

## **VULNERABILIDAD SISMICA EN EDIFICIOS DE CONCRETO ARMADO**

**Shunsuke OTANI<sup>1)</sup>**

### **RESUMEN**

La ingeniería del terremoto no es ciencia pura, sino ha sido desarrollada con la observación de los daños en las construcciones debido a los terremotos. La objetivo de la ingeniería sísmica ha sido “no repetir los mismos errores en eventos futuros.” Las causas comunes de los daños producidos por los últimos terremotos son revisados. La estadística de edificios dañados indica que el porcentaje de edificios seriamente dañados es relativamente pequeño, solamente el porcentaje creciente con el número de niveles. Los edificios existentes, diseñados y construidos usando pasadas tecnologías, son más susceptibles a los ataques de los terremotos.

### **INTRODUCCIÓN**

La superficie de la tierra consiste en una pequeña cantidad de placas rígidas que se muevan relativamente a uno a otro. Un terremoto es causado por una ruptura repentina de las zonas de contacto entre placas a lo largo de una falla cerca de la superficie de la tierra. Sigue habiendo la falla como un punto débil después de un terremoto, y los terremotos se repiten en la misma localización si la tensión es acumula a un nivel de la falla.

Los terremotos importantes ocurren a lo largo del borde de las placas tectónicas, cuando la energía de tensión acumulada por la resistencia contra el movimiento entre placas tectónicas es repentinamente liberada. Este tipo de terremotos ocurre en varias ocasiones en un intervalo relativamente corto: entre 50 a 200 años. Las zonas sin presencia de terremotos (no activas) se pueden identificar como la localización posible de un futuro evento sísmico. Sin embargo, no es posible por ahora predecir exactamente el momento, la localización y la magnitud de un terremoto.

Otro tipo de terremotos ocurre dentro de una placa tectónica cuando la tensión, acumulada dentro de una placa debido a la presión del movimiento periférico de la placa, excede la capacidad que resiste de la contacto entre placas a lo largo de una falla. La localización de muchas fallas activas ha sido identificada por los geólogos con la medida de ondas acústicas reflejadas y refractadas en la tierra debido a una explosión artificial, y se toma en la consideración en desarrollar un mapa de la sismicidad para el diseño estructural. Este tipo de terremotos de la intra-placa ocurre en un intervalo largo de 1.000 a 10.000 años. La región epicéntrica es relativamente baja a 30 kilómetros de la superficie de la tierra. Si un terremoto de la intra-placa ocurre cerca de una ciudad, el desastre en un área denso poblada puede ser significativo por ejemplo el terremoto en Northridge 1994, California, y el terremoto de 1995 en Kobe.

---

<sup>1)</sup> Professor, Chiba University, Japan, Email: shunsuke.otani@faculty.chiba-u.jp

La onda de cuerpo elástica impartida desde la región de la falla de un terremoto propaga a través de duras capas de roca. La intensidad del movimiento de tierra es afectada por la magnitud de un terremoto, el mecanismo de la fuente del terremoto, y la distancia y la trayectoria de la región del epicentro al sitio de la observación. Un terremoto grande puede causar un movimiento largo de la duración que tiene un rango ancho de periodo, pero la amplitud, especialmente de periodos cortos, se decae con la distancia.

En un sitio de la observación, la parte importante de movimiento del terremoto se propaga a la superficie en dirección casi vertical como onda de corte. Las características del movimiento de tierra son influenciadas más a fondo por la geología de la superficie desde 50m a pocos cientos de metros de profundidad. Aunque la señal de la aceleración del terremoto aparece aleatoria, los periodos dominantes de la capa superficial del suelo se pueden observar en un registro acelerográfico. El movimiento telúrico se amplifica en una zona de suelo flexible, así como antiguos cauces de río o tierra reclamada, y daños constructivos pronunciados fueron reportados en estos suelos flexibles. Por ejemplo, el desastre 1985 del terremoto de México fue causado por el movimiento de tierra de la largo-duración de la grande-amplitud en la zona de lecho de un antiguo lago.

La respuesta sísmica de un edificio es influenciada por (a) características del movimiento del terremoto (contenido de la frecuencia y distribución de amplitudes grandes con tiempo, intensidad), (b) la configuración estructural (la excentricidad entre el centro de falla frágil y la masa, la distribución de la falla frágil a lo largo de la altura), (c) las características dinámicas (período fundamental y el amortiguamiento), (d) fuerza lateral, (e) capacidad a la deformación de elementos estructurales, (f) cimentación, condiciones del suelo del (G), (h) calidad de la ejecución, (i) edad y mantenimiento estructurales, y (j) daños estructurales en eventos pasados.

Aunque la señal de la aceleración de un movimiento del suelo por el terremoto aparece ser aleatorio, la señal contiene periodos de vibración dominantes especiales, representando las condiciones del suelo en el lugar de la estructura. La respuesta del movimiento del terreno en amplitud de la aceleración es generalmente largo en un rango de periodo menor que 0.5 seg aproximadamente, y se decae con la longitud del periodo. Por lo tanto, la respuesta de la aceleración, correspondiendo a las fuerza de inercia, es generalmente grande para las estructuras de corto período natural.

Las fuerzas de inercia en direcciones horizontales y verticales se desarrollan con la vibración de una estructura. Las fuerzas de inercia verticales son desarrolladas por la vibración vertical de una estructura causada por el movimiento de tierra vertical y también por la vibración de las losas del piso. La parte dominante de daño estructural es causada por las fuerzas horizontales de inercia asociadas a la vibración lateral. La amplitud de las fuerzas de inercia es proporcional a la masa que vibra de una estructura y la aceleración de respuesta. Las estructuras pesadas, tales como casas de adobe y construcción concreto reforzado, absorben fuerzas de inercia más grandes durante un terremoto. Una mínima resistencia debe ser proveída para resistir fuerzas horizontales y verticales de inercia.

