

DISEÑO SÍSMICO BASADO EN ENERGÍA. POTENCIA DE LA ENERGÍA DE ENTRADA

Frau, Carlos D; Panella, Dante S.
Ingenieros
Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional.
cdfrau@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

En el diseño sísmico basado en energía (EBSD), el efecto del movimiento del suelo es considerado como una energía que ingresa a la estructura (EI). Los espectros de energía son la herramienta para evaluar la energía que ingresa a una estructura cuando es alcanzada por un terremoto. Por otro lado, es sabido que los registros sísmicos de falla cercana (near-fault) se caracterizan por contener pulsos de velocidad y desplazamientos de gran amplitud y largo período que los distinguen claramente de los registros de campo lejano (far-field). Los autores en trabajos anteriores han definido dos nuevos parámetros que evalúan la potencia con que la energía ingresa a la estructura. Basado en estos indicadores se presenta en este trabajo parámetros de potencia para registros impulsivos y no impulsivos.

ABSTRACT

In energy based seismic design (EBSD) approach, effect of ground motions is considered as an energy input to structures (EI). The usage of energy spectra is an effective tool in energy based seismic design (EBSD) methods, such as the use of design acceleration spectra in force-based and displacement-based methods. On the other side, near-fault seismic ground motions are frequently characterised by intense velocity and displacement pulses of relatively long periods that clearly distinguish them from typical far-field ground motions. Based on new indicators previously defined called "Input Energy Power" (IEP) and "Energy Spectral Intensity" (ESI) a comparison between ground motions pulse-like and vibratory-like is established.

Organiza:

1. Introducción

En los métodos basados en energía, el efecto sísmico es considerado como un aporte de energía a la estructura y este aporte de energía expresa la demanda total de energía del terremoto. Para considerar una estructura segura, se debe considerar un equilibrio entre la capacidad de disipación de energía y la demanda de energía sísmica. Así, una cuestión importante en el diseño sísmico basado en energía es determinar la energía sísmica de entrada a la estructura. El concepto de energía en el diseño sísmico de estructuras ha sido ampliamente estudiado durante medio siglo y los métodos basados en energía siempre se han considerado más racionales y confiables para el diseño y evaluación de estructuras bajo efectos sísmicos en comparación con los métodos convencionales basados en fuerzas y métodos basados en desplazamiento (Uang y Bertero, 1990; Akbas y Shen, 2003).

Las primeras ideas sobre el diseño sismorresistente basado en energía fueron propuestas por Housner (1956), quien estudió el input de energía sísmica a las estructuras utilizando los espectros elásticos de velocidad. Los parámetros de diseño basados en energía se definieron por primera vez en su investigación, y estos formaron la base para el diseño basado en energía resistente a terremotos. Otros investigadores también hicieron aportes previos sobre el concepto de input de energía y consideraron la energía de entrada como una herramienta eficaz en el diseño sismorresistente (Uang y Bertero, 1990; Fajfar y Fischinger, 1990; Manfredi, 2001). Previamente, Zahrah y Hall (1984), Aki-yama (1985), Kuwamura y Galambos (1989); Fajfar et al (1989) realizaron estudios pioneros como el de Housner sobre conceptos de energía sísmica y propusieron ecuaciones analíticas y empíricas útiles para la energía sísmica de entrada.

Por otro lado, se sabe que las regiones cercanas a la falla están expuestas a efectos de directividad de la ruptura. Cuando la ruptura de una falla sísmica avanza en dirección a un sitio determinado, la velocidad de ruptura es similar a la velocidad de propagación de la onda de corte produciendo la acumulación de la energía sísmica liberada durante la ruptura (Somerville et al, 1997; Spudich y Chiou, 2008); esto generalmente da como resultado unos pocos pulsos de gran amplitud en la historia del tiempo de velocidad. Por lo tanto, los registros sísmicos *near-fault* se caracterizan por contener intensos pulsos de velocidad y desplazamiento de períodos relativamente largos que los distinguen claramente de los típicos movimientos de los terremotos de campo lejano (*far-field*). Báez y Miranda (2000), comprobaron que la máxima velocidad del suelo y la máxima velocidad incremental son los parámetros que más influyen en la respuesta estructural.

