NUMERO DE REGISTROS SISMICOS REQUERIDOS PARA EL PROCEDIMIENTO DE ESCALAMIENTO ASCE 7

Reyes, Juan C.[1] y Kalkan, Erol[2]

RESUMEN

Actualmente, la selección y escalamiento de registros sísmicos para ser utilizados en un análisis dinámico no-lineal de estructuras está basado en las provisiones del ASCE/SEI 7. Debido a que el número de registros requerido en el estándar ASCE está basado más en experiencia ingenieril que en una evaluación rigurosa, este estudio evalúa estadísticamente el número de registros requerido por el ASCE/SEI 7 de tal manera que al escalar los registros se obtenga una estimación precisa, eficiente y consistente de la "verdadera" respuesta estructural. Basado en sistemas elasto-plásticos y bilineales de un grado de libertad, el procedimiento de escalamiento de ASCE/SEI 7 es aplicado a 480 sets de movimientos sísmicos variando el número de registros por set de tres a diez. Se demuestra que los resultados obtenidos con el procedimiento de la ASCE/SEI 7 son demasiado conservadores cuando se emplean menos de siete registros. Utilizando siete o más registros seleccionados de manera aleatoria se obtiene una estimación más precisa de los EDPs y menor variabilidad en las respuestas. Cuando la selección de registros sísmicos se basa en su forma espectral y en la pseudo-aceleración de diseño, aumenta la precisión y eficiencia del procedimiento.

Palabras claves: registros sísmicos, escalamiento, análisis dinámico no-lineal

ABSTRACT

Currently, selection and scaling ground motions for use in nonlinear response history analysis of structures are based on ASCE/SEI 7 provisions. Because the limit in the number of records required in the ASCE standard is based on engineering experience rather than a comprehensive evaluation, this study statistically examines the required number of records such that the scaled records provide accurate, efficient and consistent estimates of "true" structural responses. Based on elastic-perfectly plastic and bilinear single-degree-of-freedom systems, the ASCE/SEI 7 scaling procedure is applied to 480 sets of ground motions; the number of records in these sets varies from three to ten. As compared to benchmark (that is, "true") responses from unscaled records using a larger catalog of ground motions, it is demonstrated that the ASCE/SEI 7 scaling procedure is overly conservative if less than seven ground motions are employed. Utilizing seven or more randomly selected records provides more accurate estimate of the EDPs accompanied by reduced record-to-record variability of the responses. Selecting records based on their spectral shape and design spectral acceleration increases the accuracy and efficiency of the procedure.

Keywords: ground motions records, scaling, nonlinear response history analysis

El presente artículo hace parte de las memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, organizado por la Universidad EAFIT, la Asociación de Ingenieros Estructurales de Antioquia y la Asociación de Colombiana de Ingeniería Sísmica. Medellín, 25 al 27 de mayo de 2011.

[1] Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, jureyes@uniandes.edu.co
[2] U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA 94025, ekalkan@usgs.gov

INTRODUCCION

Cuando un análisis dinámico no-lineal (RHA, del inglés response history analysis) es requerido para la verificación del diseño de estructuras de edificios, el International Building Code (2006) y California Building Code (2007) se refieren a la ASCE/SEI 7 sección 16-2 (ASCE, 2005, 2010). De acuerdo con estos documentos, los registros sísmicos deben ser seleccionados de eventos de magnitudes, distancia de falla y mecanismo focales consistentes con el máximo sismo considerado. Para el análisis en dos dimensiones de edificios simétricos en planta, el ASCE/SEI 7 requiere que los registros se escalen de tal manera que el espectro de pseudo-aceleración propromedio del set de registros no sea menor que el espectro de diseño para periodos entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$ (donde T_n es el periodo de vibración fundamental de la estructura). Para análisis en tres dimensiones, los registros sísmicos deben consistir en dos componentes horizontales de movimiento sísmico. Para cada par de componentes horizontales, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros debe ser obtenida (este espectro se denominará espectro SRSS). Cada par de registros es escalado con el mismo factor, de tal manera que el propromedio de los espectro SRSS para todos los pares de componentes horizontales en el set, no sea menor que el espectro de diseño en el rango de periodos desde $0.20T_n$ a $1.5T_n$. El valor de diseño parámetro de demanda (EDP)–fuerzas en los miembros, deformaciones de un miembro o derivas de piso–se toma como el valor propromedio de EDPs (EDPs, del ingles Engineering Demand Parameters) cuando más de siete registros son usados o como el máximo si se usan menos de siete registros. Este procedimiento requiere mínimo tres registros. El número de registros en la ASCE/SEI 7 está basado más en experiencia ingenieril que en una evaluación rigurosa (comunicación personal con Charlie Kircher). Este estudio, por primera vez, evalúa estadísticamente el número requerido de registros para el ASCE/SEI 7 de tal manera que los registros escalados proporcionen una estimación precisa, eficiente y consistente de la "verdadera" mediana de las respuestas estructurales. El adjetivo "eficiente" se refiere a la variabilidad de las respuestas de registro a registro (es decir, intra-set), y el adjetivo "consistente" se refiere a la variabilidad de las respuestas de set a set (es decir, inter-set). Pequeños valores de dispersión inter e intra-set indican que el procedimiento de escalamiento es eficiente y consistente. Basado en sistemas elasto-plásticos y bilineales de un grado de libertad (SDF, del inglés single-degree-of-freedom), la precisión, eficiencia y consistencia del procedimiento de escalamiento de registros del ASCE/SEI 7 es evaluada mediante la aplicación de 100 sets de movimientos sísmicos. Estos sets tienen un número de registros que varía desde tres a diez. Los sets escalados fueron seleccionados de tres formas diferentes: (i) aleatoriamente; (ii) minimizando la discrepancia entre el espectro escalado de un registro y el espectro objetivo para el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$ (este enfoque será referido como el "Best1"); (iii) minimizando la discrepancia entre el espectro escalado de un registro y el espectro objetivo para el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$, y luego identificando el set final de registros como aquel con valores de pseudo-aceleración espectral a T_n cercanos al espectro de diseño (este enfoque será referido como el "Best2").

