

The University of Tokyo,
Graduate School of Engineering,
Department of Architecture,
Tokyo, Japan

博士論文

**Analytical study on a seismic safety evaluation method for pre-damaged buildings based
on Newmark's constant energy and constant displacement concepts**

(ニューマークのエネルギー一定則及び変位一定則に基づく損傷建物の耐震安全性評価
法に関する解析的研究)

SAAVEDRA MALDONADO Daniel

サベドラマルドナドダニエル

Primary Advisor: Professor Koichi KUSUNOKI

楠浩一 東京大学地震研究所災害科学系研究部門; 教授

RESUMEN DE TESIS DE DOCTORADO

Estudio analítico sobre un método de evaluación de seguridad sísmica para edificios pre-dañados basado en los conceptos de energía y desplazamiento constantes de Newmark

Las experiencias de eventos sísmicos recientes han demostrado que los edificios que sobreviven al sismo principal pueden colapsar durante una réplica, la cual puede ocurrir días, meses o años después. En consecuencia, los códigos sísmicos requieren la restauración de los edificios antes de que ocurra otro sismo. Desafortunadamente, el proceso de recuperación de los edificios dañados en algunos países propensos a sismos ha sido lento debido a la cantidad de estructuras afectadas y la inversión necesaria para reforzarlas. Por lo tanto, el edificio puede permanecer dañado durante un período muy largo y es esencial verificar su seguridad contra futuros sismos contemplados por el código sísmico. Varios métodos de evaluación de daños de edificios posteriores al sismo clasifican el daño de un edificio y evalúan su capacidad para sobrevivir a futuros eventos sísmicos utilizando datos del sistema de monitoreo de la salud estructural, en los que la réplica se relaciona fuertemente con el sismo principal, como ser, la adopción de una réplica idéntica al sismo principal. Este último supuesto introduce una limitación para los casos donde el primer sismo causa daños leves a moderados al edificio y podría ocurrir un posible sismo posterior con mayor demanda que el primer sismo. Por tanto, el propósito de este estudio es desarrollar un método de evaluación para edificios pre-dañados que pueden experimentar un segundo sismo con una demanda sísmica mayor que la del primer sismo.

Este estudio consta de 8 capítulos. Capítulo 1 “Introducción”: Este capítulo describe la importancia de la evaluación de daños post-sismo de edificios instrumentados y las predicciones de la respuesta del edificio durante réplicas, al tiempo que enfatiza las limitaciones de los métodos actuales de evaluación de daños al abordar una secuencia de movimiento del suelo compuesta por dos sismos diferentes. Este capítulo describe brevemente la estrategia para derivar un método de evaluación de daños basado en la resistencia de edificios pre-dañados extendiendo la aplicación de los conceptos de energía y desplazamiento constantes de Newmark a un modelo representativo de un edificio pre-dañado. Este capítulo también presenta una descripción general de; los conceptos de energía y desplazamiento constantes de Newmark, los métodos actuales de evaluación de daños, el método del espectro de capacidad y los hallazgos de investigaciones previas que adoptó el método propuesto.

Capítulo 2 “Método de evaluación de daños para edificios de periodo corto previamente dañados basado en el concepto de energía constante de Newmark”: Los conceptos de energía y desplazamiento constantes de Newmark se estudiaron ampliamente y se adoptaron para varias normas de diseño sísmico para estimar la respuesta inelástica de los edificios durante un sismo. Newmark introdujo ecuaciones que correlacionan la resistencia del edificio y su factor de ductilidad con la demanda elástica del sismo. Por lo tanto, este estudio extiende la aplicación de los conceptos de Newmark para predecir la respuesta del edificio pre-dañado durante un segundo sismo. Este estudio adopta el segundo sismo como un terremoto con espectros elásticos equivalentes a los espectros de diseño definidos por las normas sísmicas. Tal suposición incluye casos de secuencia de sismos, en los que el segundo sismo tiene una demanda sísmica mayor que el primero. Además, esta suposición estandariza la evaluación de daños de acuerdo con los requisitos de las normas sísmicas para el sitio de análisis.