Los movimientos con intensos pulsos de velocidad pueden afectar negativamente el desempeño sísmico de las estructuras (Bertero et al, 1978; Chopra y Chintapakdee, 2001). Anderson y Bertero (1987) demostraron que la presencia de largos pulsos de aceleración exige una mayor resistencia de las estructuras para mantenerse en pie. Malhotra (1999) afirma que la presencia de pulsos característicos de aceleración, velocidad y desplazamiento puede generar mayores esfuerzos de corte en la base de

Organiza:

los edificios y mayores desplazamientos laterales en comparación con registros que no tienen estos pulsos; la demanda de ductilidad puede ser mucho mayor y la amortiguación adicional agregado a una estructura puede ser menos efectivo. En estructuras ubicadas en zonas cercanas a la falla, el daño es causado por unos pocos ciclos de deformación inelástica, que coinciden con pulsos de velocidad largos y de gran amplitud (Alavi y Krawlinker, 2000). Por el contrario, en sitios de fallas alejadas el daño se distribuye durante todo el tiempo del registro en muchos ciclos con menor deformación inelástica (Báez y Miranda, 2000). Se han propuesto diferentes métodos para identificar los movimientos del suelo tipo pulso; Panella et al (2017) y Frau et al (2020) desarrollaron un enfoque simple e intuitivo para clasificar y seleccionar registros para usar en el análisis estructural, el mismo es utilizado para el análisis de selección de registros en este trabajo.

En EBSD, la demanda de energía de un terremoto debe ser menor o igual a la capacidad de disipación de energía que posee la estructura; por lo tanto, es de suma importancia que la energía sísmica de entrada sea correctamente evaluada.

Basado en los conceptos expresados recientemente, surge la idea sobre el tiempo en que los movimientos del suelo entregan la energía, teniendo presente que las regiones de campo lejano y el campo cercano entregan la energía en diferentes intervalos de tiempo. Esta importante diferencia no se captura en los espectros de energía. Esto se debe a que el espectro de energía cuantifica la energía total del movimiento del suelo sin considerar el tiempo en que lo hace. Por lo tanto, es de interés investigar la cantidad y el tiempo en que ingresa la energía a la estructura.

A partir de los espectros de energía, se han propuesto tres parámetros para ponderar la intensidad de un registro acelerométrico de un sismo en término de potencia: potencia de la energía de entrada, espectro de potencia de energía de entrada e intensidad espectral de potencia (Frau et al, 2023). Estos parámetros son comparados con diferentes tipos de registro para ser evaluados respecto a registros impulsivos y no impulsivos.

2. Espectro de energía de entrada elástica

A partir de la definición fundamental de trabajo (es decir, la integral de la fuerza por el desplazamiento), la llamada ecuación de balance de energía se puede obtener fácilmente integrando la ecuación diferencial de movimiento de un sistema UGDL sujeto a un movimiento horizontal del suelo sobre el desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo:

$$\int_0^u m \ddot{u}(t) du + \int_0^u c \dot{u}(t) du + \int_0^u k u(t) du = - \int_0^u m \ddot{u}_g(t) du \quad (1)$$

Los términos en el lado izquierdo de esta ecuación identifican los diferentes componentes energéticos de la estructura: energía cinética, energía de amortiguamiento y energía de deformación recuperable (elástica), respectivamente.

Organiza:

El lado derecho de la ecuación está estrechamente asociado con el enfoque principal del presente estudio, expresa la energía de entrada total $E_I(t)$. El desplazamiento incremental du puede expresarse en términos de velocidad y diferencial tiempo; así, la integral se puede establecer en función de la duración del terremoto. En consecuencia, para un movimiento sísmico específico, la energía de entrada relativa a un sistema UGDL, así como los otros componentes de energía, se obtiene teóricamente integrando la ecuación de movimiento a lo largo del tiempo (Ec. 2); La figura 1-a muestra la evolución de la energía de entrada en función del tiempo para un caso determinado.