Para una duración dada de un movimiento telúrico, la estructura de corto período natural es sujeta a más ciclos de la oscilación; es decir, la estructura de corto período natural aparece ser más susceptible al daño. Sin embargo, el peso de dichas estructuras; típicamente edificio de baja altura, es ligera y como una ligera puede ser fácilmente proveída con fuerza lateral grandes para resistir fuerzas de inercia sísmicas inducidas. Por otra parte, el período fundamental de un edificio de techo alto es largo y la amplitud de la aceleración de la respuesta de un sistema del largo-período es relativamente pequeña. Sin embargo, la gran cantidad de peso de un edificio alto atrae fuerzas laterales significativas durante un terremoto y es posible que aparezcan más daños.

La tarea más importante de la ingeniería sísmica es reducir las muertes en los terremotos. La ingeniería sísmica, sin embargo, no es ciencia pura, sino ha sido desarrollada con la observación de los tipos de fallas en las construcciones debido a los terremotos. . La objetivo de la ingeniería sísmica

ha sido “no repetir los mismos errores en eventos futuros.” El conocimiento logrado se refleja en las pautas de los códigos y guías de diseño estructural.

La tecnología moderna en ingeniería sísmica fue desarrollada para reducir perceptiblemente el daño estructural. La lenta implementación de la tecnología de diseño sísmico a la práctica no redujo los desastres tanto como deseamos. La protección de las vidas de la gente contra esos construcción existente que fueron construidos usando vieja tecnología es la tarea urgente en la ingeniería del terremoto. La concentración de la población a las ciudades grandes ha agrandado las posibilidades de un desastre sísmico.

La atención reciente de la ingeniería sísmica no se limita a la protección de vidas humanas contra desastres producidos por los terremotos, sino se amplía a la mitigación sintética del desastre. Más preocupación se expresa a la vida social de los que sufrieron lesión, la pérdida de familia, y la pérdida de casas. En el área de la ingeniería estructural, los nuevos objetivos se enfatizan para controlar la pérdida de propiedades y para mantener la función de las instalaciones importantes en los edificios.

## DAÑOS ESTRUCTURAL ASOCIADO CON LAS FALLAS DEL SISTEMA

Los patrones similares de la falla de edificios se han observado en varias ocasiones en la investigación de daños de últimos terremotos. Los requisitos del diseño se han mejorado con el desarrollo de la nueva tecnología y del conocimiento para la protección de nuevas construcciones. Sin embargo, la más antigua construcción, diseñada y construida usando tecnología antigua, es susceptible a los mismos patrones sísmicos de daños observados de futuros sismos.

### Capacidad de la fuerza y de la deformación

Una estructura no falla siempre inmediatamente cuando la acción alcanza la fuerza (capacidad que resiste del máximo) de una estructura (Fig 1). Una estructura colapsa cuando la capacidad de la deformación se alcanza en miembros que llevan de la carga vertical, tales como columnas y muros. Una gran capacidad de deformación después de alcanzar la fuerza, conocida comúnmente como ductilidad, se puede obtener en miembros estructurales para poder retrasar el colapso incluso después que se desarrollen daños estructural significativos. La localización de la formación de la posible rótula plástica es normalmente en los extremos de las vigas (concepto columna fuerte – viga débil) en diseño para alcanzar una estructura dúctil, previniendo todos los modos de falla frágil prematuros en miembros estructurales. Una resistencia lateral más alta para un fuerza-tipo estructura es proporcionada normalmente por los muros estructurales.

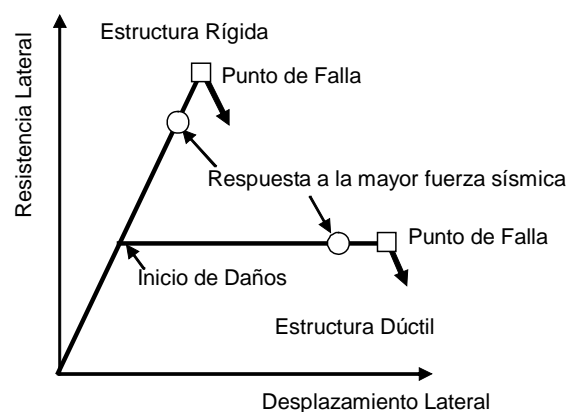


Fig 1: Fuerza y ductilidad de una estructura

Los modos de la falla frágil se deben prevenir en miembros que portan la carga vertical. Si los modos de falla frágil no se pueden prevenir en la construcción, después más arriba la fuerza debe ser proporcionada. Las casas del adobe tienen masa pesada, pero fuerza lateral baja y poca capacidad de

la deformación; se derrumban precipitadamente cuando las fuerzas de la inercia asociadas a la masa pesada exceden la fuerza lateral baja de las muros del adobe.

El daño estructural, tan bien como el daño de elementos no estructurales, de un edificio con alta resistencia lateral (rigidez y resistencia) es probable ser más pequeño bajo sismos frecuentes de menor importancia que el de un edificio con resistencia baja, sin importar la capacidad de la deformación en la falla. Por lo tanto, cierta resistencia mínima se debe proporcionar al límite de daño estructural durante sismos más frecuentes

La reciente tendencia en la ingeniería y el diseño estructural es poner gran énfasis en la ductilidad para la protección de una estructura. Es de hecho un buen método para retardar el colapso de la estructura para la protección de la vida de los habitantes, pero la ductilidad es una capacidad para que una estructura pueda deformarse después de la iniciación de un daño importante; es decir, la ductilidad no se puede separar del daño. Una estructura dúctil pero de bajo-capacidad sufre daños significativos por un terremoto de intensidad intermedia, y el daño se debe reparar para la reutilización. Es más deseable en algunas estructuras proporcionar una fuerza lateral más grande para limitar el daño ante eventos sísmicos de largo periodo de retorno..