El método propuesto utiliza varios parámetros del edificio durante el primer sismo para predecir y evaluar su respuesta durante el segundo sismo. Estos parámetros incluyen los desplazamientos máximos, mínimo y residual, el desplazamiento límite de seguridad y la demanda de resistencia elástica potencial del segundo sismo. Varias fuentes proporcionan esta información, como ser, los datos de monitoreo de la salud estructural, mediciones in situ del desplazamiento residual y métodos de predicción disponibles. Los modelos de edificios iniciales se pueden modificar para convertirlos en modelos pre-dañados, utilizando los parámetros capturados de la respuesta del edificio durante el primer sismo. Posteriormente, se puede aplicar el concepto de energía constante de Newmark para derivar ecuaciones que estimen el factor de resistencia requerido de los edificios que satisfacen el límite de seguridad durante el segundo sismo.

Este capítulo también describe la aplicación del método propuesto basado en la clasificación del daño actual del edificio instrumentado durante el primer sismo para verificar el cumplimiento del código sísmico del edificio durante futuros sismos esperados desde una perspectiva de resistencia. El procedimiento de aplicación obtiene los parámetros del edificio pre-dañado, modifica el modelo inicial para incluir el daño y estima la resistencia requerida para sobrevivir a un futuro segundo sismo a nivel de diseño utilizando los conceptos de Newmark. Los criterios de evaluación del daño consideran que, si el factor de reducción de resistencia del edificio pre-dañado es mayor que el obtenido a partir del método propuesto, el desplazamiento máximo durante el segundo sismo esperado sería menor que el límite de desplazamiento de seguridad. Por lo tanto, el edificio podrá satisfacer el límite de seguridad del código sísmico.

Capítulo 3 “Método de análisis numérico para la verificación de secuencias de sismos y análisis paramétrico de un GDL”: Los métodos de análisis numérico-actuales para secuencias de sismos tienen limitaciones en el control de parámetros de desplazamientos máximos, mínimos y residuales para reproducir el daño durante el primer sismo. Por lo tanto, este estudio propuso un nuevo método de análisis numérico alternativo simplificado para modelos de un GDL. Este método combina el análisis Pushover (simulando el daño durante el primer sismo) con el análisis de tiempo-historia (evaluando la respuesta durante el segundo sismo). Este método ayudó a verificar las hipótesis y los efectos de los desplazamientos máximos, mínimos y residuales durante el primer sismo sobre la respuesta máxima del edificio durante el segundo sismo.

Capítulo 4 “Verificación del Análisis Numérico del Método de Evaluación de Daños Basado en el Concepto de Energía Constante de Newmark”: Este estudio verifica el método propuesto para la evaluación de daños de edificios pre-dañados durante un segundo sismo. Esta verificación implica comparar los análisis numéricos de un GDL con ecuaciones que estiman el factor de resistencia que un edificio pre-dañado requiere para satisfacer el límite de seguridad de desplazamiento durante un segundo sismo. La precisión del método propuesto en el Capítulo 2 depende de la precisión del concepto de energía constante de Newmark. Por lo tanto, cuando el daño tiende a concentrarse en una dirección, el método propuesto incluye un factor de modificación que mejora la estimación del factor de resistencia de un edificio pre-dañado, mejorando así las estimaciones en tales casos. Además, el método propuesto incorpora un esquema de clasificación basado en el período inicial del edificio. Esta clasificación determina si se calcula el factor de resistencia requerido utilizando las ecuaciones propuestas, con o sin el factor de modificación.

Capítulo 5 “Verificación experimental del método de evaluación de daños basado en el concepto de energía constante de Newmark”: Se analizaron los datos experimentales de la mesa vibratoria de 12 estructuras de acero de marcos planos y un edificio de hormigón armado de 5 pisos. Se verificó las estimaciones de los factores de reducción de resistencia requeridos para los modelos pre-dañados para satisfacer el límite de seguridad durante un futuro sismo esperado. Esta validación implicó un procedimiento para evaluar la capacidad residual del edificio. Si la resistencia de un edificio pre-dañado excede la resistencia requerida por el método propuesto, el desplazamiento máximo durante un futuro sismo probablemente permanecerá por debajo del límite de seguridad.