$$\frac{E_I}{m} = \int_0^t \ddot{u}_g(t) \dot{u}(t) dt \quad (2)$$

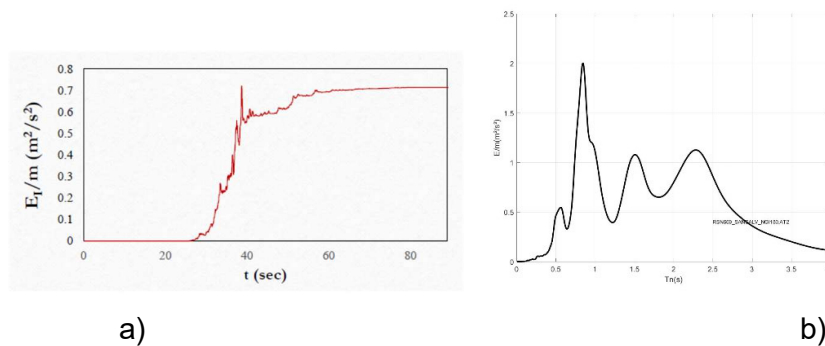


Figura 1. a) Energía de entrada en función del tiempo para un registro sísmico con período y amortiguación dados; b) Espectro de energía de entrada.

Cuando este proceso se repite para varios sistemas UGDL con diferentes períodos T_n pero la misma relación de amortiguamiento, se obtiene un conjunto de energías de entrada elástica E_I versus T_n . En síntesis, espectros de energía de entrada sísmica son los gráficos que combinan los valores máximos de energía de entrada correspondientes a diferentes períodos de vibración natural de los sistemas UGDL (Fig. 1-b).

3. Potencia de energía de entrada y espectro de Potencia de Energía de Entrada.

Considerando la energía de entrada para un período dado T_i , la potencia de energía de entrada (IEP – *Input Energy Power*) se define como la energía de entrada total dividida el tiempo que tarda la energía en ingresar (Ec. 3). Debido a que la entrega de energía es pequeña al inicio y al final de los registros (ver Fig. 1-a), para definir el IEP se considera la duración efectiva del registro. Para ello se utiliza la intensidad de Arias; donde la duración efectiva es el intervalo de tiempo entre 5% (t_i) y 95% (t_f) (Arias, 1970).

Organiza:

$$IEP = \frac{E_I/m}{(t_f - t_i)} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} \ddot{u}_g(t) \dot{u}(t) dt \quad (3)$$

Luego de calcular el *IEP* para cada período estructural (T_n), es posible construir el Espectro de Potencia de Energía de Entrada *SIEP* (T_n, ζ). Este espectro tiene en cuenta, además de la energía que entra al sistema, el tiempo en que lo hace. Hay que reconocer que es importante la cantidad total de energía que entra, pero también el tiempo en el que se debe disipar esa energía, es decir, la potencia. La Figura 2 muestra dos casos estudiados donde uno alcanza mayor energía de entrada pero el otro alcanza mayor potencia.

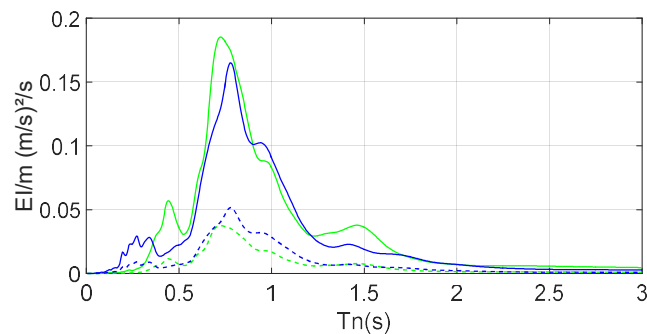


Figura 2. Espectros de energía de entrada (línea continua) y espectro de potencia de energía de entrada *SIEP*(T_n, ζ) (Línea discontinua) para dos registros: RSN569_SANSALV_NGI270(verde) y RSN451_MORGAN_CYC285(azul).

Para mostrar cómo el tiempo afecta el *IEP* en la Fig. 3 se presentan dos casos: un registro de falla de campo lejano y otro de falla de campo cercano. Es fácil ver que el tiempo en ambos casos es muy diferente. El de falla lejana entrega la energía en un tiempo prolongado (30 segundos en este caso), mientras que el registro de falla cercana lo hacen en unos pocos segundos (alrededor de 10 segundos).

