

اثرات ضربه زدن سازه ها به یکدیگر ناشی از زلزله

Jankowski, Robert, Mahmoud, Sayed

مترجمین:

مهندس علیرضا صالحین

مهندس علی حیدری

مقدمه مترجمین

کتاب پیش رو در حال حاضر آخرین تایتل جدید به نوبه خودش می باشد که در دنیا چاپ شده است. این کتاب به بررسی اثرات ضربه زدن سازه ها به یکدیگر و ارائه راهکارهای کاربردی در پل و ساختمان های مستعد ضربه زدن به سازه مجاورشان پرداخته است. در کتاب زیر که از شش فصل تشکیل شده است به موارد زیر پرداخته شده است:

فصل اول کتاب حاضر موضوع ضربه زدن سازه ای ناشی از زلزله را بحث می کند. مثال هایی از خرابی به دلیل برخورد در طول حرکات قبلی زلزله نیز تشریح می شوند. روش های متفاوت برای مدلسازی ضربه سازه ای ناشی از زلزله در فصل ۲ تشریح می شوند. نظریه کلاسیک ضربه نیز علاوه بر روش های مدلسازی نیروی ضربه بطور مستقیم لحاظ می شوند. نتایج تائیدات آزمایشگاهی کارایی مدل های مختلف نیروی ضربه نیز ارائه می شوند. فصل ۳ با ضربه بین ساختمان هایی که بصورت ناقص جدا شده اند سرو کار دارد. پاسخ شامل ضربه ساختمان های تحت تهییج لرزه ای نیز بوسیله مدل های سازه ای مختلف تحلیل می شود و جنبه های برخورد بین ساختمان های جداسازی شده علاوه بر اثر گنجاندن اندرکنش خاک- سازه نیز بحث می شوند. مطالعات روی ضربه بین بخش های مجاور روسازه یک پل هنگام زلزله در فصل ۴ بحث می شوند. تحلیل ها با استفاده از مدل های سازه ای متنوع علاوه بر گنجاندن اثرات لرزه ای نقطه ای مرتبط با انتشار موج لرزه ای انجام می شوند.

فصل ۵ با روش های تخفیف اثرات ضربه زنده سرو کار دارد. نخست، بیشترین وضعیت طبیعی متضمن اندازه به حدکافی بزرگ شکاف برای جلوگیری از برخورد تحلیل می شود. سپس، کارایی سایر مدل ها نظیر گنجاندن المان های رابط یا ضربه گیرها، با افزایش سختی سازه ها یا استفاده از تجهیزات اتلاف انرژی اضافی مورد تحقیق قرار می گیرد. نهایتاً جنبه های طراحی سازه های مستعد ضربه زنده در طول زلزله ها در فصل ۶ تشریح می شوند. روش های مشخص شده در آئین نامه های ساختمانی مرتبط با شکاف لرزه ای حداقلی در ابتدا تشریح می شوند. سپس، ایده طیف پاسخ نیروی ضربه زنی ارائه می شود. جنبه های ارزیابی خرابی سازه ای نیز بحث می شوند.

در پایان لازم می دانم از جناب علیرضا فرهمند برای پشتیبانی و کمک در زمینه کتاب تشکر نمایم.

علیرضا صالحین - علی حیدری

بهار ۹۶

تقدیم به همسر عزیزم و فرزندم محمدامین

مهندس علی حیدری

تقدیم به پدر بزرگوارم، کاپیتان محسن صالحین

با کمال تشکر از محبت ها و الطاف همیشگی شما بزرگوار بر بنده و خانواده



مهندس علیرضا صالحین

فهرست مطالب

فصل اول - معرفی کلی	۶
فصل دوم - مدل سازی ضربه سازه ای	۱۵
فصل سوم - ضربه زنی بین ساختمان ها	۴۲
فصل چهارم - ضربه زنی بین قطعات (سگمنت های) پل	۸۱
فصل پنجم - کاهش اثرات ضربه زنی	۱۰۹
فصل ششم - طراحی سازه های مستعد ضربه زنی	۱۴۲

