los modelos se fabricaron con materiales similares a los empleados para la determinación de las propiedades mecánicas de las mamposterías; para los adobes, estos tenían una resistencia promedio de 15 kg/cm² en compresión, 3 kg/cm² en tensión por flexión y 1.4 kg/cm² en cortante, y dimensiones de 4 x 16 x 24 cm, o sea, las de un adobe típico reducido 2.5 veces. La mampostería de tabiques de cemento-arena eran de dimensiones 4 x 6 x 10 cm, resistencia a compresión de 25 kg/cm² y de 1.4 kg/cm² en cortante.

Todos los modelos reproducían un mismo tipo de vivienda con la geometría mostrada en la fig 8 variando el tipo de techo y el refuerzo. Se representaron huecos para puertas y ventanas con dinteles de madera reproducidos a escala. Solo en los primeros ensayos se colocó un techo propiamente dicho a base de elementos de madera y tejas. El modelo completo se muestra en la fig 13. En las pruebas siguientes sólo se colocaron las masas correspondientes al techo colocadas sobre canales de acero apoyadas libremente sobre los muros largos dando lugar a una situación algo más desfavorable que la real, ya que no se proporcionaba prácticamente restricción a los movimientos de los muros normalmente a su plano. Los pesos colocados representaban en un caso un techo ligero, de 50 kg/m², teja sobre madera, y en otro un techo pesado de terrado sobre vigas con 300 kg/m².

Las pruebas se realizaron colocando los modelos sobre la mesa de manera que el movimiento de esta fuera perpendicular a los muros largos, produciendo la condición más desfavorable para la falla por flexión de los muros. Solamente el modelo 5 y el 9 se ensayaron también en dirección transversal a la descrita.

La tabla 2 resume las características principales de los ensayos. Se