### **Colapso progresivo de una estructura frágil**

Cuando un miembro vertical, tal como una columna o un muro estructural, falla en un modo frágil, por ejemplo en corte, el corte llevado por el miembro debe ser transferido y ser resistido por los otros miembros verticales del mismo nivel. El corte adicional acciona a menudo la falla frágil de estos miembros porque se diseñan los miembros estructurales normalmente bajo mismas especificaciones; es decir, si un miembro falla en una manera frágil, los otros miembros pueden también fallar en el modo similar. El colapso de un edificio en un nivel ocurre por la falla frágil progresiva de miembros verticales, según lo observado durante el desastre 1995 del terremoto de Kobe. La capacidad mínima de la deformación se debe proporcionar en todos los miembros estructurales susceptibles al daño estructural.

La falla de miembros verticales no sólo da lugar a la reducción de la resistencia lateral, también da lugar a la pérdida de la capacidad de carga vertical. La carga de gravedad apoyada por el miembro que falla se debe transferir a los miembros verticales adyacentes. La falla de transferencia de la carga de la gravedad causa colapso parcial alrededor del miembro vertical que falló, pero no el colapso total del piso o nivel.

La estructura debe ser proveída con miembros estructurales redundantes de modo que la falla de un miembro no conduzca al colapso de la estructura. Por ejemplo, si un piso es apoyado por cuatro columnas en las esquinas, la falla de una columna de la esquina conduce al colapso.

Un losa plana o llana sin capitales en la columna es popular en algunas regiones porque no tiene vigas debajo de un nivel de la losa. La parte crítica del sistema plano de la losa es la transferencia vertical del corte entre la losa y una columna. La falla del corte en la conexión conduce “al colapso tipo pan-cake” del edificio, no conduciendo ningún espacio entre los pisos adyacentes para que los inquilinos sobrevivan después del colapso. Una falla seria fue observada en el terremoto de 1985 en Ciudad de México. La conexión losa-columna debe ser diseñada cuidadosamente para mantener la resistencia con una gran deformación del sistema plano flexible de la losa. Un sistema como con muro estructurales es obligatorio proporcionar rigidez lateral así como la resistencia de la estructura.

### **Concentración del daño**

La concentración de la deformación estructural y del daño asociado a los lugares limitados se debe evitar si la capacidad de la deformación en las localizaciones previstas de los daños es limitada, especialmente en edificios de concreto reforzado. El colapso de un edificio es causado normalmente por la falla de los miembros que llevan de la carga vertical de un piso. Para proteger a los miembros verticales en una construcción de muchos pisos, deben ser proveídos una resistencia más alta que miembros horizontales con los que se conectan para dirigir los daños a los miembros horizontales.

La concentración de daños puede ser causado por la distribución irregular de la rigidez y de la fuerza en el plan o a lo largo de altura y de tipos de mecanismo del colapso después de la formación de las rótulas plásticas.

(a) Irregularidades verticales

Cuando la rigidez y la fuerza asociada se reducen precipitadamente en un cuento a lo largo de la altura, las deformaciones terremoto-inducidas tienden para concentrarse en el cuento flexible y/o débil. La concentración del daño en una historia conduce a la deformación grande en miembros verticales. La deformación excesiva en miembros verticales conduce a menudo a la falla de estos miembros y al colapso del piso o nivel.

Los primeros niveles suaves/débiles (Fig 2) se observan comúnmente en edificios residenciales de varios niveles en las áreas urbanas, donde el primer nivel se utiliza a menudo para el espacio abierto, las instalaciones comerciales o los garajes. Por ejemplo, los muros estructurales que separan unidades residenciales en niveles superiores pueden no ser continuos en el primer nivel por el cambio de uso del nivel. Las columnas del primer nivel durante el sacudimiento de un terremoto deben resistir un corte en la base grande, inevitable conduciendo a una larga distorsión concentrada en ese nivel, y una variación grande también en el momento de volteo y resultando largas variaciones de fuerzas axiales en columnas exteriores, conduciendo a la falla por compresión por la flexión en una pequeña deformación antes o levemente después de la fluencia por flexión. Se debe observar que el corte se puede transferir a las conexiones vecinas a través de las losas, pero la fuerza axial causada por el momento de volteo debe de ser resistido por las columnas exteriores en la misma zona.

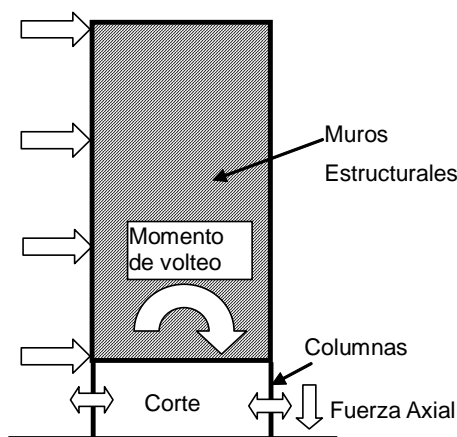


Fig 2: Irregularidad vertical típica del edificio

(b) Irregularidades horizontales

La excentricidad entre los centros de la masa y el centro de rigidez causan la vibración torsional de la sobre el eje vertical en el centro de la rigidez durante un terremoto y de los resultados en daño más grandes son en miembros lejos del centro de la rotación. Por ejemplo, los muros estructurales se colocan en un lado de un edificio mientras que el otro lado tiene marcos abiertos (Fig 3). El muro estructural es eficaz reduciendo la deformación lateral y resistiendo fuerzas horizontales grandes, pero amplifica la deformación en columnas exteriores en el otro lado. Los muros son eficaces en resistencia del terremoto cuando están distribuidas en la planta.

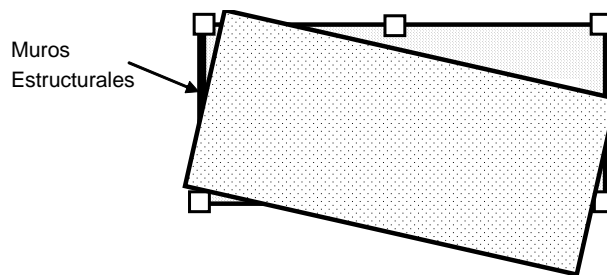


Fig 3: Excentricidad de centros de la rigidez y de la masa

(c) Mecanismos (parciales) de piso

Para una deformación lateral dada, la deformación plástica en las rótulas plásticas por flexión es pequeña si el mecanismo estructural total se forma bajo el cargas laterales en vez de un mecanismo parcial. Por lo tanto, es deseable distribuir las rótulas plásticas a través de una estructura seleccionando el mecanismo total del colapso (diseño de columna fuerte-viga débil).

