ID: XXXVIIIJSIE-07-001

SEGURIDAD INTERIOR DE UN EDIFICIO DE BASE AISLADA BAJO ACCIÓN SÍSMICA BIDIRECCIONAL Y COLISIÓN CON EL MURO PERIMÉTRICO

INTERIOR SAFETY OF A BASE ISOLATED BUILDING UNDER BIDIRECTIONAL SEISMIC ACTION AND COLLISION WITH THE PERIMETER WALL

Carlos H. Cuadra

Dr., Ass. Prof., Akita Prefectural University, Faculty of System Science and Technology, Yurihonjo, Japan.
Dirección para correspondencia: carlos@akita-pu.ac.jp

Area Temática: Daño estructural. Efectos de terremotos, impactos, incendios y otros accidentes.

Resumen
En el caso de sismos fuerte se observan grandes respuestas dinámicas de edificios de período, especialmente cuando estos movimientos son de gran amplitud, larga duración y con contenidos de baja frecuencia. Un edificio aislado de base es básicamente una estructura de período largo y, por lo tanto, se puede observar una gran respuesta de desplazamiento durante los sismos mencionados. Este gran desplazamiento de la capa de aislamiento podría provocar la colisión de la estructura aislada contra los muros de contención circundantes. En esta investigación se utiliza un modelo de edificio tridimensional de 7 pisos para investigar la seguridad de estructuras aisladas en el caso de impacto contra los muros de perimetrales. El modelo analítico considera elementos gap link para estudiar la colisión contra el muro de contención. Como aceleración de entrada, se usó un registro del terremoto de Kobe, escalando este registro por 2 y se usaron movimientos de entrada en una dirección y en dos direcciones. La aceleración máxima en la estructura superior aumenta en caso de colisión. Dado que esta aceleración podría causar que los muebles se vuelquen, se realiza un análisis de seguridad basado en la frecuencia de vibración predominante y la aceleración máxima observada en cada piso. En caso de que no haya colisiones, hay menos del 30% de probabilidad de que los muebles se vuelquen y cuando ocurre una colisión, la aceleración en cada piso aumenta significativamente y supera el 50% de probabilidad de que los muebles se vuelquen.
Palabras-clave: aislador sísmico, colisión, análisis de la respuesta sísmica, método de elementos finitos.

Abstract
Large dynamic responses of long-period buildings were observed during strong earthquakes, especially when these input motions are of large amplitude or long duration and low frequency content. A base isolated building is basically a structure of long period and therefore large displacement response could be observed during mentioned earthquakes. This large displacement of the isolation layer could cause the collision of the isolated structure against the surrounding retaining walls. In this research a 7-story three-dimensional building model is used to investigate the safety of base isolated structures in the event of impact against retaining walls. The analytical model considers gap link elements to study the collision against the retaining wall. As input acceleration, a record of the Kobe earthquake was used, scaling this record by 2 and input motions in one direction and two directions were used. Maximum acceleration in upper structure increases in case of collision. Since this acceleration could cause furniture to tip over, a safety analysis is performed based on predominant frequency of vibration and maximum acceleration observed on each floor. In case of no collisions, there is less than a 30% probability that the furniture will tip over and when a collision occurs, the acceleration at each floor increases significantly and exceeds the 50% probability that the furniture will tip over.
Keywords: rubber isolator, collision, seismic response analysis, finite element method.

1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones con aislamiento sísmico en Japón, que se vienen usando en la práctica desde la década de 1980, se ha desarrollado de manera constante y actualmente se utiliza tanto en casas unifamiliares como en rascacielos. Para fines del año 2020, se habían construido alrededor de 9850 edificios con sistemas de aislamiento sísmico (Japan Society of Seismic Isolation, 2021). Las estructuras con aislamiento sísmico han demostrando plenamente su rendimiento incluso en el terremoto de Hyogo-ken Nanbu de 1995 (Kobe), el gran terremoto de Tohoku de 2011 (Cuadra & Meguro, 2012) y el terremoto de Kumamoto de 2016. Sin embargo, recientemente, existe la preocupación de que puedan ocurrir movimientos sísmicos como el terremoto de Nankai Trough que excedan el nivel esperado de diseño, y lidiar con tales movimientos sísmicos también es un problema.