SELECION DE LOS MOVIMIENTOS SISMICOS

Los treinta registros sísmicos seleccionados para esta investigación (listados en la Tabla 1) fueron tomados de siete sismos superficiales compatibles con el siguiente escenario:

- Magnitud de momento: $M_w = 6.7 \pm 0.2$
- Distancia Joyner-Boore: $R_{JB} = 25 \pm 5\ km$
- Tipo de suelo NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program): C y D
- Máximo periodo usable $\geq 4\ s$

En la Figura 1 se presenta la media geométrica de la respuesta espectral para la componente *x* de los movimientos sísmicos sin escalar. El espectro obtenido es tomado como el espectro de diseño (es decir, espectro objetivo) para propósitos de esta investigación.

Tabla 1. Registros seleccionados (NEHRP: National Earthquake Hazard Reduction Program; AS: after shock)

Record Sequence Number	Earthquake Name	Year	Station Name	Earthquake Magnitude (M_w)	Joyner-Boore Distance (km)	NEHRP Site Class	Highest Usable Period (sec.)
1	San Fernando, Calif.	1971	LA - Hollywood Stor FF	6.6	22.8	D	4
2	San Fernando, Calif.	1971	Santa Felita Dam (Outlet)	6.6	24.7	C	8
3	Imperial Valley (AS), Calif.	1979	Calipatria Fire Station	6.5	23.2	D	8
4	Imperial Valley (AS), Calif.	1979	Delta	6.5	22.0	D	16
5	Imperial Valley (AS), Calif.	1979	El Centro Array #1	6.5	19.8	D	8
6	Imperial Valley (AS), Calif.	1979	El Centro Array #13	6.5	22.0	D	4
7	Imperial Valley (AS), Calif.	1979	Superstition Mtn Camera	6.5	24.6	C	8
8	Irpinia, Italy	1980	Brienza	6.9	22.5	C	4
9	Superstition Hills (AS), Calif.	1987	Wildlife Liquef. Array	6.5	23.9	D	8
10	Loma Prieta, Calif.	1989	Agnews State Hospital	6.9	24.3	D	4
11	Loma Prieta, Calif.	1989	Anderson Dam (Downstream)	6.9	19.9	C	4
12	Loma Prieta, Calif.	1989	Anderson Dam (L Abut)	6.9	19.9	C	8
13	Loma Prieta, Calif.	1989	Coyote Lake Dam (Downst)	6.9	20.4	D	8
14	Loma Prieta, Calif.	1989	Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.9	20.0	C	8
15	Loma Prieta, Calif.	1989	Gilroy Array #7	6.9	22.4	D	4
16	Loma Prieta, Calif.	1989	Hollister - SAGO Vault	6.9	29.5	C	8
17	Northridge, Calif.	1994	Castaic - Old Ridge Route	6.7	20.1	C	8
18	Northridge, Calif.	1994	Glendale - Las Palmas	6.7	21.6	C	6
19	Northridge, Calif.	1994	LA - Baldwin Hills	6.7	23.5	D	6
20	Northridge, Calif.	1994	LA - Centinela St	6.7	20.4	D	4
21	Northridge, Calif.	1994	LA - Cypress Ave	6.7	29.0	C	4
22	Northridge, Calif.	1994	LA - Fletcher Dr	6.7	25.7	C	5
23	Northridge, Calif.	1994	LA - N Westmoreland	6.7	23.4	D	4
24	Northridge, Calif.	1994	LA - Pico & Sentous	6.7	27.8	D	5
25	Kobe, Japan	1995	Abeno	6.9	24.9	D	16
26	Kobe, Japan	1995	Kakogawa	6.9	22.5	D	8
27	Kobe, Japan	1995	Morigawachi	6.9	24.8	D	10
28	Kobe, Japan	1995	OSAJ	6.9	21.4	D	16
29	Kobe, Japan	1995	Sakai	6.9	28.1	D	8
30	Kobe, Japan	1995	Yae	6.9	27.8	D	16

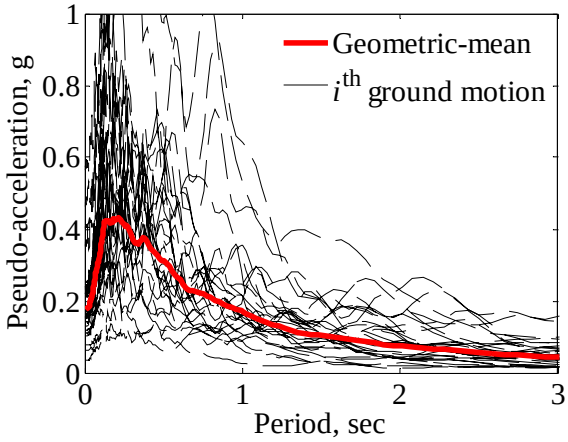

Figura 1. Respuesta espectral de treinta registros sísmicos y su media geométrica (espectro objetivo) para un amortiguamiento del 5 por ciento.

DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS INELASTICOS

Se consideraron 16 sistemas SDF con periodos de vibración T_n iguales a 0.2, 0.5, 1.0 y 2.5 s, y factores de reducción de resistencia a la fluencia *R* iguales a 1, 2, 4 y 8. El cortante basal de diseño se determinó como la masa del sistema (1 kip-sec^2/in) multiplicada por la media geométrica de la pseudo-aceleración a T_n reducida por R. La relación de amortiguamiento para los sistemas SDF seleccionados es 5 por ciento.