La formación de rótulas plásticas en las columnas, normalmente sujetadas a altas fuerzas axiales, no es deseable porque la capacidad de la deformación de columnas bajo alta fuerza axial es pequeña. Es más deseable forzar el rendimiento por flexión en los extremos de vigas donde es fácil desarrollar una gran deformación plástica por la flexión. Sin embargo, el rendimiento del nivel de la azotea no es deseable porque el agrietarse asociado al fluencia por flexión puede causar su falla de funcionamiento. Es necesario formar la bisagra plástica en el fondo de las columnas del primer nivel para la formación del mecanismo plástico total, pero la formación de rótulas plásticas en las columnas del primer nivel, sujeta a la alta fuerza axial, debe ser retrasada tanto cuanto sea posible proporcionando una resistencia a la flexión extraordinariamente más alta.

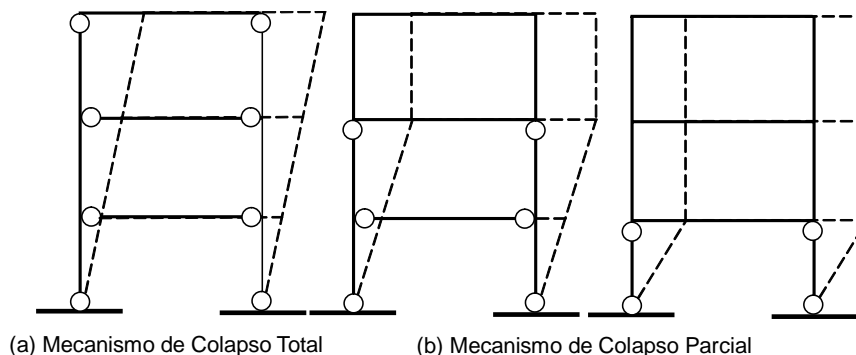


Fig 4: Deformación plástica en las rótulas plástica por fluencia y los mecanismos de colapso

**Elementos de No Estructurales**

Los elementos no estructurales, tales como muros de albañilería o concreto y las escaleras, se tratan normalmente en un análisis estructural aunque pueden contribuir perceptiblemente a la rigidez del sistema que enmarcan. La existencia de estos elementos no estructurales de la alta-rigidez puede causar distribuciones irregulares de la rigidez en planta o a lo largo de la altura.

Las vigas pantalla y las muros que cuelgan sobre y debajo de vigas del piso reducen a menudo la longitud deformable de columnas, causando falla frágil por corte en las columnas.

El daños de elementos no estructurales o arquitectónicos, tales como particiones, de ventanas, puertas e instalaciones mecánicas, interrumpe el uso de un edificio. El costo de trabajo de la reparación de un edificio es gobernado a menudo por el reemplazo de los elementos no estructurales dañados, en vez de el trabajo de la reparación sobre elementos estructurales. El daños de elementos no estructurales

pueden crear un peligro para la gente en los interiores del edificio, al evacuar el edificio; además, los elementos que se caen pueden bloquear las rutas de la evacuación en un edificio seriamente dañado.

### Contacto con edificios adyacentes

El contacto con edificios adyacentes son causas de daño estructural. Una distancia apropiada se debe mantener entre los edificios adyacentes o en las juntas de dilatación. Cuando se estima la distancia requerida, la deformación oscilante causada por el movimiento telúrico debe ser considerada.

Cuando una serie de edificios se construye de lado a lado en algunos lugares, los edificios del borde son empujados a menudo hacia fuera golpeando del edificio interno adyacente y sufren daño severo mientras que los edificios internos se protegen contra la deformación lateral excesiva.

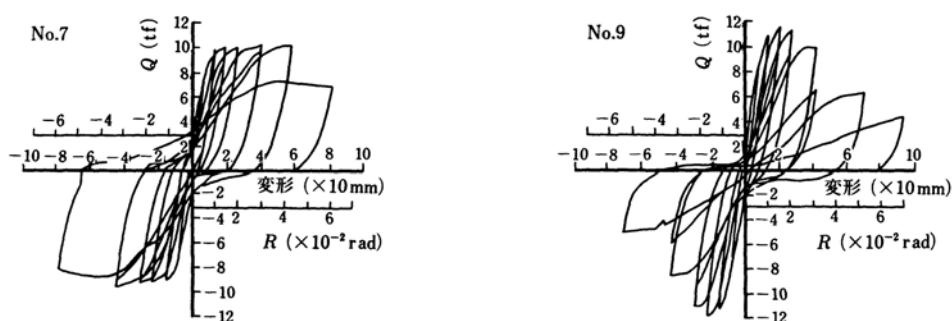
### Deterioración con edad

La deterioración de los materiales estructurales debido al envejecimiento y a las condiciones ambientales agresivas reduce el funcionamiento potencial de un edificio. Es importante mantener la estructura en un intervalo regular o seguir las especificaciones de construcción rígidas para la durabilidad durante la construcción.

## FALLA DE MIEMBROS DE CONCRETO REFORZADO

Los miembros estructurales y las secciones de concretos reforzados son sujetas a fuerzas axiales, momento por flexión y fuerzas de corte, bajo cargas de gravedad y fuerzas sísmicas. Las fuerzas axiales en viga no se considera a menudo en vigas, mientras que las fuerzas axiales están gobernando el diseño en las columnas. Los tipos de la falla de los elementos o miembros pueden ser diferentes para las columnas, las vigas, las muros y los empalmes de la viga-columna. Es importante considerar la consecuencia de la falla del miembro al comportamiento estructural; e.g., la falla de miembros verticales conduce a menudo al colapso de un edificio.