Aún cuando aislamiento sísmico se puso en práctica en la década de 1980, el concepto de estructura con aislamiento sísmico en sí comenzó a proponerse a finales de 1800. Hay registros de un método para construir un edificio apilando troncos vertical y horizontalmente en varias etapas como "una estructura que recibe un gran aislamiento sísmico". Aunque no se ha confirmado el efecto de aislamiento sísmico, se describió la idea de una estructura de aislamiento sísmico que proporciona una capa aislante entre el suelo y el edificio. De hecho, toda la estatua de Buda se deslizó durante el terremoto de Kanto de 1923, por lo que no sufrió daños, y también hay un caso del Gran Buda en Kamakura, donde se colocó una placa de acero inoxidable entre el pedestal y la estatua de Buda para evitar daños. Estos metodos se apoyaron en ideas muy naturales como el aislamiento basado en el principio de deslizamiento y rodadura. Aunque la experiencia y las expectativas en cuanto a la idea y efecto del aislamiento sísmico eran latentes, no se contaba con equipos y materiales apropiados para su desarrollo y tampoco se contaba con tecnologia para el análisis del comportamiento de las edificaciones durante un sismo. Por lo tanto su desarrollo y aplicación práctica tuvo que esperar un tiempo.

Después de eso, la estructura de aislamiento sísmico se convirtió en una realidad en Japón solo en la década de 1980, cuando se introdujo y desarrolló la idea del caucho laminado. Después de la construcción del Yachiyodai Housing, el primer edificio aislado sísmicamente de Japón con soporte de caucho laminado en 1982, la comercialización de materiales de aislamiento sísmico y el establecimiento de métodos de prueba de rendimiento, el aumento de los fabricantes de materiales de aislamiento sísmico y el uso de computadoras; los edificios aislados aumentaron gradualmente. Esto ocurrió también en el contexto del desarrollo de la tecnología de análisis de la respuesta, la promoción de la investigación y el desarrollo técnico por parte de las empresas constructoras y el desarrollo de estándares de diseño como las "Pautas de diseño de estructuras de aislamiento sísmico" de la Japan Society of Seismic Isolation (2020).

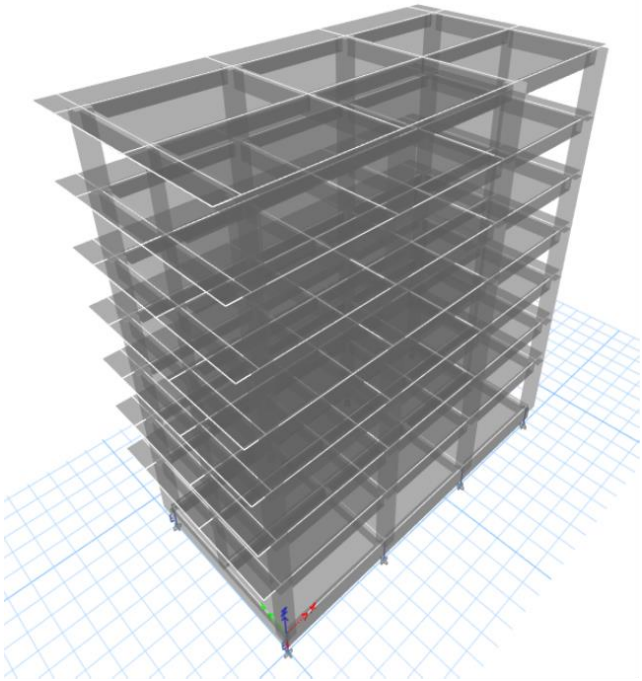
Aún cuando los edificios con aislamiento sísmico representan una alternativa para garantizar la seguridad de una edificación a veces los terremotos superan el nivel de las suposiciones de diseño, como el Gran Terremoto del Este de Japón que produjo eventos de gran duración y de periodos largos (Hatada y Cuadra, 2014). En otros casos, como el terremoto de Kumamoto de 2016, se observaron aceleraciones de gran amplitud. Estos eventos severos pueden provocar daños incluso en los edificios con aislamiento sísmico. Como posibles daños se pueden mencionar los siguientes: daños en la junta de expansion, daños en tuberias e instalaciones en la capa de aislamiento sísmico, límite de deformación de componentes de aislamiento sísmico (amortiguador) y pérdida de capacidad de absorción de energía, límite de deformación del aislador sísmico, límite del espacio libre (colisión con la estructura circundante), plastificación de la