Se usaron dos modelos constitutivos para los sistemas inelásticos: (1) un modelo elasto-plástico, y (2) un modelo bilineal con un endurecimiento del 10 por ciento.

METODOLOGIA

De acuerdo con la ASCE/SEI 7 para análisis en dos dimensiones (o planar) de estructuras "regulares", los movimientos sísmicos deben ser escalados de tal manera que el valor propromedio de la respuesta espectral para el set de registros no sea menor que el espectro de diseño para un rango de periodos entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$. El procedimiento de escalamiento del ASCE/SEI 7 no asegura un único factor de escalamiento para cada registro; obviamente, varias combinaciones de factores de escalamiento pueden ser definidos para asegurar que el espectro promedio de los registros escalados permanezca por encima del espectro objetivo en el rango de periodo especificado. Para alcanzar el objetivo deseable de escalamiento de cada registro con un factor cercano a la unidad, hemos implementado el procedimiento del ASCE/SEI 7 para registros seleccionados aleatoriamente de la siguiente manera:

1. Para cada uno de los treinta registros listados en la Tabla 1, se calcula la respuesta espectral *A(T)* para un amortiguamiento del 5 por ciento y el vector **A** de valores espectrales para 300 periodos *T* espaciados logarítmicamente para el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$.

2. Se obtiene un espectro de pseudo-aceleración objetivo $\widehat{A}\,(T)$ como la media geométrica espectral de los treinta registros. $\widehat{\boldsymbol{A}}$ se define como un vector de valores espectrales máximos $\hat{A}_i$ a periodos *T* en el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$.

3. Se calcula el factor de escalamiento SF_1 para minimizar la diferencia entre el espectro objetivo $\widehat{A}\,(T)$ (Step 2) y el espectro de respuesta *A(T)* (Step 1) por solución del siguiente problema de minimización para cada movimiento sísmico:

   $$min_{SF_1}\left\|\log\left(\hat{A}\right) - \log\left(SF_1 \times A\right)\right\| \rightarrow SF_1$$

   Donde $\|.\|$ es la norma Euclidiana. Se requiere para este propósito un método numérico que minimice las funciones escalares de una variable; estos métodos están disponibles en los libros de texto sobre optimización numérica (por ejemplo, Nocedal and Stephen, 2006). Esta minimización asegura que cada espectro de respuesta escalado este muy cerca del espectro objetivo, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.

4. Aleatoriamente se selecciona un set de *m* movimientos sísmicos para ser utilizados en el análisis dinámico no-lineal de los sistemas descritos previamente. No más de dos registros de un mismo evento deben estar incluidos en el mismo set, de modo que no hayan eventos dominantes.

5. Se determina el vector $\hat{A}_{escalado}$ para el espectro promedio escalado definido como el promedio de los espectros escalados $SF_1 \times A$ del set de *m* registros. Las ordenadas del espectro escalado pueden ser más pequeñas que las ordenadas del espectro objetivo en los mismos periodos.

6. Se calcula la máxima diferencia normalizada ε_{ASCE} (Figura 3a) entre el espectro objetivo $\widehat{\boldsymbol{A}}$ y la espectro promedio escalado $\hat{A}_{escalado}$ en un rango de periodos entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$; esto es, $\epsilon_{ASCE} = max_{0.2T_n \leq T_i \leq 1.5T_n}\left(\hat{A}_i - \hat{A}_{escalado,i}\right) \div \hat{A}_i$, donde $\hat{A}_i$ y $\hat{A}_{escalado,i}$ son las ordenadas del espectro de pseudo-aceleración objetivo y el espectro promedio escalado para un periodo T_i, respectivamente. Se define el factor de escala $SF_2 = (1 - \epsilon_{ASCE})^{-1}$.

7. Se determina el factor de escala final $SF = SF_1 \times SF_2$ para cada movimiento sísmico. Escalando los movimientos sísmicos por el factor de escala *SF* se asegura que el valor promedio de la respuesta espectral del set de movimientos seleccionados no es menor que el espectro objetivo para periodos en el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$ (Figura 3b).

Para seleccionar los movimientos sísmicos utilizando el enfoque "Best1", donde la discrepancia entre el espectro escalado de un registro y el espectro objetivo en el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$ es minimizado, se modifica el paso 4 como se indica a continuación:

4. Se ordenan los registros escalados con base en el valor de $\left\|\log(\hat{A}) - \log(SF_1 \times A)\right\|$; el registro con el menor valor es clasificado como el mejor. De la lista de clasificados, se selecciona un set de *m* registros para ser utilizado en el análisis dinámico no-lineal de los sistemas estructurales descriptos previamente.

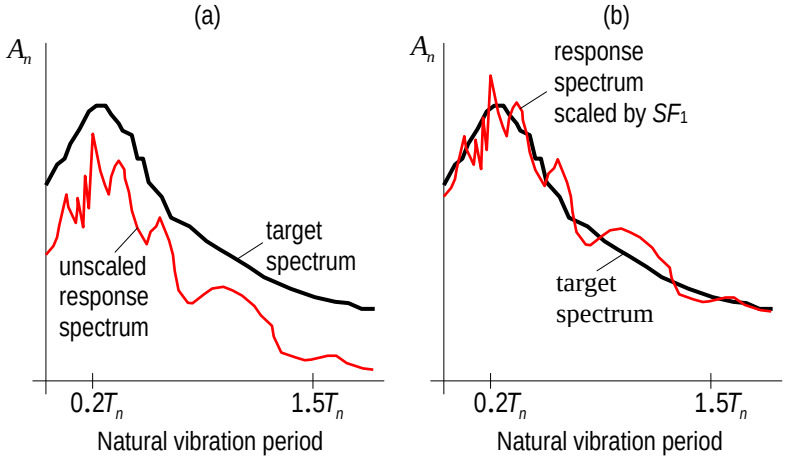

Figura 2. Ilustración esquemática del paso 3 de la metodología de evaluación.