فصل اول

معرفی

هنگام زلزله مشاهده شده است که ساختمان‌های مجاور یا بخش‌هایی از پل، اگر فاصله جداساز بین آنها برای همسازی حرکات نسبی کافی نباشد با هم تماس پیدا کنند. این پدیده معروف به ضربه سازه ای ناشی از زلزله، ممکن است به خرابی در موقعیت‌های تماس هنگام تهییج‌های لرزه ای متوسط شده یا به خرابی عمده یا حتی فروپاشی کامل سازه‌های تصادم کننده در مورد حرکات شدید زمین منتهی شود. برای مثال گزارش پس از زلزله **Kaliningrad** (۲۱،۰۹،۲۰۰۴) نشانگر اندرکنش بین اجزای مجاور آپارتمان‌ها است که به ترک خوردن گچ نازک کاری در تماس با آن محل، مطابق شکل ۱،۱ منجر گردیده است (**Zembaty** و همکاران ۲۰۰۵). خرابی موضعی در نقاط تماس نیز در تعدادی از ساختمان‌ها پس از زلزله **Darfield** در دوم سپتامبر ۲۰۱۰ مشاهده گردید (**Cole** و همکاران ۲۰۱۱). ۲۰۰۲ **Vasilidis, Elenas** خرابی قابل ملاحظه در محل ضربه را به علت ضربه زدن بین دو قسمت مختلف یک ساختمان مدرسه هنگام زلزله آتن (۷،۰۹،۱۹۹۹) گزارش نمودند. بیمارستان **SSK** در ازمیت نیز از خرابی عمده هنگام زلزله **Kocaeli** به علت اندرکنش بین اجزای مختلف سازه صدمه دید (**Gillies** و همکاران ۲۰۰۱). بعد از زلزله مکزیکوسیتی، خرابی گسترده ناشی از ضربه نیز در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تقویت نشده بنایی مشاهده شد (۱۹،۰۹،۱۹۸۵) که حدود ۴۰٪ سازه‌های خراب شده درجه ای از ضربه را تجربه نموده و در مورد ۱۵٪ آنها ضربه زدن به عنوان یکی از دلایل فروپاشی سازه ای شناسایی شده بود (۱۹۸۶ **Rosenblueth , Meli**). هنگام زلزله سانفرانسیسکو اندرکنش‌های سازه ای بین ساختمان اصلی بیمارستان **Olive View** و یکی از برج‌های پله ایستای مستقل به خرابی عمده و کج شدن دائمی برج ضعیف تر پله منتهی گردید (۱۹۷۳ **Bertero , Collins**). بیش از ۲۰۰ رخداد ضربه زدن شامل بیش از ۵۰۰ ساختمان، در محل‌هایی با فاصله ۹۰ کیلومتری از کانون بعد از زلزله لوماپریتا مشاهده گردیده بود. ضربه زننده سازه ای در طول زلزله به عنوان دلیل اصلی فروپاشی برخی از ساختمان‌ها شناسایی شده بود (برای مثال شکل ۱،۲ را مشاهده نمایید) (۱۹۹۷ **Kasai , Maison**).



شکل ۱،۱ خرابی موضعی در محل تماس (Kaliningrad زلزله ۲۰۰۴)



شکل ۱-۲ برخورد بین دو ساختمان در زلزله لوما پریتا ۱۹۸۹



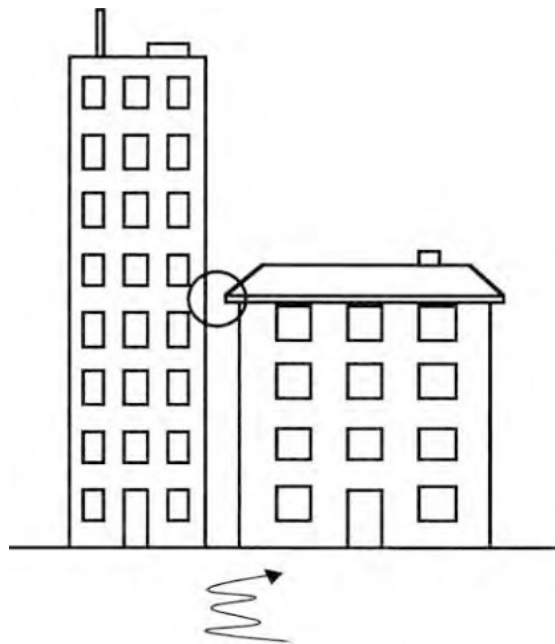
شکل ۱-۴- صدمه رسیدن به قسمت انتهایی رو سازه سگمت پل، زلزله کوبه ۱۹۹۵