Los modos de falla en flexión y corte de un elemento estructural y del enlace a lo largo del refuerzo longitudinal son revisados (Fig 5). Un miembro estructural falla en un modo asociado a la resistencia más débil, pero el desarrollo de las marcas de los daños normalmente él más difícil de identificar el solo modo de la falla. Por ejemplo, después de la fluencia por flexión en una viga, la flexión y agrietamiento diagonal por corte reduce la resistencia de corte y conduce a la falla por corte aunque el corte del miembro puede no aumentar mucho después de la fluencia por flexión.



(a) Comportamiento dominado por Flexión      (b) Comportamiento dominado por corte

Fig 5: Relaciones típicas de la Fuerza-Deformación de los miembros de CR en laboratorio

### Falla de compresión por flexión

Un miembro concreto reforzado correctamente diseñado y detallado, sujetado a la fuerza y al momento de flexión axiales, rinde normalmente en la flexión rindiendo del refuerzo longitudinal extensible seguido por la falla de la compresión del concreto; este modo de fallo normalmente se llama falla de compresión por flexión (Fig 5 (a)). Porque la falla final es causada por la falla de

compresión del concreto, la viga, sin fuerza axial, puede desarrollar gran deformación plástica después de la fluencia.

La capacidad de la deformación de una columna es influenciada por el nivel de la fuerza axial en la columna y de la cantidad de refuerzo lateral proporcionada en la zona de la deformación plástica para el confinamiento del concreto. El nivel de la fuerza axial se limita al nivel relativamente bajo, bajo condición de la gravedad. Durante un terremoto, sin embargo, las columnas exteriores, especialmente esquina, son sujetas a la variación de la fuerza axial debido al momento de volteo de una estructura; el nivel axial de la fuerza en estas columnas puede llegar a ser extremadamente alto en la compresión, conduciendo a la falla de compresión por flexión a veces antes de la fluencia por flexión.

Es a menudo difícil distinguir falla de compresión del corte y falla de compresión por flexión, pues ambas fallas ocurren cerca de los extremos de la columna e implican el aplastamiento del concreto. El refuerzo lateral de confinamiento retrasa la falla por aplastamiento del concreto bajo altas esfuerzos de compresión.

### **Falla por corte**

Se sabe la falla de corte por tracción diagonal es un modo de falla frágil una vez que se alcance la resistencia, y es el menos deseado en el diseño (Fig 5 (b)). La fuerza de corte causa la tensión extensible en concreto en la dirección diagonal al eje del miembro. Después de agrietarse concreto, la tensión se debe resistir por el refuerzo lateral. La falla frágil por corte ocurre de forma de tracción diagonal cuando la cantidad mínima del refuerzo lateral (tamaño, espaciamiento y fuerza del refuerzo de corte) no se proporciona en el miembro.

Cuando la cantidad mínima de refuerzo lateral se proporciona en un elemento estructural, la falla de corte se desarrolla bajo la forma de falla diagonal por compresión del concreto después de de la fluencia del refuerzo lateral. Este modo de falla no es tan frágil como la falla tracción diagonal, pero la capacidad de la deformación es limitada. Si la cantidad excesiva de refuerzo lateral se proporciona, la falla diagonal de compresión del concreto ocurre antes de la fluencia del refuerzo lateral. Por lo tanto, hay un límite superior en la cantidad de refuerzo lateral eficaz para la resistencia de corte. Después de falla por compresión del concreto o de la fluencia del refuerzo lateral, la capacidad de carga vertical de la carga de la columna se pierde a menudo, conduciendo al colapso del nivel.

Porque el refuerzo lateral resiste la fuerza de tensión por corte, los extremos del refuerzo lateral se deben anclar en el concreto en la base con curva de 135 grados, o deben ser soldados juntos. Cuando una barra de refuerzo está doblada, la deformación plástica permanente ocurre en la curva y la región llega a ser menos dúctil. El acero de refuerzo capaz de desarrollar altas tensión y ductilidad antes de que la fractura se deba utilizar para el refuerzo lateral.

Los elementos de no estructurales se descuidan comúnmente en modelar y análisis en cálculos del diseño, pero son puestos con el propósito de la funcionalidad del edificio, por ejemplo, muros de partición o divisorios de ambientes. Cuando los elementos no estructurales rígidos y fuertes se ponen en contacto con elementos estructurales, la interacción puede conducir al daño en elementos no estructurales y estructurales. El ejemplo típico es una columna corta, que la longitud deformable es acortada por los alfeizeres unidos directamente a la columna.

### **Falla en los empalmes del refuerzo longitudinal**

La tensión que ocurre en las barras deformadas causa tensión del anillo circundante del concreto. Las altas tensiones en enlace por flexión pueden existir en miembros con gradientes de momentos a lo largo de sus longitudes. Si el refuerzo longitudinal de una viga o de una columna no es reforzado por los estribos cercanamente espaciados, las grietas que parten pueden desarrollarse a lo largo del refuerzo longitudinal, especialmente cuando la fuerza del concreto es baja, cuando las barras longitudinales del diámetro grande de alta resistencia son usadas, o cuando la cobertura de concreto

en las barras es delgada. Éstos que parten agrietan resultado en la pérdida de resistencia en enlace, limitando la capacidad de carga lateral en una pequeña carga de deformación.

El refuerzo longitudinal se empalma de varias maneras, incluyendo empalmes enrolados, de empalmes mecánicos y de empalmes soldados. Los empalmes se deben situar en una zona donde haya baja tracción o tensión. Los empalmes en edificios más viejos fueron situados en regiones de una tensión más alta porque las implicaciones para el funcionamiento sísmico eran inadecuadamente entendidas. La falla del empalme reduce la resistencia por flexión del miembro a menudo antes de fluir.