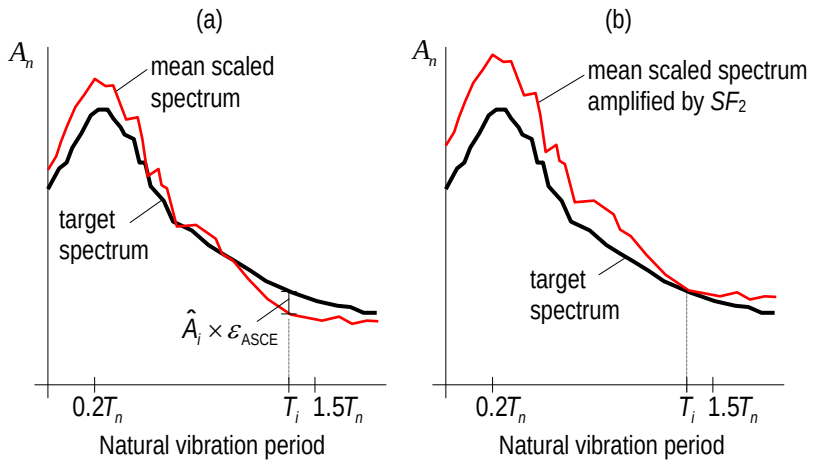

Figura 3. Ilustración esquemática del paso 6 de la metodología de evaluación.

La selección de los movimientos sísmicos usando el enfoque "Best2" requiere que los pasos 4-7 sean implementados iterativamente hasta que los errores, definidos como $\left\|\hat{A} - SF_1 \times A\right\|$ y $\left|\hat{A}(T_n) - SF_1 \times A(T_n)\right|$, sean minimizados. Al final de los pasos 1 a 7, factores de escalamiento para sets de *m* movimientos sísmicos se han determinado. Entonces, un análisis dinámico no-lineal es llevado a cabo para obtener los valores finales de la demanda sísmica (EDP). Si mínimo siete movimientos sísmicos son analizados $(m \geq 7)$, los valores de diseño de EDPs son tomados como la media o mediana de los EDPs de todos los movimientos sísmicos utilizados. Si menos de siete movimientos sísmicos son analizados, los valores de diseño de los EDPS son tomados como el máximo de los valores de los EDPs.

DEFORMACIONES INELASTICAS "VERDADERAS" (BENCHMARK)

Los valores "verdaderos" de las deformaciones inelásticas *(D_n)* fueron determinados conduciendo un análisis dinámico no-lineal de los sistemas SDF descriptos previamente sujetos a cada uno de los 30 movimientos sísmicos sin escalar, y calculado el valor de la mediana y la media del conjunto de datos.

Como es mencionado en Hancock et al. (2008), los modelos empíricos de movimiento sísmico que son utilizados para obtener el espectro objetivo asumen movimientos sísmicos con una distribución log-normal; por lo tanto el uso de la mediana de la respuesta espectral de los registros es más consistente con la especificación del espectro objetivo. Similarmente, es común asumir que los EDPs tienen una distribución log-normal (Cornell et al, 2002); por esta razón, es más apropiado representar la "media" de la respuesta estructural por la mediana; una conclusión que es ampliamente aceptada. Sin embargo, la ASCE/SEI 7 utiliza valores medios de EDPs si al menos siete movimientos sísmicos son analizados. Nosotros decidimos usar ambos, la mediana y la media de las deformaciones inelásticas como valores de referencia. En todos los casos, la media es mayor que la mediana de las deformaciones inelásticas, indicando que la distribución de D_n tiene un sesgo positivo. Las diferencias porcentuales entre las dos están entre los rangos de 15% a 63%, 23% a 39%, 38% a 48%, y 42% a 63% para sistemas elasto-plásticos con *R* igual a 1, 2, 4 y 8, respectivamente. Para sistemas bi-lineales las diferencias porcentuales están entre el 11% a 26%, 12% a 32%, 20% a 45%, y 27% a 56% para los mismos valores de *R*. Note que la diferencia entre la media y la mediana crece con el aumento del valor de *R*.

EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO ASCE/SEI 7 PARA MENOS DE SIETE REGISTROS SISMICOS

El procedimiento de escalamiento ASCE/SEI 7 fue implementado para los 16 sistemas inelásticos, descritos previamente, sujetos a una componente de movimiento sísmico (Tabla 1). La precisión del procedimiento ASCE/SEI 7 fue evaluada comparando el valor máximo de deformación inelástica D_n debida a siete sets de 3 a 6 registros contra los valores "exactos", definidos como la media de D_n debido a los 30 movimientos sísmicos sin escalar. Estas comparaciones son mostradas en la Figura 4 para sistemas elasto-plásticos con T_n=0.2, 0.5, 1.0 y 2.5 s, y R=1, 2, 4 y 8; los sets de 3, 4, 5 y 6 registros son referidos como G3, G4, G5 y G6, respectivamente. Siete sets de registros fueron considerados en cada uno de estos grupos. Los cinco primeros sets de registros fueron seleccionados aleatoriamente de un total de 30 registros, y los dos sets restantes corresponden a los sets "Best1" y "Best2". Para cada T_n, R y modelo constitutivo, un total de 30 sets de registros son utilizados. Figuras similares son presentadas en Reyes y Kalkan (2011) para sistemas bi-lineales. Las Figura 4 permite las siguientes observaciones: (1) Incrementando el número de registros de 3 a 6 se obtiene un efecto mínimo en la precisión del procedimiento; las sobre-estimaciones varían 1 a 1500 por ciento y de 35 a 820 por ciento para los grupos G3 y G6, respectivamente. (2) La precisión del procedimiento decrece cuando el valor de R aumenta y el periodo disminuye; el error máximo aumenta de 250 a 1060 y de 620 a 1500 por ciento si R cambia de 1 a 8, y T_n cambia de 2.5 a 0.2 s, respectivamente. (3) El mejoramiento obtenido por el uso de los sets "Best1" y "Best2" es marginal. Para R igual a 8, los errores están en el rango de 10 a 190 por ciento y desde 0.2 a 1130 por ciento para los sets Best1 y Best2, respectivamente. Para sistemas bi-lineales, los errores son mucho más pequeños que para los sistemas elásto-plásticos (Reyes y Kalkan, 2011). Los resultados "exactos" mostrados en la Figura 4 están basados en el valor de la media de deformación; conclusiones similares a las presentadas aquí se obtienen si el procedimiento ASCE/SEI 7 se compara con valores "exactos" obtenidos como la mediana de los valores de deformación inelástica (Reyes y Kalkan, 2011).