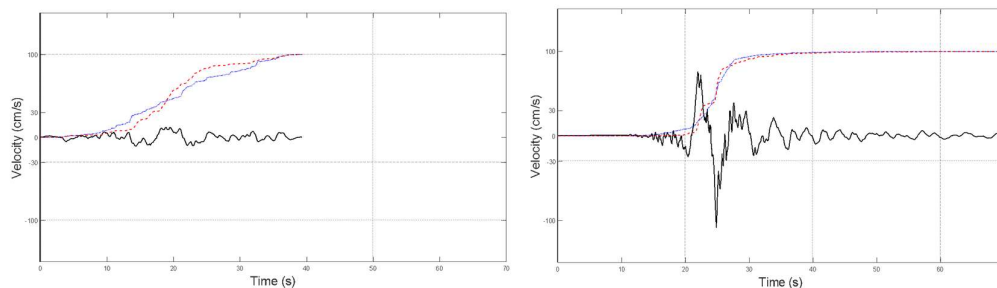


Figura 3. Historia de tiempo de velocidad (negro), Intensidad de Arias (azul) y velocidad cuadrática media (rojo) para registro de campo lejano (SN853 LANDERS FAI185, izquierdo) y registro de campos cercano (RSN6927 DARFIELD LINC23E, derecho).

Organiza:

3. Intensidad espectral de energía

Housner (1952), definió una intensidad espectral a partir del espectro de respuesta elástica de pseudovelocity, que se obtiene a partir de un registro de aceleración. La intensidad espectral de Housner se define como (Ec. 4):

$$SI(\text{Housner}) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT \quad (4)$$

Donde S_v es el espectro de respuesta elástica de pseudovelocity, T son los períodos estructurales ξ es la razón de amortiguamiento crítico y 0,1-2,5 segundos son los períodos que cubre la integral. La intensidad espectral de Housner expresa la severidad relativa de los terremotos.

Siguiendo la misma analogía, Frau et al (2023) propusieron un nuevo parámetro para evaluar la energía de entrada y su potencia: la Intensidad Espectral de Energía (ESI). Esto se define a partir del espectro de potencia de energía de entrada de acuerdo con la siguiente ecuación (Ec. 5).

$$ESI = \int_{0.1}^{2.5} S_{IEP}(T, \xi) dT \quad (5)$$

ESI cuantifica la severidad de los registros sísmicos concentrando en un valor de energía de entrada y la potencia con la que lo hace en los rangos de períodos de interés. Además, permite comparar diferentes registros entre sí; en especial cuando, en muchos casos, los espectros de energía de entrada presentan gran variación de un período a otro (ver Fig. 1-b). También captura los casos en que terremotos que entregan gran cantidad de energía pero en un largo período de tiempo resultan menos severos que otros con, quizá, menos energía pero que la entregan en muy corto tiempo.

La Fig. 4 muestra el Espectro de Energía de Entrada y el Espectro de Potencia Energía de Entrada (S_{IEP}); el área bajo la curva S_{IEP} entre 0,1 y 2,5 segundos es la intensidad espectral de energía (ESI).

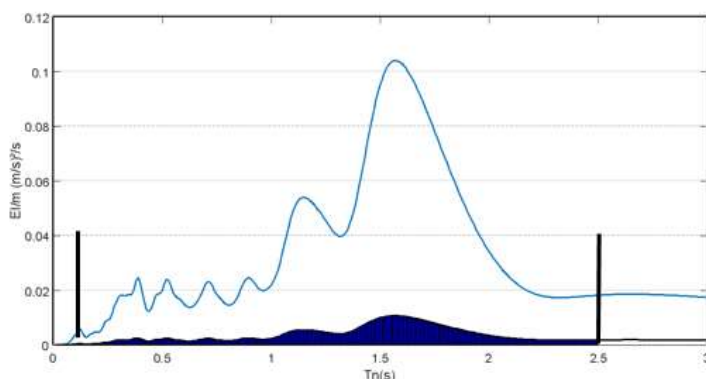


Figura 4. Espectro de energía de entrada (línea superior), Espectro de potencia de energía de entrada S_{IEP} (línea inferior) e Intensidad espectral de energía ESI (área bajo la curva según la Ec. 5).

Organiza:

4. Selección de registros

En el presente estudio, se seleccionaron dos conjuntos de 6 registros sísmicos: uno para fallas de campo lejano y otro para fallas de campo cercano; este conjunto forma parte de los analizados por Merter y Ucar (2019 y 2019a). La Tabla 1 muestra los principales parámetros sismológicos para los registros de fallas lejanas y la Tabla 2 para registros de fallas cercanas.