superestructura, pérdida de la capacidad de soporte vertical del aislador, plastificación de subestructura, pérdida de capacidad de soporte vertical. En la actualidad se ha señalado que la superestructura de un edificio puede resultar dañada por estos eventos extremos, siendo necesario estudiar el comportamiento y daño del edificio en ese momento (Cuadra & Hasegawa, 2019).

En esta investigación, se analiza el caso de un edificio de base aislada cuando durante un evento sísmico ocurre una colisión contra muro de contención perimetral. Se examina su comportamiento y el efecto en el interior del edificio desde el punto de vista de la seguridad interior (seguridad del contenido). Además del análisis de sísmo en una dirección, también se analiza y compara las diferencias en los efectos sobre el edificio cuando se consideran sísmo en dos direcciones.

2. ESTRUCTURA OBJETIVO Y MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El edificio seleccionado para el análisis se muestra en la Figura 1. Es una estructura de concreto reforzado de 7 pisos. Las principales características de los elementos estructurales se indican también en la Figura 1. En esta figura se muestra además las propiedades de los aisladores que se usan en la base. Estos aisladores son elastoméricos con núcleo de plomo y de gran amortiguamiento. El modelo de análisis ha sido elaborado con el software ETABS (Computers and Structures, Inc.). Los aisladores han sido escogidos de tal manera que el periodo de vibración de la estructura sea del orden de los 5 s. Con los aisladores seleccionados se ha obtenido un periodo de vibración de 4.76 s. Para tomar en cuenta la colisión contra los muros perimetrales se ha utlizado un elemento de conección tipo Gap con claro de luz de 40 cm y un resorte lineal con una rigidez de 1000 kN/cm.



<u>Edificio de Concreto Reforzado</u>
Número de pisos : 7
Altura: 22 m.
Altura de entrepisos: 3.8 m, 3.2 m, 3 m
Dimensiones: 10 m x 21 m
Total area techada: 1470 m^2
Columnas: 70 cm x 70 cm, 40 cm x 40 cm
Vigas: 40 cm x 80 cm, 30 cm x 60 cm
Losas de concreto: 35 cm, 40 cm
Masa total: 2503 t

<u>Aislador LH080G4</u>
Diámetro exterior: 800 mm
Peso del aislador: 12.5 kN
Rigidez inicial: 12900 kN/m
Rigidez secundaria: 989 kN/m
Carga de fluencia: 160 kN
Rigidez equivalente: 1790 kN/m
Amortiguamiento equivalente: 0.266

Figura 1. Modelo FEM y propiedades de la edificación y aisladores.

3. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA

Para el análisis tiempo-historia se ha utilizado el registro del terremoto de Kobe de 1995, el cual tiene una aceleración máxima de 817.8 cm/s^2 en la dirección norte-sur (X) y 617.1 cm/s^2 en la dirección este-oeste (Y). Siendo el claro de luz, entre el edificio y los muros de contención, de 40 cm se ha estimado que es necesario duplicar la aceleración de entrada para que se produzca la colisión.

Del análisis tiempo historia se pueden obtener resultados que permiten comparar las respuestas en caso de colisión y no colisión. La Figura 2 muestra las respuestas de aceleración del último piso o piso 7 de edificio en studio. En caso de no colisión la aceleración máxima es del orden de los 250 cm/s^2 (2500 mm/s^2) mientras que para el caso de colisión la máxima respuesta de aceleración es del orden de los 2400 cm/s^2 (24000 mm/s^2).