اثرات منفی اندرکنش های سازه ای ناشی از زلزله در مورد سازه های پل نیز مشاهده شد. **Priestley** و همکاران (۱۹۹۶) گزارش داد که ضربات بین معبر و ستون های نگه دارنده عرضه بالایی بخش پل دره ای جنوبی خلیج چین در طول زلزله لوماپریتا ۱۹۸۹ به خرابی سازه ای عمده منتهی گردید. پس از زلزله نورث ریج در ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴، خرابی قابل ملاحظه ضربه در مفصل های انبساط و کوله های بخش های ایستای پل ها در **Interstate ۵** و بزرگراه جاده ایالتی ۱۴ مشاهده شده بود (**EERI** ۱۹۹۵). گزارش بعد از زلزله کوبه ضربه زدن را به علت شکست تکیه گاهی منجر به خرابی موضعی قابل ملاحظه در نقاط تماس شناسایی می نماید (شکل ۱،۳ را مشاهده نمایید) و سهمی از سقوط اجزای روسازه مطابق شکل ۱،۴ (**Otsuka** و همکاران ۱۹۹۶). خرابی شدید به علت ضربه بین بخش های مجاور پل بزرگراه جدید **Surajbadi** نیز هنگام زلزله ۲۶ ژانویه ۲۰۰۱ گجرات هند مشاهده شده بود (سینگ و همکاران ۲۰۰۲). در مورد ساختمان ها، مهمترین عامل شناخته شده که علت ضربه سازه ای می باشد، تفاضل پیوندهای طبیعی ارتعاشات می باشد (**nagnostopoulos** ۱۹۹۰، **Anagnostopoulos , Spiliopoulos** ۱۹۹۲; **Maison , Kasai** ۱۹۹۰، **Tena-Colunga** ۱۹۹۶; **Karayannis , Favvata** ۲۰۰۵a, b; **Jankowski** ۲۰۰۵, ۲۰۰۷)



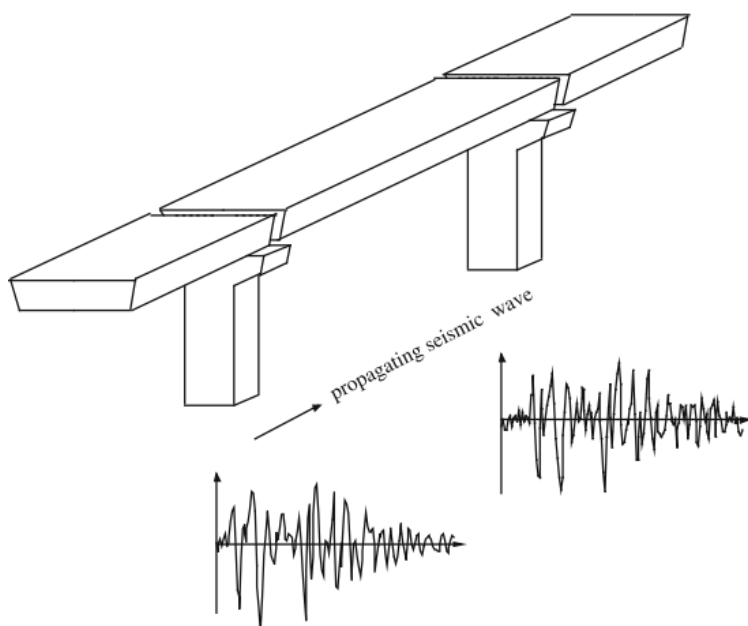
ضربه زدن به عنوان یکی از دلایل سقوط قطعات روسازه پل (زلزله کوبه، ۱۹۹۵)