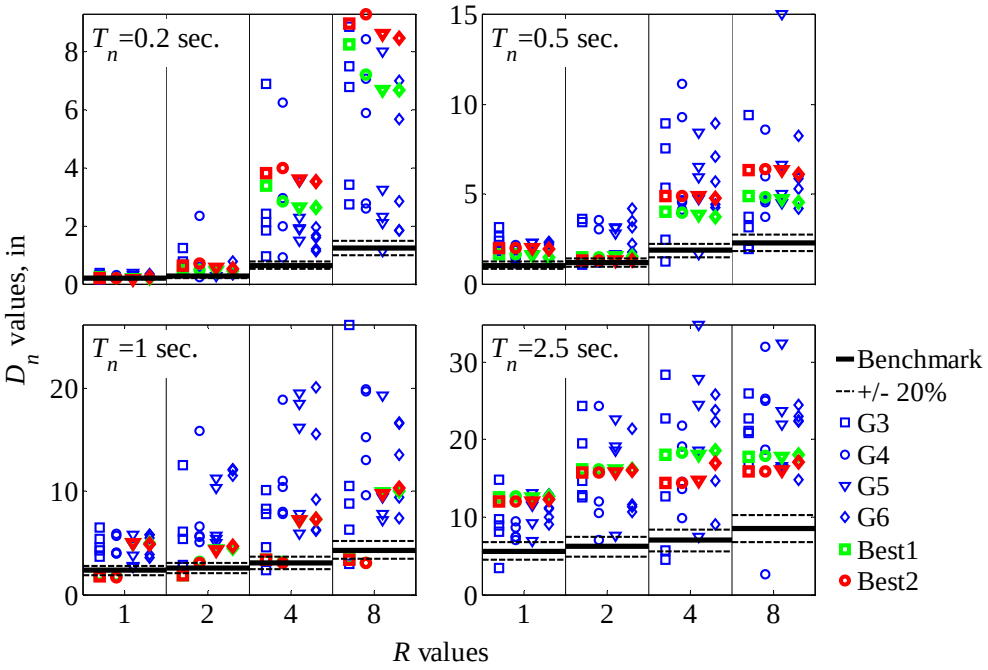

Figura 4. Valores de deformación inelástica obtenidos con el procedimiento ASCE/SEI 7 comparados contra los valores "exactos" (benchmark).

Es evidente que el procedimiento de escalamiento del ASCE/SEI 7 no es preciso y es muy conservador, especialmente para sistemas elasto-plásticos. El mejoramiento obtenido por el uso de los sets “Best1” y “Best2” es insignificante.

Las Figuras 5 y 6 muestran valores de dispersión intra- e inter-set para evaluar la eficiencia y consistencia del procedimiento ASCE/SEI 7. Distribución log-normal de los valores de D_n fue asumida en estos cálculos. Como se muestra en la Figura 5, la dispersión intra-set se incrementa si se incrementa el periodo estructural, implicando que el procedimiento se vuelve menos eficiente. Similarmente, la dispersión inter-set se incrementa si se incrementa el valor de R, indicando que el procedimiento se vuelve menos consistente. Note que la dispersión inter-set tiende a decrecer si se incrementa el número de registros por set. De acuerdo con estos resultados, el procedimiento ASCE/SEI 7 no reúne los requisitos de precisión, eficiencia y consistencia en la estimación de deformaciones inelásticas si menos de siete registros son utilizados.

EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO ASCE/SEI 7 PARA SIETE O MAS REGISTROS SISMICOS

La precisión del procedimiento ASCE/SEI 7 fue evaluada comparando el valor promedio de deformación inelástica D_n debida a siete sets de 7 a 10 registros contra los valores “exactos”, definidos como la media de D_n debido a los 30 movimientos sísmicos sin escalar. Estas comparaciones son mostradas en la Figura 7 para sistemas elasto-plásticos con T_n=0.2, 0.5, 1.0 y 2.5 s, y R=1, 2, 4 y 8; los sets de 7, 8, 9 y 10 registros son referidos como G7, G8, G9 y G10, respectivamente. Comparando la Figura 7 con la Figura 4 es obvio que el procedimiento ASCE/SEI 7 utilizando siete o mas registros proporciona estimativos más exactos de deformaciones inelásticas. Sin embargo, las sobre-estimaciones son generalmente mayores al 20%, especialmente para R=4 y 8.