La diferencia entre las respuestas para sismo en dos direcciones y en una sola dirección se puede observar en la Figura 3. Las respuestas de aceleración corresponden al piso 7 y en la dirección Y. En el caso del análisis en una sola dirección (Y(1D)) la estructura no llega a colisionar con los muros perimetrales y la maxima aceleración no llega a los 200 cm/s^2 (2000 mm/s^2). Cuando se considera sismo en dos direcciones se produce el impacto de la estructura contra los muros de contención y en este caso la máxima respuesta de aceleración sobrepasa los 800 cm/s^2 (8000 mm/s^2).

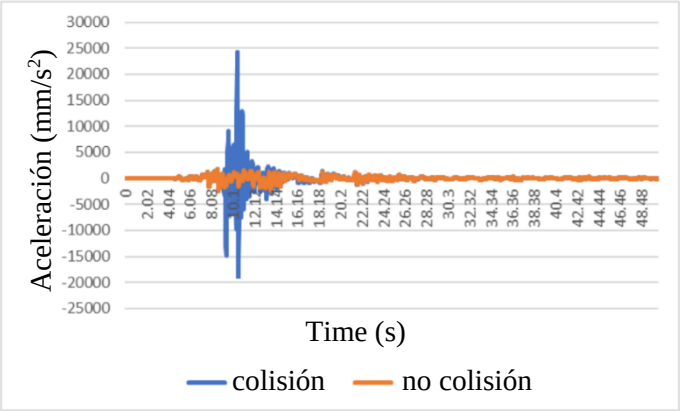


Figura 2. Respuesta de aceleración del piso 7 en caso de colisión y no colisión

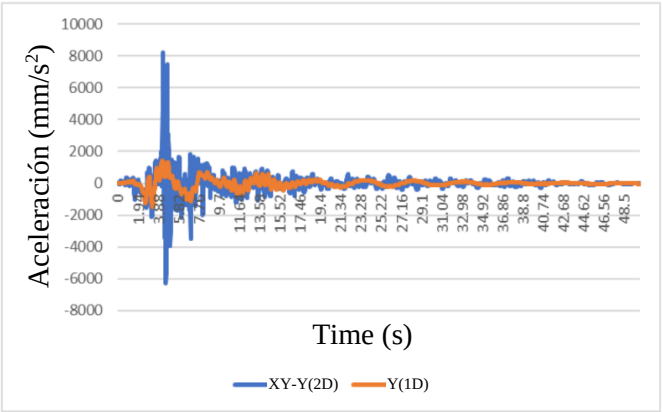


Figura 3. Respuesta de aceleración para sismo en dos direcciones y en una dirección

4. ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD INTERIOR

La seguridad del interior del edificio o su contenido se evalúa en función del flujo de falla y deslizamiento de los muebles propuesto por Kaneko et al (2008). Una aceleración límite de vuelco y una aceleración de inicio del deslizamiento se definen considerando la frecuencia predominante de vibración de cada piso. La frecuencia predominante de cada piso se calcula del espectro de Fourier de la señal de respuesta de cada piso la cual ha sido obtenida del análisis tiempo-historia. Los parámetros de aceleración dependen también del tipo de mueble, las dimensiones y el coeficiente de fricción entre el mueble y la losa del piso. En este análisis se selecciona como mueble representativo una estantería. Las dimensiones de este mueble se consideran como 200 cm de altura, 40 cm de ancho y se asume 0.3 como coeficiente de fricción. Con estos parámetros se definen dos curvas que expresan la probabilidad de vuelco, una curva de 30% de probabilidad y otra de 50% de probabilidad las cuales se expresan en función de la aceleración máxima y la frecuencia predominante del piso en análisis.