این اثرات که ممکن است شامل تاخیر زمانی و عدم وجود پیوستگی موج لرزه ای علاوه بر شرایط محلی بطور نقطه ای در حال تغییر خاک باشد، به تهییج های متفاوت زلزله منتهی می گردد که در تکیه گاه های سازه ای متفاوت عمل می کنند (شکل ۱،۶ را مشاهده نمایید) که به ارتعاشات خارج از فاز بخش های مختلف سازه منجر می گردد (*Jeng , Kasai ۱۹۹۶; Hao , Li*). اثرات لرزه ای نقطه ای نیز ممکن است مسئول ضربه ناشی از زلزله بین ساختمان ها با پی نقطه ای گسترده (*Jankowski ۲۰۰۹, ۲۰۰۲*) یا ساختمان های در یک ردیف شوند. ضربه لرزه ای ناشی از زلزله پدیده پیچیده ای بوده اغلب شامل تغییر شکل های پلاستیک، کماتش موضعی یا خرد شدن در نقاط تماس، شکست به دلیل ضربه، اصطکاک و ... گردد. ضربه نیروهایی تولید می کند که در طول یک زمان بسیار کوتاه وارد و برداشته می شود، که موج های تنشی ایجاد می کند، از موقعیت ضربه شروع می شوند. فرآیند انتقال انرژی در طول تصادم بسیار پیچیده تر بوده و تحلیل این نوع از مسئله را بسیار دشوار می سازد. علیرغم پیچیدگی این موضوع، پدیده ضربه زنده سازه ای در طول زلزله ها اخیراً بطور وسیعی با اعمال مدل های سازه ای متعدد و استفاده از مدل های مختلف ضربه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. هدف کتاب پیش رو، علاوه بر نشان دادن نتایج عمده مطالعات روی برخوردهای بین ساختمان ها و بین بخش های پل هنگام حرکات زمین تحلیل روش های متعدد برای مدلسازی ضربه سازه ای ناشی از زلزله می باشد. جنبه های مرتبط با تخفیف اثرات ضربه علاوه بر طراحی سازه های مستعد ضربه نیز بحث می شوند. کتاب از فصول زیر تشکیل می شود:



شکل ۱،۵ تفاضل جرم یا سختی به عنوان دلیل اصلی ضربه زدن بین ساختمان‌ها

این فصل موضوع ضربه زدن سازه‌ای ناشی از زلزله را بحث می‌کند. مثال‌هایی از خرابی به دلیل برخورد در طول حرکات قبلی زلزله نیز تشریح می‌شوند. روش‌های متفاوت برای مدلسازی ضربه سازه‌ای ناشی از زلزله در فصل ۲ تشریح می‌شوند. نظریه کلاسیک ضربه نیز علاوه بر روش‌های مدلسازی نیروی ضربه بطور مستقیم لحاظ می‌شوند. نتایج تائیدات آزمایشگاهی کارایی مدل‌های مختلف نیروی ضربه نیز ارائه می‌شوند. فصل ۳ با ضربه بین ساختمان‌هایی که بصورت ناقص جدا شده اند سرو کار دارد. پاسخ شامل ضربه ساختمان‌های تحت تهییج لرزه‌ای نیز بوسیله مدل‌های سازه‌ای مختلف تحلیل می‌شود و جنبه‌های برخورد بین ساختمان‌های جداسازی شده علاوه بر اثر گنجاندن اندرکنش خاک - سازه نیز بحث می‌شوند. مطالعات روی ضربه بین بخش‌های مجاور روسازه یک پل هنگام زلزله در فصل ۴ بحث می‌شوند. تحلیل‌ها با استفاده از مدل‌های سازه‌ای متنوع علاوه بر گنجاندن اثرات لرزه‌ای نقطه‌ای مرتبط با انتشار موج لرزه‌ای انجام می‌شوند.