### **Uniones viga-columna**

Cuando un marco estructural resistente a momento se diseña para el comportamiento de la columna fuerte-viga débil, la unión viga-columna se puede tensar fuertemente después de la fluencia de la sección de la viga y grietas de forma diagonal pueden formarse en la conexión. Las grietas por flexión anchas se pueden desarrollar en el extremo de la viga, parcialmente atribuible al resbalón o falta de adherencia del refuerzo de la viga dentro de la conexión. Tal agrietamiento de corte puede reducir la rigidez de un edificio. La falla se observa en las uniones viga-columna con las columnas estrechas y también en uniones viga-columna sin el refuerzo lateral.

La fuerza en el refuerzo longitudinal en vigas y columnas tiene que ser anclado dentro de una conexión de la viga-columna. Las conexiones de una más antigua construcción pueden estar sin el refuerzo transversal común, en este caso el refuerzo de la columna y de la viga se ancla en concreto esencialmente plano. Si el refuerzo longitudinal de la viga no se ancla completamente en un empalme de la viga-columna, la barra puede salirse de la unión; e.g., el refuerzo inferior de la viga, en diseño no-sísmico, se encaja una distancia corta en la unión viga-columna.

### **Cimentación**

La falla en la cimentación es causada por a) licuefacción y pérdida de capacidad a la tensión b) derrumbamientos de cuestas, c) ruptura d), compactación del suelo e) asentamiento diferencial. Es normalmente difícil diseñar y construir la cimentación segura para resolver el movimiento de tierra inmediatamente sobre la ruptura de la avería. Aunque la falla de la cimentación no plantea normalmente una amenaza de la vida-seguridad, el costo de investigación de daños y de trabajo de la reparación es extremadamente costoso. Por lo tanto, es recomendable reducir la posibilidad de falla en la cimentación.

La fuerza de la inercia que actúa en un edificio se debe resistir por la cimentación de la estructura. Los altos momentos de flexión combinados con las fuerzas axiales que actúan en el tope del pilote pueden causar el aplastamiento del concreto. Tales daños en la cimentación es difícil de identificar después de un terremoto, a menos que la inclinación evidente de un edificio se detecte como resultado de la deformación permanente de la cimentación.

## **CALIDAD DE LA EJECUCIÓN Y DE LOS MATERIALES**

El desempeño de un edificio es afectado por la calidad del trabajo durante la construcción. Por ejemplo, la resistencia del material especificada en documentos del diseño no es respetada durante la construcción. La cantidad de refuerzo no se pone según lo especificado en diseño. El final del refuerzo lateral no es doblado en 135° a pesar que el código de diseño lo especifica. La cobertura del refuerzo no es suficiente y la barra de refuerzo es dañada con las grietas en la superficie del concreto. La educación de los trabajadores de la construcción y la supervisión del trabajo en la construcción son necesarias mantener la calidad de la ejecución.

La calidad de materiales también se deteriora con el tiempo. El mantenimiento apropiado de la construcción es esencial. El cambio del uso y de la ocupación es acompañado a menudo por la

modificación en un sistema estructural sin la investigación apropiada en consecuencia durante un terremoto.

## **ESTADÍSTICA DEL DAÑOS DE ÚLTIMOS TERREMOTOS IMPORTANTES**

The Architectural Institute of Japan (AIJ) estableció la estadística de los daños de edificios en muchos terremotos. Los datos fueron publicados en los informes de la investigación de daños (AIJ 1987). Es útil entender la estadística de daños reales en edificios.

### **El terremoto 1985 de Ciudad de México**

Un terremoto de Magnitud 8.1 ocurrió en la costa del oeste mexicana el 19 de septiembre de 1985, seguido por una réplica sísmica M7.5 el 21 de septiembre. Los dos acontecimientos sucesivos causaron un daño significativo en Ciudad de México aunque la ciudad fue situada aproximadamente 400 kilómetros lejos del epicentro. El daño estructural fue concentrado en una región de un lecho de un antiguo lago. El daño fue atribuido a la amplificación de los componentes del largo-período del movimiento de tierra y del depósito de suelo flexible base en el valle de México.

La estadística de los daños de los edificios de CR en el Fig 6 fue obtenida en el antiguo lecho del lago la zona (AIJ, 1987). El área investigada incluyó residenciales altamente dañadas así como los distritos comerciales, cubriendo levemente más de 20 por ciento de la ciudad central. Aproximadamente 73.4 por ciento de los 4.532 edificios examinados eran tres-pisos o más bajos; 94.0 por ciento de edificios eran seis-historias o más bajos. El daño fue clasificado como operacionable (usable sin cualquier trabajo de la reparación), el daño pesado (trabajo de la reparación necesitado para el uso) y colapso.

Noventa y cuatro (93.8) por ciento de los edificios fueron juzgados operacionales. La mayoría (más de 94 por ciento) de bajo-se levanta el daños muy ligera sufrida de los edificios (seis historias o bajan). El porcentaje de edificios seriamente dañados aumentó con el número de historias, especialmente a mediados de a los edificios altos (siete niveles y mayores). Más que la mitad de la nueve-historia y edificios más altos sufrieron daño pesado o se derrumbaron; es decir, 37.2 por ciento de daños pesada sufrida y 15.5 por ciento se derrumbaron.

El daño y el colapso edificios pesados altos dieron un impacto significativo a la sociedad. La construcción plana de la losa de CR se derrumbó en una forma de pancakes, no dejando ningún espacio para la supervivencia de la vida entre las losas adyacentes. El choque o contacto entre edificios adyacentes era parcialmente observado debido al movimiento oscilante en la base de las estructuras. El movimiento del terreno, dominado por los componentes largos del período en la zona del antiguo lecho del lago, fue pensado el causante del aumento del daño de edificios más altos.