En la Figura 4 se muestran algunos resultados del análisis de la seguridad del interior del edificio correspondientes al piso 7. Se comparan los resultados en la dirección Y en caso de sismo en dos direcciones (XY-Y) y en una dirección (Y). Se puede observar que para el caso de sismo en dos direcciones la aceleración excede la curva de 50% de probabilidad de vuelco mientras que para el sismo en una sola dirección la aceleración cae por debajo de la curva de 30% de probabilidad de volteo.

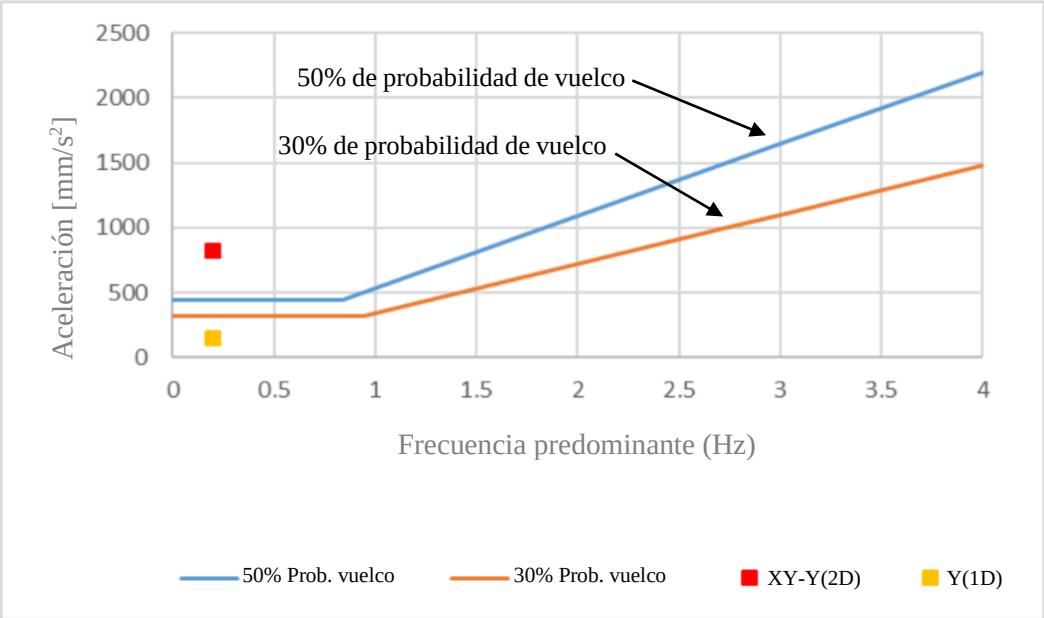


Figura 4. Probabilidad de vuelco de muebles en el piso 7

En la Figura 5 se muestran los resultados de la evaluación de la seguridad del contenido de la edificación en la dirección X. En este caso se presentan los resultados para el piso 7 y piso 6. Se debe indicar que en la dirección X se produce la colisión de la edificación tanto en el caso del sismo en dos direcciones (XY-X (2D)) como el sismo en una sola dirección (X (1D)). Para el piso 7, en ambos casos las aceleraciones exceden la aceleración correspondiente al 50% de probabilidad

de vuelco sin embargo, en el caso de sismo en dos direcciones la aceleración es mayor que para el caso del sismo en una sola de dirección. En el caso del piso 6 las aceleraciones son prácticamente iguales y ambas caen por debajo de la curva de 50% de probabilidad de vuelco pero por arriba de la curva de 30% de probabilidad de vuelco.