شکل ۱،۶ اثرات لرزه ای نقطه ای مرتبط با انتشار موج لرزه ای به عنوان دلیل اصلی ضربه زنده بین قطعات روسازه در پل ها

فصل ۵ با روش های تخفیف اثرات ضربه زنده سرو کار دارد. نخست، بیشترین وضعیت طبیعی متضمن اندازه به حدکافی بزرگ شکاف برای جلوگیری از برخورد تحلیل می شود. سپس، کارایی سایر مدل ها نظیر گنجاندن المان های رابط یا ضربه گیرها، با افزایش سختی سازه ها یا استفاده از تجهیزات اتلاف انرژی اضافی مورد تحقیق قرار می گیرد. نهایتاً جنبه های طراحی سازه های مستعد ضربه زنده در طول زلزله ها در فصل ۶ تشریح می شوند. روش های مشخص شده در آئین نامه های ساختمانی مرتبط با شکاف لرزه ای حداقلی در ابتدا تشریح می شوند. سپس، ایده طیف پاسخ نیروی ضربه زنی ارائه می شود. جنبه های ارزیابی خرابی سازه ای نیز بحث می شوند.

Anagnostopoulos, S.A.: Pounding of buildings in series during earthquakes. *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* ۱۶, ۴۴۳–۴۵۶ (۱۹۸۸)

Anagnostopoulos, S.A., Spiliopoulos, K.V.: An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings. *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* ۲۱, ۲۸۹–۳۰۲ (۱۹۹۲)

Athanassiadou, C.J., Penelis, G.G., Kappos, A.J.: Seismic response of adjacent buildings with similar or different dynamic characteristics. *Earthq. Spectra* 10, 293–317 (1994)

Bertero, V.V., Collins, R.G.: Investigation of the failures of the Olive view Stairtowers during the San Fernando earthquake and their implications on seismic design. EERC Report No. 73–26. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (1973)

Chouw, N., Hao, H.: Study of SSI and non-uniform ground motion effect on pounding between bridge girders. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 25, 717–728 (2005)

Cole, G.L., Dhakal, R.P., Carr, A.J., Bull, D.K.: Case studies of observed pounding damage during the 2010 Darfield earthquake. In: *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake*

Engineering Building an Earthquake-Resilient Society, Auckland, New Zealand, 14–16 April 2011, Paper no. 173

Cole, G.L., Dhakal, R.P., Turner, F.M.: Building pounding damage observed in the 2011 Christchurch earthquake. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 41, 893–913 (2012)

Der Kiureghian, A.: A coherency model for spatially varying ground motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 25, 99–111 (1996)

EERI: Northridge Earthquake of January 17, 1994—Reconnaissance Report. EERI Report 95–03, vol. 1. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland (1995)

Falborski, T., Jankowski, R.: Polymeric bearings—a new base isolation system to reduce structural damage during earthquakes. *Key Eng. Mater.* 569–570, 143–150 (2013)

Gillies, A.G., Anderson, D.L., Mitchell, D., Tinawi, R., Saatcioglu, M., Gardner, N.J., Ghoborah, A.: The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake—lifelines and preparedness. *Can.J. Civ. Eng.* 28, 881–890 (2001)

Hao, H., Liu, X.: Estimation of required separations between adjacent structures under spatial ground motions. *J. Earthq. Eng.* 2, 197–215 (1998)

Hao, H., Zhang, S.-R.: Spatial ground motion effect on relative displacement of adjacent building structures. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 28, 333–349 (1999)

Jankowski, R.: Impact force spectrum for damage assessment of earthquake-induced structural pounding. *Key Eng. Mater.* 293–294, 711–718 (2005)

Jankowski, R.: Assessment of damage due to earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower. *Key Eng. Mater.* 347, 339–344 (2007)