Record Far-Fiel	Earthquake Name	Year	Station Name	Earthquake Magnitude	Hypocenter Depth (km)	CistD (km)
RSN7_NWCALIFC_C-FRN135	Northwest Calif-02	1941	Ferndale City Hall	6,60	10	91,22
RSN22_ELALAMO_ELC270	El Alamo	1956	El Centro Array #9	6,80	16	121,7
RSN851_LANDERS_DWN090	Landers	1992	Downey - Co Maint Bldg	7,28	7	157,46
RSN856_LANDERS_EUC292	Landers	1992	Fountain Valley - Euclid	7,28	7	146,89
RSN866_LANDERS_VER180	Landers	1992	LA - E Vernon Ave	7,28	7	157,69
RSN4077_PARK2004_CHA360	Parkfield-02, CA	2004	Hollister - City Hall Annex	6,00	8,1	117,95

Tabla 1 - Parámetros de los registros fallas de campo lejano

Record Near-Fault	Earthquake Name	Year	Station Name	Earthquake Magnitude	Hypocenter Depth (km)	CistD (km)
RSN723_SUPERB_B-PTS225	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	6,54	9,0	1,0
RSN1044_NORTHNR_NWH090	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	6,69	17,5	5,9
RSN1063_NORTHNR_RRS228	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	6,69	17,5	6,5
RSN1244_CHICHI_CHY101-N	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7,62	8,0	9,9
RSN2114_DENALI_PS10-047	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #10	7,90	8,9	2,7
RSN6906_DARFIELD_GDLC35W	Darfield, New Zealand	2010	GDLC	7,00	10,9	1,2

Tabla 2 - Parámetros de los registros fallas de campo cercano

Para el conjunto de registros seleccionados, la impulsividad fue evaluada por Panella et al. (2017), los resultados se muestran en la Tabla 3. El índice I_{pr} permite clasificar un registro como tipo pulso cuando su valor es superior a 0,7; cuando este valor es inferior a 0.7 el registro es del tipo no impulsivo. En la Tabla 3 se observa que todos los registros de fallas lejanas presentan I_{pr} muy bajos, claramente no presentan impulsividad. Los registros de falla cercana son todos del tipo pulso ($I_{pr}=1.0$). El nivel de impulsividad se evalúa mediante el índice I_p . Cuando I_p es inferior a 12 el registro contiene alta impulsividad; si está entre 12 y 20 se clasifica como impulsividad moderada y con $20 < I_p \leq 40$ se clasifica como impulsividad baja. Podemos determinar que contamos con 2 registros con impulsividad alta, 4 con impulsividad moderada. La tabla 3 contiene además los picos de velocidad y aceleración; Estos parámetros también muestran la diferencia entre los registros de falla cercana y lejana.

Organiza:

NEAR-FAULT	PGA (g)	PGV (cm/s)	LdT	Ip (cm-s)	Ipr
RSN723_SUPERB_B-PTS225	0.432	134.4	1523.4	11.3	1.00
RSN1044_NORTHR_NWH090	0.583	75.8	1460.1	19.3	1.00
RSN1063_NORTHR_RRS228	0.874	148.2	1790.1	11.9	1.00
RSN1244_CHICHI_CHY101-N	0.398	109.2	2130.5	19.5	1.00
RSN2114_DENALI_PS10-047	0.333	115.7	1540.9	13.3	1.00
RSN6906_DARFIELD_GDLC35W	0.708	100.3	1869.2	18.6	1.00

FAR FIELD	PGA (g)	PGV (cm/s)	LdT	Ip (cm-s)	Ipr
RSN7_NWCALIFC_C-FRN135	0.040	3.4	181.3	53.1	0.01
RSN22_ELALAMO_ELC270	0.052	7.1	428.6	60.5	0.00
RSN851_LANDERS_DWN090	0.039	11.3	476.8	42.0	0.01
RSN856_LANDERS_EUC292	0.062	11.0	485.7	44.1	0.01
RSN866_LANDERS_VER180	0.041	16.2	352.3	21.7	0.23
RSN4077_PARK2004_CHA360	0.011	3.2	190.1	59.2	0.00

Tabla 3. Impulsividad para registros de falla cercana y lejana

5. Análisis y Resultados

Para ambos conjuntos de registros seleccionados se calcularon los espectros de energía de entrada elástica. En la Fig. 5 están representados; Fig. 5-a (izquierda) para registros de falla lejana y Fig. 5b (derecha) para registros de falla cercana (note la diferencia de escala de las ordenadas). Se observa una gran diferencia en las ordenadas de los dos tipos de conjuntos analizados. Mientras que los picos máximos en registros de fallas lejanas están entre 0,1 y 0,25 (aproximadamente) para las selecciones de fallas cercanas están entre 4, 6 y hasta 8. Estas diferencias están presentes en un ancho de banda amplio ($T_n > 0,2$ segundos).