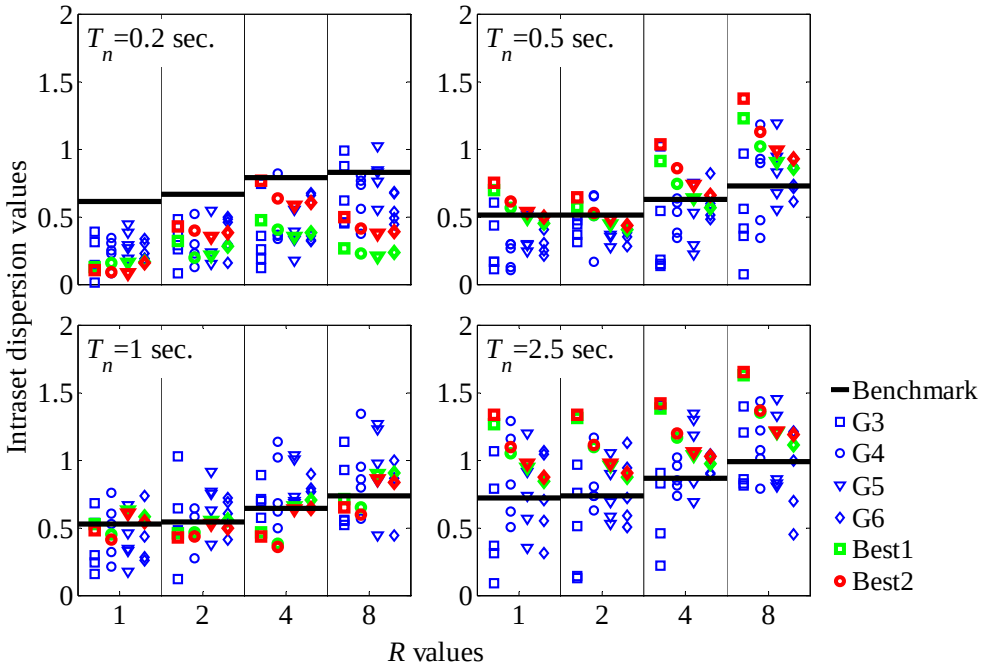

Figura 5. Valores de dispersión intra-set obtenidos con el procedimiento ASCE/SEI 7 comparados contra los valores de dispersión en las demandas “exactas” (benchmark).

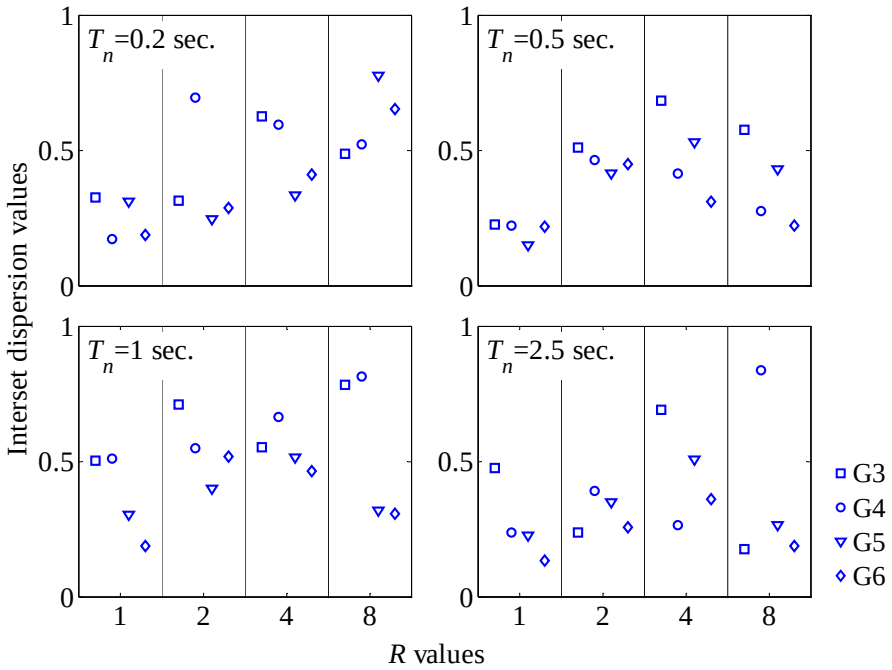

Figura 6. Valores de dispersión inter-set obtenidos con el procedimiento ASCE/SEI 7.

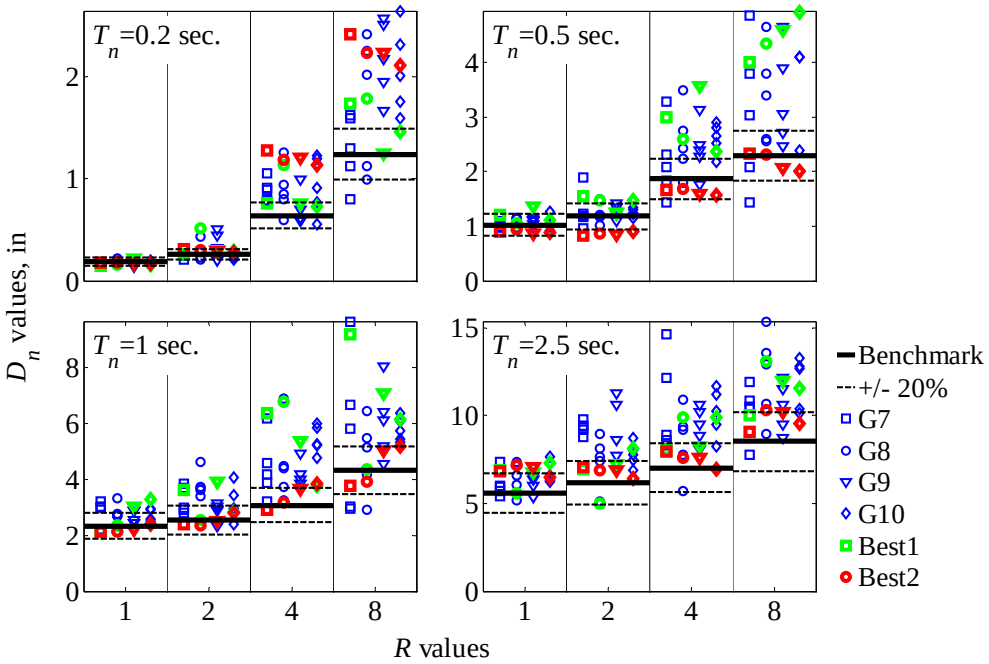

Figura 7. Valores de deformación inelástica obtenidos con el procedimiento ASCE/SEI 7 comparados contra los valores "exactos" (benchmark).