- Jankowski, R.: *Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties*. Eng. Struct. 30(10), 2818–2829 (2008)
- Jankowski, R.: *Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital*. Eng. Struct. 31, 1851–1864 (2009)
- Jankowski, R.: *Non-linear FEM analysis of pounding-involved response of buildings under nonuniform earthquake excitation*. Eng. Struct. 37, 99–105 (2012)
- Jankowski, R., Wilde, K., Fujino, Y.: *Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes*. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 27, 487–502 (1998)
- Jankowski, R., Wilde, K., Fujino, Y.: *Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes*. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 29, 195–212 (2000)
- Jeng, V., Kasai, K.: *Spectral relative motion of two structures due to seismic travel waves*. J. Struct. Eng. 122, 1128–1135 (1996)
- Karayannis, C.G., Favvata, M.J.: *Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights*. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 34, 1–20 (2005a)
- Karayannis, C.G., Favvata, M.J.: *Inter-story pounding between multistory reinforced concrete structures*. Struct. Eng. Mech. 20, 505–526 (2005b)
- Kasai, K., Maison, B.F.: *Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake*. Eng. Struct. 19, 195–207 (1997)
- Kim, S.-H., Lee, S.-W., Mha, H.-S.: *Dynamic behaviors of the bridge considering pounding and friction effects under seismic excitations*. Struct. Eng. Mech. 10, 621–633 (2000)
- Komodromos, P.: *Simulation of the earthquake-induced pounding of seismically isolated buildings*. Comput. Struct. 86, 618–626 (2008)
- Mahmoud, S., Abd-Elhamed, A., Jankowski, R.: *Earthquake-induced pounding between equal height multi-storey buildings considering soil-structure interaction*. Bull. Earthq. Eng. 11(4), 1021–1048 (2013)
- Mahmoud, S., Austrell, P.-E., Jankowski, R.: *Simulation of the response of base-isolated buildings under earthquake excitations considering soil flexibility*. Earthq. Eng. Eng. Vibr. 11, 359–374 (2012)
- Mahmoud, S., Jankowski, R.: *Elastic and inelastic multi-storey buildings under earthquake excitation with the effect of pounding*. J. Appl. Sci. 9(18), 3250–3262 (2009)
- Mahmoud, S., Jankowski, R.: *Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding*. Iran. J. Sci. Technol. 35(C1), 51–62 (2011)
- Maison, B.F., Kasai, K.: *Analysis for type of structural pounding*. J. Struct. Eng. 116, 957–977 (1990)
- Maison, B.F., Kasai, K.: *Dynamics of pounding when two buildings collide*. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 21, 771–786 (1992)
- Otsuka, H., Unjoh, S., Terayama, T., Hoshikuma, J., Kosa, K.: *Damage to highway bridges by the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake and the retrofit of*

- highway bridges in Japan. Third U.S.–Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges. Osaka, Japan, 10–11 Dec 1996*
- Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges. Wiley, New York (1996)*
- Polycarpou, P.C., Komodromos, P.: Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures. Eng. Struct. 32, 1937–1951 (2010)*
- Polycarpou, P.C., Papaloizou, L., Komodromos, P.: An efficient methodology for simulating earthquake-induced 3D pounding of buildings. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 43, 985–1003 (2014)*
- Rosenblueth, E., Meli, R.: The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico City. Concr. Int. 8, 23–34 (1986)*
- Singh, M.P., Khaleghi, B., Saraf, V.K., Jain, S.K., Norris, G., Goel, R., Murty, C.V.R.: Roads and bridges. Earthq. Spectra 18(S1), 363–379 (2002)*
- Softysik, B., Jankowski, R.: Non-linear strain rate analysis of earthquake-induced pounding between steel buildings. Int. J. Earth Sci. Eng. 6, 429–433 (2013)*
- Tena-Colunga, A., Del Valle, E., Pérez-Moreno, D.: Issues on the seismic retrofit of a building near resonant response and structural pounding. Earthq. Spectra 12, 567–597 (1996)*
- Vasiliadis, L., Elenas, A.: Performance of school buildings during the Athens earthquake of 7 September 1999. In: 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, 9–13 Sept 2002, Paper Ref. 264*
- Zanardo, G., Hao, H., Modena, C.: Seismic response of multi-span simply supported bridges to a spatially varying earthquake ground motion. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 31, 1325–1345 (2002)*
- Zembaty, Z., Cholewicki, A., Jankowski, R., Szulc, J.: Trzęsienia ziemi 21 września 2004 r. w Polsce północno-wschodniej oraz ich wpływ na obiekty budowlane (Earthquakes of September 21, 2004 in north eastern Poland and their effects on structures). Inżynieria i Budownictwo. 61,3–9 (2005) (in Polish)*