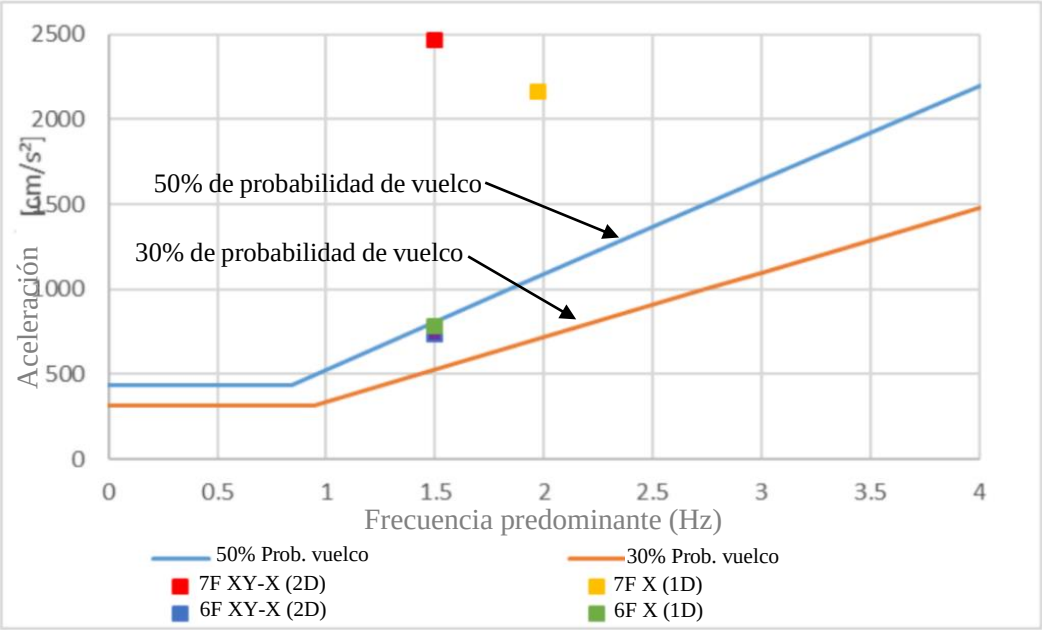


Figura 5. Probabilidad de vuelco de muebles en los piso 7 y 6

5. CONCLUSIONES

Basados en el análisis tiempo-historia de la respuesta de un edificio de base aislada, se ha evaluado la seguridad del contenido del mismo. Se han analizado los casos en que el edificio impacta contra los muros de contención perimetrales, considerándose también los casos de sismo de entrada en una sola dirección y en dos direcciones.

En el caso de colisión se produce una aceleración grande en los pisos superiores. Cuando no hay impacto se puede comprobar que la máxima aceleración de entrada no se amplifica y por lo tanto se verifica el efecto del aislamiento sísmico. La amplificación de la aceleración en caso de colisión podria originar el volteo o vuelco de los muebles que contiene la edificación.

La seguridad del contenido de la edificación en estudio se ha evaluado en base a la aceleración y la frecuencia predominante del piso analizado. Se verifica que en caso de colisión la probabilidad de vuelco de muebles excede el 50%. Y cuando no hay colisión la aceleración esta por debajo del 30% de probailidad de vuelco, verificandose por lo tanto la seguridad del contenido del edificio.

Se ha comprobado que con el análisis con sismo en dos direcciones se obtienen mayores aceleraciones en caso de impacto y por lo tanto la probabilidad de vuelco de muebles aumenta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cuadra, C. & Meguro, J. (2012). Evaluation of the dynamic characteristics of a base-isolated low-rise RC building after the Great East Japan Earthquake. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 24-28, 2012, Lisbon, Portugal, Paper No. 1284.

Cuadra, C. & Hasegawa, J. (2019). Safety of base-isolated building in case of impact against retaining wall. International Journal of Safety and Security Engineering, Vol. 9, No. 3 (WIT Press 2019) 269-279.

Hatada, K. & Cuadra, C. (2014). Dynamic response of low-rise building with different base isolation devices. Proceedings of the 15th European Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 2014, Paper No.397.

Kaneko, M., Nakamura, Y., Kambara, H. & Tamura, K. (2008). Seismic safety evaluation method for building contents. Proceedings of the 14thWorld Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China, Paper No. 14_S20-002.

The Japan Society of Seismic Isolation. (2021). Data on the number of seismic isolated buildings and vibration controlled buildings. https://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms_ss_data.pdf (in Japanese).

The Japan Society of Seismic Isolation. (2020). Pautas de diseño de estructuras de aislamiento sísmico. JSSI, Tokyo, Japan (in Japanese).