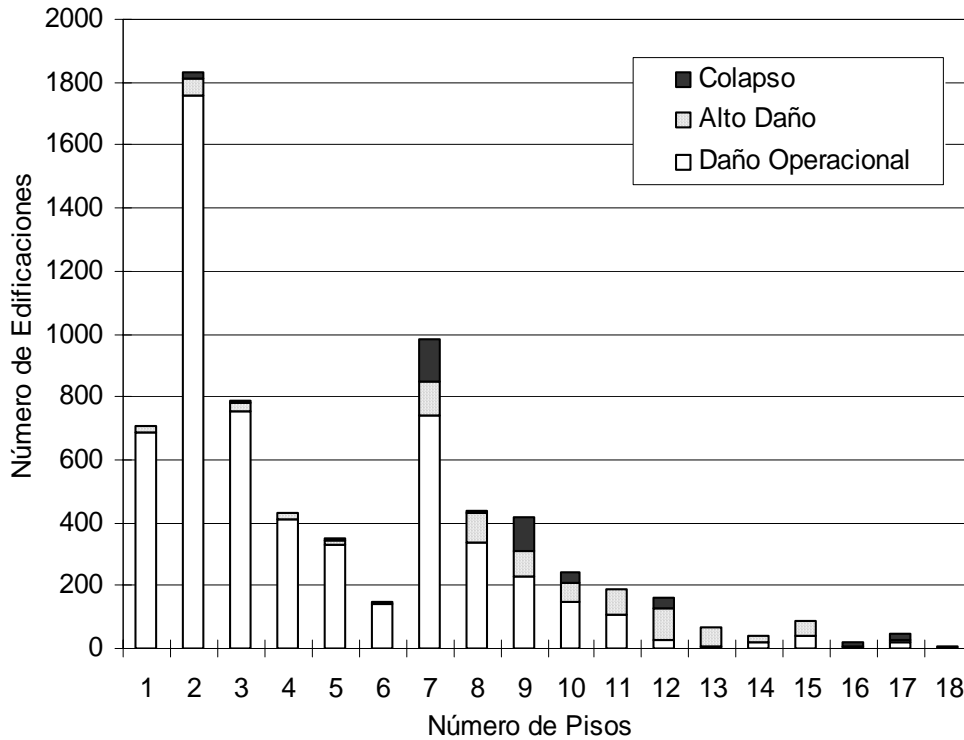


Fig 6: Daños de los edificios de CR en el terremoto 1985 de Ciudad de México  
(Nota: el número de edificios sobre 6 niveles fue multiplicado por 10.)

Se debe observar que el porcentaje de severos daños era relativamente bajo uniforme en un desastre significativo del terremoto, especialmente en los edificios bajos que eran la mayoría de la común construcción. Un porcentaje más alto del daño fue observado a mediados de a los edificios altos. Los edificios bajos eran relativamente ligeros y tenían capacidad redundante para resistir sísmicas. El porcentaje pequeño de edificios vulnerables se debe identificar en el gravamen sísmico de la vulnerabilidad.

### El terremoto 1995 de Hyogo-ken Nanbu

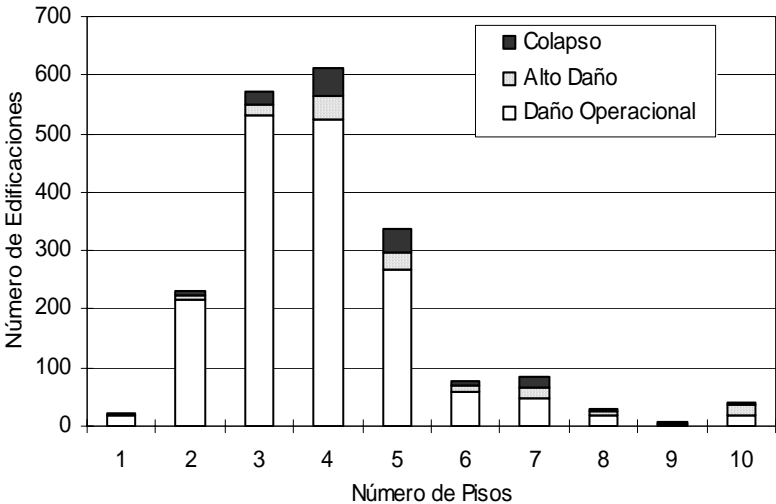
El terremoto 1995 de Hyogo-ken Nanbu mató a casi 6.500 personas (las causas directas e indirectas incluyendo por el terremoto), dañadas más de 40 millares de la gente. El capítulo de Kinki (región de Osaka y de Kyoto), The Architectural Institute of Japan (AIJ), investigó el daño de todos los edificios concretos reforzados existentes (RC) (3.911 edificios en total) en la región de intensidad sísmica VII (la intensidad sísmica más alta definida por la agencia meteorológica de Japón) en las salas de Nada y de Higashi-Nada, ciudad de Kobe (comité concreto reforzado, AIJ Kinki Chapter, 1996).

Setenta y cinco (75) por ciento de los 3.911 edificios de CR examinados eran edificios residenciales (éstos incluyendo usados parcialmente para la oficina o tienda). Cuarenta y cinco (47.5) por ciento de los edificios fueron construidos en conformidad con la ley actual del estándar de edificaciones (revisada en 1981). Ochenta y tres (82.5) por ciento de los edificios eran más bajos que o igualan a cinco pisos altas (73.0 por ciento eran a partir 3 a 5 niveles altos) y 9.7 por ciento tenían construcción ligera del primer nivel

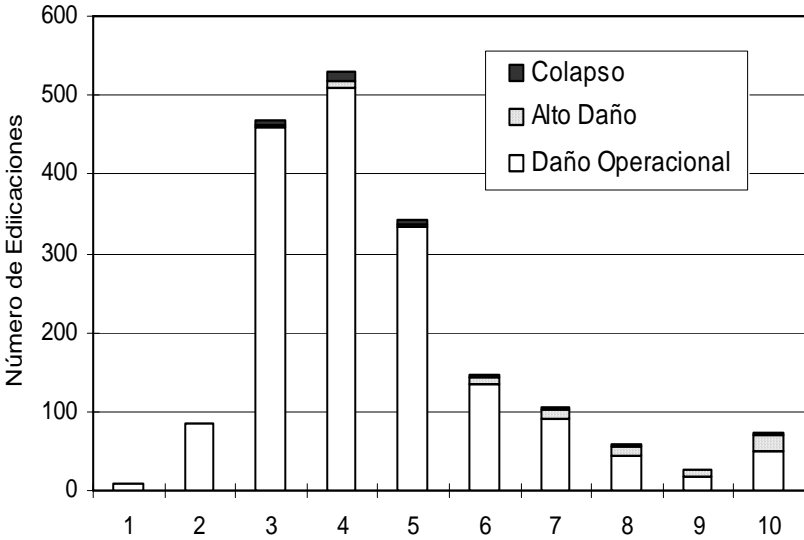
Una revisión significativa fue hecha en los requisitos sísmicos del código de diseño estándar de edificaciones en 1981. Antes de la revisión de la ley, el procedimiento de diseño permisible a la tracción fue requerido en el diseño sísmico de las estructuras de edificio usando el coeficiente sísmico de 0.2 en cada nivel del piso; es decir, la resistencia mínima fue proporcionada en el edificio. Además