La Figura 7 permite las siguientes observaciones: (1) incrementar el número de registros de 7 a 10 tiene un efecto menor en la precisión del procedimiento; las sobre-estimaciones varían de 0.5% a 140% y de 0.6% a 124% para los grupos G7 y G10, respectivamente. (2) La precisión del procedimiento decrece si el valor de *R* se incrementa; el máximo error se incrementa de 56% a 140% si *R* cambia de 1 a 8. (3) El periodo fundamental T_n no tiene un efecto significativo en la

precisión del procedimiento si los registros son seleccionados aleatoriamente. El máximo error es 140% y 134% para T_n=0.2 y 2.5 seg, respectivamente.

Para sistemas con T_n≥0.5 seg o con valores pequeños de R, el set "Best2" es mucho más preciso que el set "Best1" demostrando que la consideración de forma espectral y $A(T_n)$ en la selección de registros conduce a mejoras en la estimación de deformaciones inelásticas. Para T_n=2.50 seg, el error del procedimiento varía de 9% a 60% y de 3% a 30% para los sets "Best1" y "Best2", respectivamente. Para sistemas con periodos muy cortos (T_n=0.20 seg) y grandes valores de R, ambos sets ("Best1" y "Best2") conducen a estimativos imprecisos de deformaciones inelásticas; las sobre-estimaciones pueden exceder el 100%. Esto es debido a la alta variabilidad del espectro y las grandes discrepancias entre el espectro elástico e inelástico para periodos en la región sensible a la aceleración y sistemas con valores altos de R.

Los valores de dispersión intra- e inter-set mostrados en las Figuras 8 y 9 asumen una distribución lognormal de los valores de D_n. La dispersión intra-set se incrementa cuando el periodo aumenta, indicando alta variabilidad en los valores de la respuesta dentro de un set. Similarmente, la dispersión inter-set aumenta cuando los valores de R aumentan, esto significa que para grandes deformaciones inelásticas la variabilidad set-a-set es mayor. Como se esperaba, la dispersión inter-set tiende a disminuir con un número mayor de registros por set. Comparando las Figuras 6 y 9, es evidente que utilizando siete o más registros seleccionados aleatoriamente en el ASCE/SEI 7, la dispersión inter-set se reduce significativamente; la reducción es mayor para sistemas perfectamente elástico-plásticos. La reducción en la variabilidad inter-set indica la consistencia en las estimaciones del procedimiento ASCE/SEI 7 usando diferentes sets. Para sistemas con periodo fundamental en la región sensible de velocidad o desplazamiento, la precisión, eficiencia y consistencia solo se logran si los registros son seleccionados con base en su forma espectral y $A(T_n)$. Resultados para sistemas bilineales son presentados en Reyes y Kalkan, 2011.

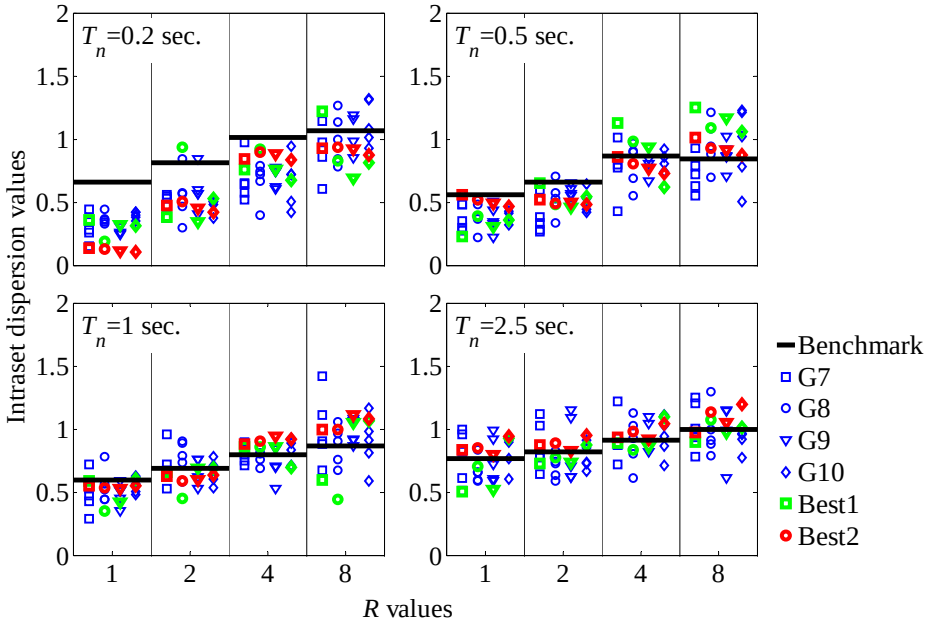

Figura 8. Valores de dispersión intra-set obtenidos con el procedimiento ASCE/SEI 7 comparados contra los valores de dispersión en las demandas "exactas" (benchmark).