Capítulo 6 “Método de evaluación de daños de edificios de período largo pre-dañados durante un segundo sismo basado en el concepto de desplazamiento constante de Newmark”: Este capítulo presenta el concepto de desplazamiento constante para estimar la respuesta de edificios de período largo previamente dañados durante un segundo sismo. El método utiliza información de la respuesta del edificio durante el primer sismo, como ser, una curva de capacidad representativa y los desplazamientos máximos y residuales. Las suposiciones para modificar la curva de capacidad inicial en un modelo con daño-previo son las mismas que las descritas en el Capítulo 2. Este método estima la respuesta del edificio durante el segundo sismo del modelo pre- dañado y su factor de resistencia requerido para satisfacer el límite de seguridad basado en el concepto de desplazamiento constante de Newmark. El método propuesto evalúa la capacidad de los edificios previamente dañados para soportar un sismo con una demanda sísmica comparable a la de los códigos de diseño.

El método propuesto adopta una rigidez equivalente para simplificar el modelo de un edificio de hormigón armado pre-dañado y utiliza el concepto de desplazamiento constante de Newmark para la estimación de la respuesta al segundo sismo, se validó comparando los resultados con el método de Kusunoki basado en el método del espectro de capacidad. Esta comparación confirma la validez de las suposiciones del método propuesto: la rigidez equivalente representa efectivamente el estado del edificio de hormigón armado pre-dañado y la aplicabilidad del concepto de Newmark para estimar la respuesta al segundo sismo con el modelo simplificado. Además, la comparación destacó las limitaciones de los métodos actuales de evaluación de daños que adoptan un segundo sismo idéntico al primero.

Capítulo 7 “Verificación experimental del método de evaluación de daños propuesto para edificios pre-dañados de periodo largo”: este capítulo se centra en verificar la precisión de las ecuaciones propuestas para estimar los factores de reducción de resistencia requeridos para edificios pre-dañados durante un segundo sismo. Se utilizaron datos de pruebas de mesa vibratoria experimentales de E-Defense de un edificio de estructura de acero de 18 pisos y un edificio de estructura de hormigón armado de 20 pisos para verificar el método de evaluación de daños basado en el concepto de desplazamiento constante de Newmark. Este capítulo adopta el procedimiento descrito en el Capítulo 5 para organizar la secuencia de movimiento del suelo y el método propuesto descrito en el Capítulo 6 para comparar los resultados de las pruebas reales con las estimaciones de las ecuaciones utilizando varios parámetros. Este capítulo también explora la influencia de la rigidez posterior a la fluencia en la precisión de las estimaciones de desplazamiento máximo durante el segundo sismo, en particular para los edificios que experimentan daños graves durante el primer sismo.

Capítulo 8 “Conclusiones y recomendaciones”. Este capítulo resume los resultados obtenidos en este estudio y presenta desafíos y recomendaciones futuras. Aunque el método propuesto es prometedor para la evaluación futura de edificios pre-dañados antes de estar sujetas a un sismo, aún existen algunas limitaciones. El método propuesto precisa de los desplazamientos residuales, especialmente para estructuras de acero, lo cual requiere más investigación para sistemas automatizados de monitoreo de la salud estructural basados en acelerómetros. Además, el método propuesto podría potencialmente considerar las respuestas objetivo del edificio además del límite de seguridad, incorporando límites basados en la ocupación inmediata o el tiempo de inactividad.

Palabras clave: Evaluación de daños, Réplica, Límite de seguridad, Monitoreo de la salud estructural, Concepto de energía constante de Newmark, Concepto de desplazamiento constante de Newmark, Factor de reducción de resistencia, Daño acumulativo.