del diseño permisible de la tensión, la revisión de la ley requiere que la capacidad que resiste de la fuerza lateral en la formación del mecanismo del colapso deba satisfacer el nivel mínimo, que se determina que toma en la consideración la capacidad prevista de la deformación de rendir miembros y distribuciones irregulares de la rigidez y la masa a lo largo de la altura así como en plan.

Fuera de esos 2.035 edificios construidos antes de la ley 1981 del estándar de edificio, 7.4 por ciento de daños pesada sufrida y 8.3 por ciento se derrumbaron. Fuera de esos 1.859 edificios construidos usando la ley 1981 del estándar de edificio, 3.9 por ciento de daños pesada sufrida y 2.6 por ciento se derrumbaron. La revisión 1981 de la ley del estándar de edificio realzó perceptiblemente el funcionamiento de los edificios de RC contra ataque del terremoto.



(a) Daños de los edificios construidos antes de 1981



(b) Daños de los edificios construidos después de 1981

Fig 7: Daños en edificios de CR en el terremoto 1995 de Hyogo-ken Nanbu

El cociente de un daño más severo aumenta con el número de pisos, especialmente para los edificios más alto de 5 pisos. El porcentaje de los edificios pre-1981, que seguían siendo operacionales después del terremoto, es 87.9 por ciento para 1 - a 5 edificios de la historia, 66.1 por ciento para 6 - a 8 edificios de la historia, y 46.0 por ciento para la historia 9 y edificios más altos. Los porcentajes

correspondientes de los edificios post-1981 son 97.1 por ciento, 87.1 por ciento y 70.7 por ciento, respectivamente. La revisión del código de edificio mejoró el nivel de la seguridad de bajo-se levanta casi uniformemente a mediados de-se levanta los edificios. Incluso después de la revisión, 20 por ciento de edificios más alto de siete historias sufrieron daño pesado o se derrumbaron, sobre todo en la suave-primera construcción de la historia

## **NUEVOS OBJETIVOS DEL FUNCIONAMIENTO Y TECNOLOGÍA DE CONTROL DE LA VIBRACIÓN**

Desde el terremoto 1891 de Nohbi, especialmente después del terremoto 1923 de Kanto (Tokio), la metodología del diseño estructural y la construcción se ha estudiado extensivamente en Japón. La estadística de daños del desastre 1995 del terremoto de Kobe indicó que el estado plus ultra actual podría proporcionar edificios relativamente seguros. Había algunos casos en los cuales el nivel del daños era de menor importancia de un punto de vista estructural, pero el daño en los elementos no estructurales, tales como particiones, puertas y ventanas, previno a inquilinos del uso continuado del edificio.

El objetivo principal de una estructura es proporcionar el espacio para la función prevista de un edificio. Aun cuando una estructura sobrevive un terremoto con daño de menor importancia, si el edificio pierde su función, el diseño puede no ser acertada dicho. Se parece que los ingenieros estructurales se han referido solamente sobre su propia profesión; es decir, el diseño de una estructura por la estructura más bien que el diseño de una estructura para la función del edificio. Si el dueño de un edificio es informado de una consecuencia posible sobre la función de su edificio después de un terremoto, él puede ser que esté dispuesto a pagar costos adicionales hacia un rendimiento más alto. Debe haber habido una comunicación más cercana entre el dueño y los ingenieros sobre el funcionamiento de una estructura.

El uso de la tecnología del control de la vibración aparece ser útil para la protección de la función del edificio, protegiendo elementos no estructurales contra daño. El aislamiento sísmico llegó a ser absolutamente popular en Japón después del desastre 1995 del terremoto de Kobe. Los varios dispositivos pasivos de la disipación de la energía, tales como dispositivos histeréticos de disipación de energía, dispositivos viscosos elásticos y amortiguadores sísmicos, se han utilizado en edificios e instalaciones más importantes. Ha habido algunos esfuerzos de utilizar tecnología semi-activa y activa del control de la vibración en edificios.

## **CONCLUSIONES**

La ingeniería sísmica, aunque está aparecida ser ciencia establecida, se ha desarrollado con la observación del desastre causada por terremotos. El objetivo de la ingeniería sísmica ha sido “no repetir los mismos errores en eventos futuros.”

Las causas comunes de las fallas en los edificios en terremotos pasados se repasan desde puntos de vista del sistema estructural y sus elementos estructurales. El colapso de edificios fue causado a menudo por la falla de los elementos que llevaban la carga vertical alcanzando la capacidad de la deformación antes o después de alcanzar su resistencia a fuerzas laterales.

La estadística de edificios dañados indica que el porcentaje de edificios seriamente dañados es relativamente pequeño, solamente el porcentaje creciente con el número de pisos. Los edificios existentes, diseñados y construidos usando tecnología anticuada, son susceptibles a los ataques del terremoto.

## REFERENCIAS

1. Architectural Institute of Japan, Reports on the Damage Investigation of the 1985 Mexico Earthquake (in Japanese), 1987, 599 pp.
2. Reinforced Concrete Committee, AIJ Kinki Chapter, Report of Damage Investigation on Reinforced Concrete Buildings, the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (in Japanese), 1996, 245 pp.