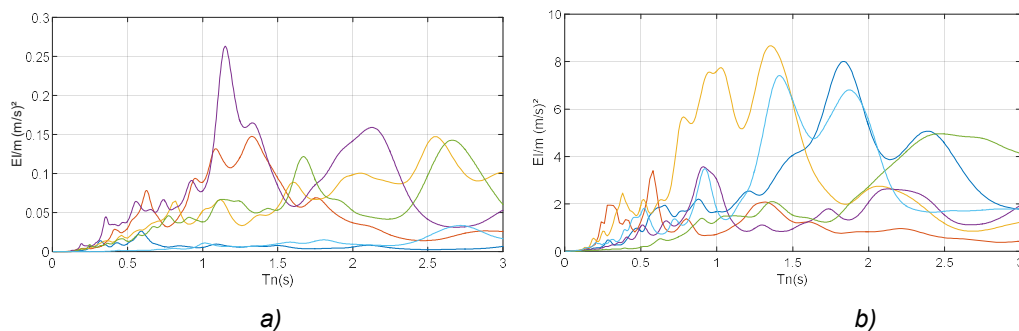


Figura 5. Espectros de energía de entrada: a) falla lejana; b) falla cercana

Cuando los picos de los espectros de energía de entrada se representan en orden creciente y luego en el mismo orden se representan también los picos de los espectros de potencia de energía de entrada, se observa que el orden no se mantiene; muchos casos tienen mayor energía pero menor potencia o viceversa. Esto significa que el concepto de potencia capta un fenómeno que no se ve en los espectros clásicos de energía de entrada, es el tiempo en que la energía entra a la estructura, es decir la potencia.

Organiza:

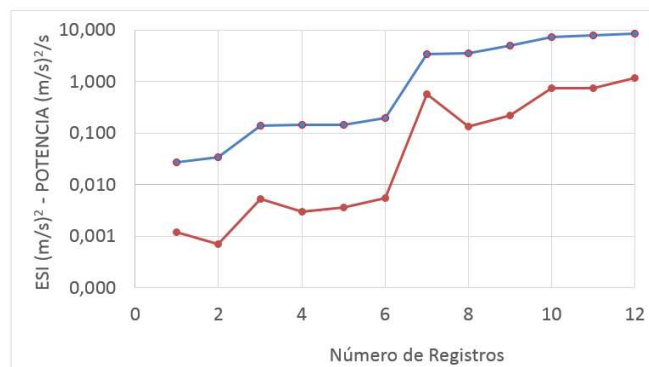


Figura 6. Picos del espectro de energía de entrada en orden creciente y picos del espectro de potencia de energía de entrada

Analizando los registros de falla cercana, se puede ver que el tiempo en el que se entrega la energía juega un papel importante. Fig. 6, en el lado derecho (número de registro ≥ 6), se representan los registros de falla cercana. Muestran una dispersión de la relación energía-potencia: el espectro de energía de entrada presenta un creciente continuo mientras que el espectro de energía de potencia tiene variación con grandes saltos de un registro a otro. Estos saltos se deben a los diferentes tiempos en la entrega de energía. Para registros de fallas lejanas las variaciones también están presentes.

4 Conclusiones

Se presentó un estudio sobre los espectros de energía de entrada de dos conjuntos de movimientos sísmicos; considerando registros de fallas de campo cercanas y lejanas.

El concepto de potencia de entrada se introdujo para revelar la importancia del tiempo que tarda la energía en ingresar a la estructura.

Muchos registro presentan una alta energía pero menor potencia; esto se observa en registros de fallas cercanas y lejanas.