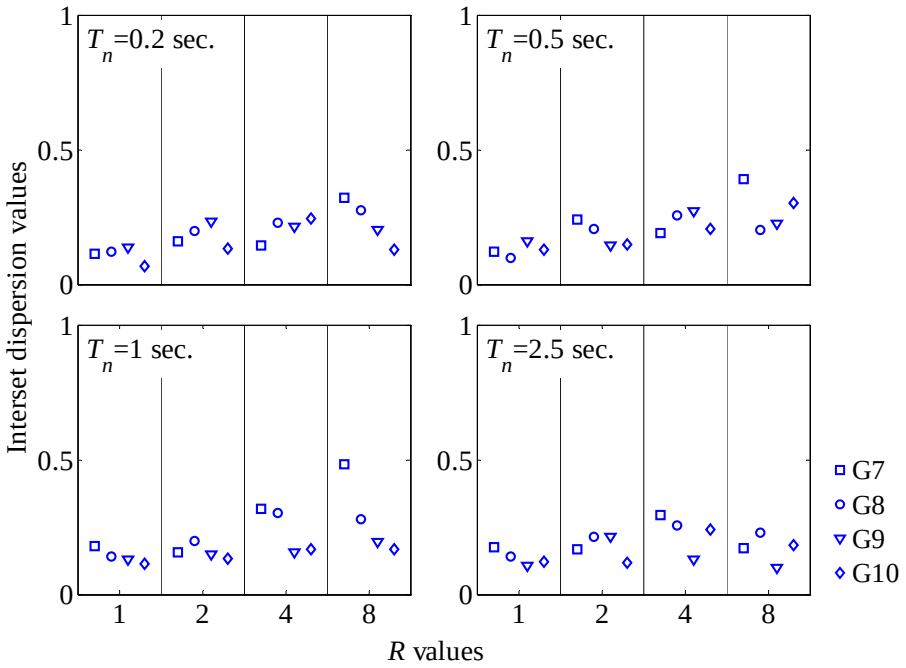

Figura 9. Valores de dispersión inter-set obtenidos con el procedimiento ASCE/SEI 7.

PROCEDIMIENTO DE ESCALAMIENTO BASADO EN ANÁLISIS DE PUSHOVER CON MÚLTIPLES MODOS: UNA ALTERNATIVA AL PROCEDIMIENTO DE ESCALAMIENTO ASCE/SEI 7

Debido a que el método de escalamiento ASCE/SEI para registros sísmicos no considera explícitamente el comportamiento inelástico de la estructura, este procedimiento puede no ser apropiado para estructuras con periodos cortos o localizadas en sitios cercanos a las fallas, ya que en estos casos las deformaciones inelásticas pueden ser significativamente más grandes que las deformaciones elásticas. En estos casos métodos de escalamiento basados en espectros de deformación inelástica son más apropiados (Luco y Cornell, 2007; Tothong y Cornell, 2008; PEER, 2009). Kalkan y Chopra (2011) usaron estos conceptos para desarrollar un procedimiento de escalamiento basado en análisis pushover modal (MPS). Este procedimiento explícitamente considera la resistencia estructural y determina factores de escala para cada registro, de tal forma que se obtenga un valor objetivo de deformación inelástica. Si el procedimiento MPS fuera aplicado a las estructuras de esta investigación, los errores en la estimación de las deformaciones inelásticas y las dispersiones inter- e intra-set serían nulos. Por lo tanto el procedimiento MPS para sistemas SDF sería absolutamente preciso, eficiente y consistente.

CONCLUSIONES

1. El procedimiento de escalamiento ASCE/SEI 7 no asegura un factor de escalamiento único para cada registro; varias combinaciones de factores de escala pueden ser definidos para asegurar que el espectro promedio de los registros escalados este por encima del espectro de diseño. Usando el procedimiento descripto en este artículo se puede corregir esta debilidad.

2. El procedimiento ASCE/SEI 7 es demasiado conservador, ineficiente e inconsistente si se usan menos de siete registros.

3. El procedimiento ASCE/SEI 7 proporciona valores más precisos si se usan siete o más registros. Sin embargo, los errores son, generalmente, mayores al 20%. Si se incrementa el número de registros de siete a diez, el efecto en la exactitud del procedimiento es menor.

4. Si la selección de registros sísmicos se basa en su forma espectral y en la pseudo-aceleración de diseño, aumenta la precisión y eficiencia del procedimiento ASCE/SEI 7.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O. and Foutch, D. A., (2002) "Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines", Journal Structural Engineering ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 526–533.

- Hancock, J., Bommer, J. and Stafford, J., (2008) "Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 37, pp. 1585-1607.

- Kalkan, E. and Chopra, A. K., (2011) "Modal-Pushover-based Ground Motion Scaling Procedure", Journal Structural Engineering ASCE (In press).

- Luco, N. and Cornell, A. C., (2007) "Structure-Specific Scalar Intensity Measures for Near-Source and Ordinary Earthquake Ground Motions", Earthquake Spectra, Vol. 23, No. 2, pp. 357–392.

- Nocedal, J. and Stephen J. W., (2006) "Numerical Optimization," 2nd ed., Springer Series in Operations Research, Springer, USA.

- PEER Ground Motion Selection and Modification Working Group, (2009) "Evaluation of Ground Motion Selection and Modification Methods: Predicting Median Interstory Drift Response of Buildings", Haselton, C. B. (editor). PEER Report 2009/01, University of California, Berkeley, CA.

- Reyes, J. C., and Kalkan, E., (2011) "Required Number of Ground Motion Records for ASCE/SEI 7 Ground Motion Scaling Procedure: U.S. Geological Survey", Open-File Report 2011-1, pp. 34.

- Tothong, P. and Cornell, A. C., (2008) "Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 37, No. 7, pp. 1013-1037.