Las diferencias de las amplitudes entre los registros de fallas lejanas y cercanas en la energía de entrada se amplifican cuando se evalúa la potencia. Hay que reconocer que es importante la cantidad total de energía que entra en una estructura, pero también el tiempo en el que esa energía debe ser disipada.

Se necesita más investigación para conocer los parámetros de energía y potencia en un mayor número de registros.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro Regional de Desarrollo Tecnológico para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDe-TeC) de la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) por su apoyo para el presente estudio.

Organiza:

Referencias

- Akiyama H. (1985). Earthquake-resistant limit-state design for buildings. University of Tokyo Press, Japan.
- Alavi B, Krawinkler H. (2001). Effects of near-fault ground motions on frame structures, *John A. Blume Earthquake Engineering Center*.
- Alici, F.S., Sucuoğlu, H. (2016). Prediction of input energy spectrum: attenuation models and velocity spectrum scaling. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(13): 2137-2161.
- Ambraseys N, Douglas J. (2013). Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions, *Soil dynamics and earthquake engineering*, Vol. 23, No.1: 1-18.
- Arias A. (1970). A measure of earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants. *MIT Press, Cambridge, Massachusetts*, 438-483, 1970.
- Benavent-Climent, A., Lopez-Almansa, F., Bravo-Gonzales. D.A. (2010). Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions based on Colombian earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11): 1129-1148.
- Bruneau, M., Wang, N. (1996). Some aspects of energy methods for the inelastic seismic response of ductile SDOF structures, *Engineering Structures*, 18(1): 1-12.
- Chai, Y.H. (2005). Incorporating low-cycle fatigue model into duration-dependent inelastic design spectra, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(1): 83-96.
- Chopra A. K, Chintanapakdee C. (2001). Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 12: 1769-1789.
- Fajfar P, Fischinger M.A. (1990). Seismic procedure including energy concept, *Ninth European Conference on Earthquake Engineering (ECEE)*, 2, 312-321, Moscow, URSS.
- Fajfar P, Vidic T, Fischinger M. (1989). Seismic demand in medium- and long-period structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18(8), 1133-1144, 1989.
- Frau C.D, Panella, D.S, Tornello, M.E. (2023). Input Energy Spectra for Pulse-Like Ground Motions. In: Varum, H., Benavent-Climent, A., Mollaioli, F. (eds) *Energy-Based Seismic Engineering. IWEBSE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 236. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36562-1_17.
- Frau C.D, Tornello M.E, Panella D.S. (2020). Ranking of pulse-like ground motions. *Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japan.
- Housner G.W. (1956). Limit design of structures to resist earthquakes. Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering, Oakland, California, USA, 186–198.

Organiza:

- Kalkan E., Kunnath S. K. (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2: 367-390.
- Kuwamura H, Galambos T.V. (1989). Earthquake load for structural reliability, *Journal of Structural Engineering*, 115(6), 1446-1462.
- López-Almansa, F., Yazgan, A.U., Benavent-Climent, A. (2013). Design energy input spectra for high seismicity regions based on Turkish registers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(4): 885-912.
- Manfredi, G. (2001). Evaluation of seismic energy demand, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(4): 485-499.
- Merter O. (2019) An investigation on the maximum earthquake input energy for elastic SDOF systems. *Earthq Struct* 2019; 16:487–499.
- Merter O., Uçar T. (2019a). Comparative evaluation of elastic input energy spectra for near-fault and far-fault earthquakes. International Civil Engineering and Architecture Conference 2019. ICEARC'19 17-20 April 2019.
- Mezgebo, M.G., Lui, E.M. (2017). A new methodology for energy-based seismic design of steel moment frames, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(1): 131-152.
- Mollaioli, F., Bosi, A. (2012). Wavelet analysis for the characterization of forward-directivity pulse-like ground motions on energy basis, *Meccanica*, 47(1): 203-219.
- Panella D.S, Tornello M.E, Frau C.D. (2017). A simple and intuitive procedure to identify pulse-like ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94: 234–243.
- Somerville P.G, Smith NF, Graves R.W, Abrahamson N.A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismological Research Letter*; 68:199–222, 1997.
- Spudich P, Chiou B.S.J. (2008). Directivity in NGA earthquake ground motions: analysis using isochrone theory, *Earthquake Spectra*; 24 (1):279–98, 2008.
- Uang C.M., Bertero, V.V. (1990). Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19(1): 77-90.

Organiza: