

ROBERT JANKOWSKI\*

## BADANIA DYNAMICZNE MODELI KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH NA STOLE WSTRZĄSOWYM

### SHAKING TABLE EXPERIMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE-INDUCED STRUCTURAL POUNDING

#### Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stole wstrząsowym, w trakcie których poddawano wymuszeniom sejsmicznym modele dwóch kolidujących ze sobą wież. Wyniki te wskazują, że zderzenia mogą prowadzić do znacznego wzrostu odpowiedzi konstrukcji, ale mogą mieć również pozytywny wpływ i częściowo wytlumić drgania. Ponadto wyniki badań wykazały istotny wpływ rodzaju materiału, z którego wykonane są elementy kolidujące ze sobą na zachowanie się konstrukcji podczas trzęsienia ziemi.

*Słowa kluczowe: stół wstrząsowy, zderzenie konstrukcji, trzęsienia ziemi*

#### Abstract

The aim of the paper is to show the results of the shaking table experimental study conducted for pounding between two model towers equipped with colliding elements made of different building materials. The results of the study show that pounding may result in substantial increase of the structural response, however it can also play a positive role by reducing vibrations. Moreover, the results show the considerable influence of the type of material used for colliding elements on behaviour of structures during earthquakes.

*Keywords: shaking table, structural pounding, earthquakes*

---

\* Dr inż. Robert Jankowski, Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska.

## 1. Wstęp

Podczas trzęsień ziemi wielokrotnie obserwowano zderzanie się sąsiadujących ze sobą budowli lub ich części, jeżeli przerwa dylatacyjna między nimi była zbyt mała. Zjawisko to może powodować niegroźne uszkodzenia w miejscach kontaktu podczas umiarkowanych wstrząsów sejsmicznych (np. trzęsienie ziemi w północno-wschodniej Polsce z 2004 roku [1]). Może również prowadzić do znacznego uszkodzenia budowli lub nawet jej całkowitego zniszczenia podczas dużych wstrząsów sejsmicznych (np. trzęsienie ziemi Loma Prieta z 1989 r. [2]). Główną przyczyną prowadzącą do zderzania się budynków jest zwykle różnica charakterystyk dynamicznych konstrukcji (zob. np. [3]). W przypadku mostów natomiast dominującym czynnikiem jest na ogół efekt propagacji fali sejsmicznej, w wyniku którego sąsiednie przęsła konstrukcji wzbudzone są różnymi wymuszeniami dynamicznymi [4].

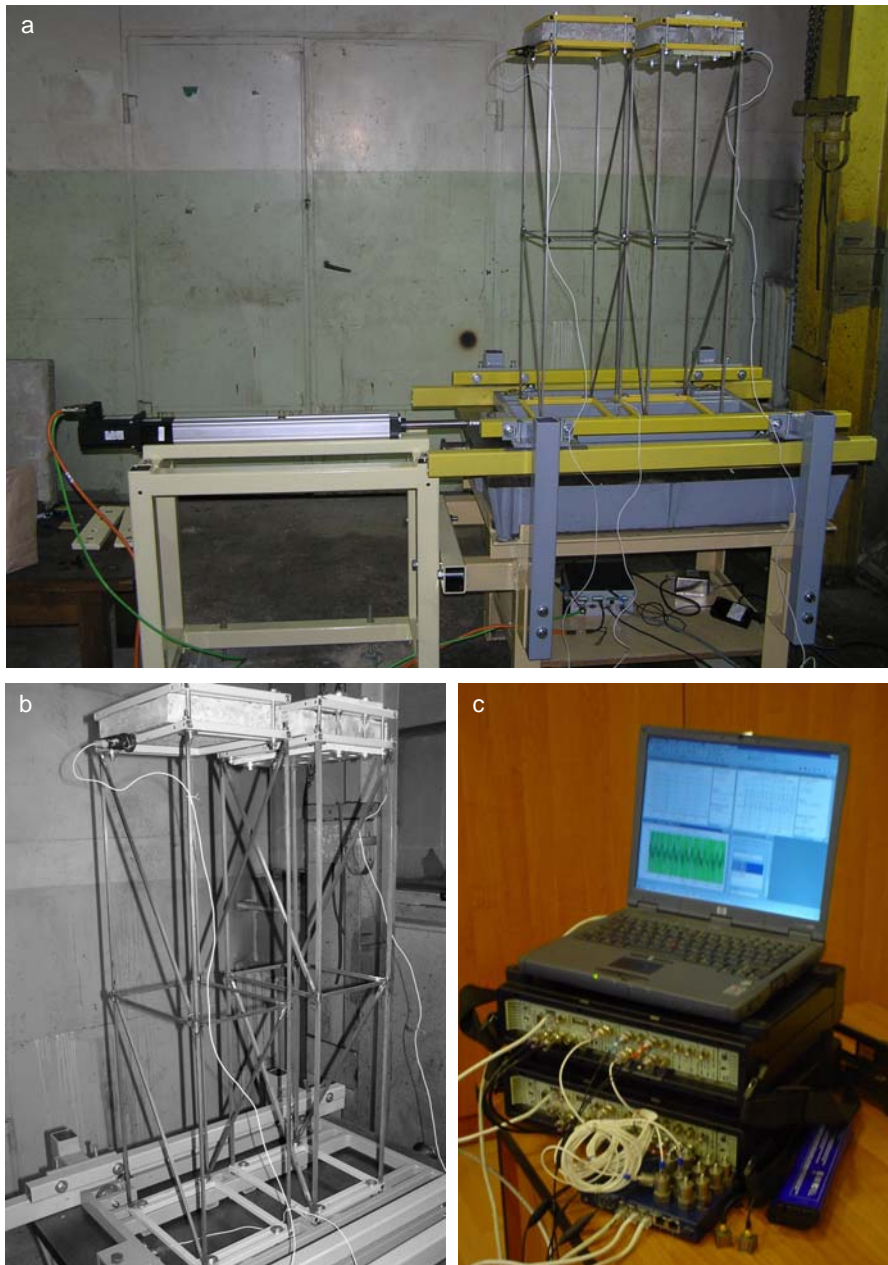
Problem kolizji pomiędzy konstrukcjami budowlanymi podczas trzęsień ziemi jest od kilkunastu lat intensywnie badany z zastosowaniem różnych modeli numerycznych zderzeń. Najbardziej popularnym modelem stosowanym do analizy tego zjawiska jest liniowy model lepkosprężysty (zob. [5, 6]). W celu dokładniejszej symulacji relacji pomiędzy siłą zderzenia a penetracją zastosowano nieliniowy model sprężysty, wykorzystując prawo Hertza [7, 8]. Modyfikacją tego modelu, umożliwiającą symulację straty energii podczas kontaktu, jest nieliniowy model lepkosprężysty [9, 10]. Wyniki badań numerycznych pokazują, że zderzenia mogą prowadzić do znacznego wzrostu odpowiedzi konstrukcji budowlanych podczas trzęsień ziemi. Z drugiej jednak strony zaobserwowano również przypadki, kiedy kolizje przyczyniły się do zmniejszenia odpowiedzi budowli (zob. np. [5]).

W przeciwieństwie do badań numerycznych wyniki badań eksperymentalnych dotyczące zjawiska zderzeń konstrukcji budowlanych podczas trzęsień ziemi są bardzo ograniczone i dotyczą głównie weryfikacji eksperymentalnej użytego modelu numerycznego (zob. [11]). Dlatego też celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników obszerniejszych badań przeprowadzonych na stole wstrząsowym, w trakcie których poddano wymuszeniom sejsmicznym modele dwóch wież o różnych parametrach dynamicznych, w których zastosowano wymienne elementy kolidujące ze sobą, wykonane z różnych materiałów budowlanych.

## 2. Opis stanowiska do badań eksperymentalnych

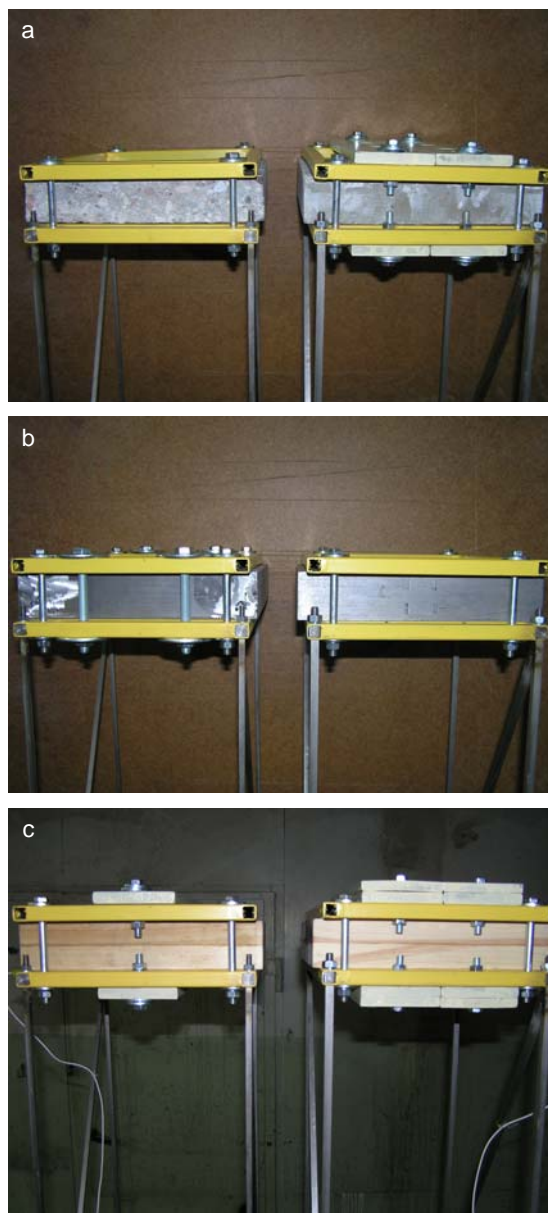
W badaniach eksperymentalnych użyto specjalnego stołu wstrząsowego (sejsmicznego) znajdującego się w Laboratorium Katedry Mechaniki Budowli Politechniki Gdańskiej (ryc. 1a). Urządzenie to wyposażone jest w wózek o wymiarach  $0,75 \times 0,6$  m, umożliwiający testowanie modeli konstrukcji o maksymalnej masie 100 kg. Wózek poruszany jest przez siłownik ET50 firmy PARKER o skoku 0,5 m, maksymalnym przyspieszeniu  $10 \text{ m/s}^2$  i maksymalnej sile 3300 N. Parametry stołu umożliwiają uzyskiwanie wymuszeń sejsmicznych powstających podczas największych trzęsień ziemi.

Do celów badań eksperymentalnych wykonano modele dwóch wież o wysokości 1 m, różniących się charakterami dynamicznymi (ryc. 1b). Ponieważ celem badań było wstępne rozeznanie zjawiska zderzeń, nie zdecydowano się na wykonanie modeli istniejących konstrukcji, lecz główny nacisk położono na prostotę wykonania. Każdy z modeli zbudowany



Ryc. 1. Stanowisko do badań eksperymentalnych: a) stół wstrząsowy, b) modele wież,  
c) system PULSE

Fig. 1. Experimental setup: a) shaking table, b) model towers, c) system PULSE



Ryc. 2. Elementy wymienne umieszczane na szczycie wież (wraz z dodatkowymi ciężarkami):  
a) elementy betonowe, b) elementy stalowe, c) elementy drewniane

Fig. 2. Replaceable elements placed at the top of the towers (with additional weights): a) concrete elements, b) steel elements, c) timber elements

został z czterech stalowych prętów pionowych połączonych prętami poziomymi w środku wysokości oraz dodatkowo wzmocnionych prętami skośnymi, aby zminimalizować drgania poprzeczne i skrętne. Pręty pionowe zestawione zostały w układzie prostokątnym z odstępem 0,22 m w kierunku działania wymuszenia sejsmicznego (kierunek podłużny) oraz z odstępem 0,3 m w kierunku do niego prostopadłym (kierunek poprzeczny). Do budowy wieży ustawionej na stole wstrząsowym po lewej stronie zastosowano pręty o przekroju 6×6 mm, podczas gdy wieżę stojącą po stronie prawej wykonano z prętów o przekroju 8×8 mm. Dwa akcelerometry ENDEVCO (typ 7752) przymocowane do górnych części wież (ryc. 1b) monitorowały odpowiedź każdego z modeli w czasie testów sejsmicznych. Dodatkowy akcelerometr zainstalowano na wózku w celu kontroli jego ruchu. Do celów pomiarowych oraz akwizycji danych zastosowano system PULSE (ryc. 1c). Aby określić wpływ zderzeń pomiędzy różnymi materiałami budowlanymi zastosowano wymienne elementy o wymiarach zewnętrznych 0,25×0,25×0,05 m, umieszczane na szczycie każdej z wież (ryc. 2), wykonane z betonu (klasa C30/37), stali (gatunek 18G2A) i drewna (sosna). Niezależnie od użytego materiału masa każdego z modeli pozostawała podczas wszystkich testów niezmienna, co było możliwe dzięki zastosowaniu dodatkowych ciężarków (ryc. 2). Całkowita masa elementów wymiennych wraz z elementami mocującymi i ewentualnymi dodatkowymi ciężarkami wynosiła 10,004 kg i 19,226 kg odpowiednio dla wieży znajdującej się po stronie lewej i prawej.

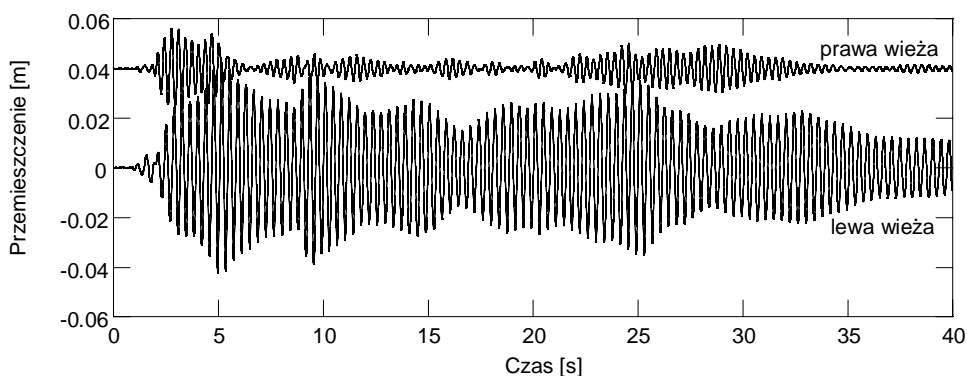
Na podstawie analizy drgań swobodnych każdego z modeli dokonano identyfikacji parametrów dynamicznych. Okazało się, że dominująca częstotliwość wieży lewej wyniosła 2,594 Hz, podczas gdy częstotliwość drgań wieży prawej – 2,992 Hz. Liczby tłumienia drgań oszacowano na 0,4% i 1% odpowiednio dla wieży znajdującej się po stronie lewej i prawej.

### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

Podczas badań eksperymentalnych modele wież poddane były wymuszeniu sejsmicznemu na stole wstrząsowym w postaci trzęsienia ziemi El Centro z 1940 r. (zapis składowej poziomej NS). Badania przeprowadzono dla różnych szerokości przerwy pomiędzy kolidującymi ze sobą elementami, jednak w niniejszym artykule przedstawiono przykładowe wyniki tylko dla szerokości równej 40 mm. Na rycinach 3–5 pokazano przebiegi czasowe przemieszczeń górnych części wież dla przypadków zderzeń pomiędzy elementami betonowymi, stalowymi i drewnianymi uzyskane za pomocą całkowania zarejestrowanych historii przyspieszeń. Dla porównania na ryc. 6 przedstawiono przebiegi czasowe przemieszczeń dla drgań niezależnych (bez zderzeń). Ekstremalne wartości przemieszczeń obu wież zestawiono w tablicy 1.

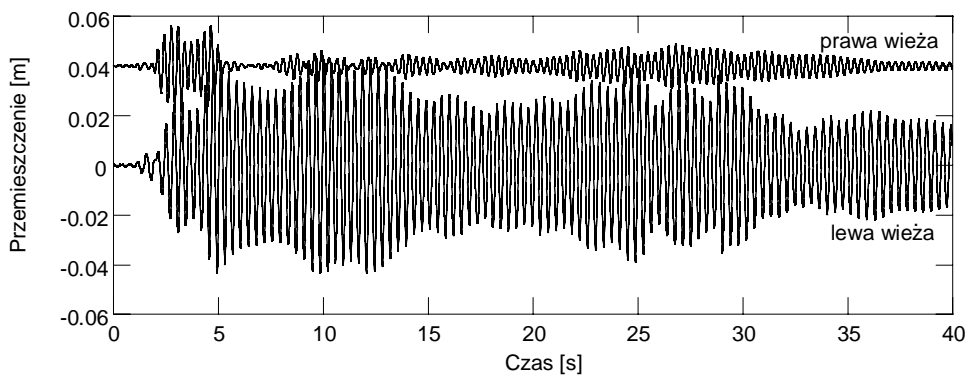
Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że wpływ zderzeń na zachowanie się analizowanych konstrukcji może być znaczny. Stwierdzenie to dotyczy szczególnie lewej wieży (mniej sztywnej i lżejszej), dla której kolizje spowodowały zwiększenie amplitudy drgań niemalże w całym przedziale czasowym trzęsienia ziemi (szczególnie widoczne w przedziale od 10 do 20 s), niezależnie od użytego materiału w elementach kolidujących ze sobą. Warto jednak zwrócić uwagę, że przebiegi czasowe przemieszczeń przedstawione dla tej wieży na ryc. 3–5 istotnie różnią się od siebie, co świadczy o zależności od rodzaju użytego materiału. Największy średni wzrost amplitud (a także największą liczbę kolizji) zanoto-

wano dla przypadku zderzeń pomiędzy elementami stalowymi, najmniejszy zaś dla zderzeń pomiędzy elementami drewnianymi. Wartości przestawione w tabl. 1 pokazują, że w przypadku zderzeń pomiędzy elementami betonowymi i stalowymi nastąpił wzrost wartości ekstremalnej przemieszczenia wieży (w stosunku do drgań bez kolizji) odpowiednio o 2,1% i 4,9%, zaś dla zderzeń pomiędzy elementami drewnianymi nieznaczny spadek tej wartości (o 0,4%).



Ryc. 3. Przebiegi czasowe przemieszczeń wież dla przypadku zderzeń pomiędzy elementami betonowymi

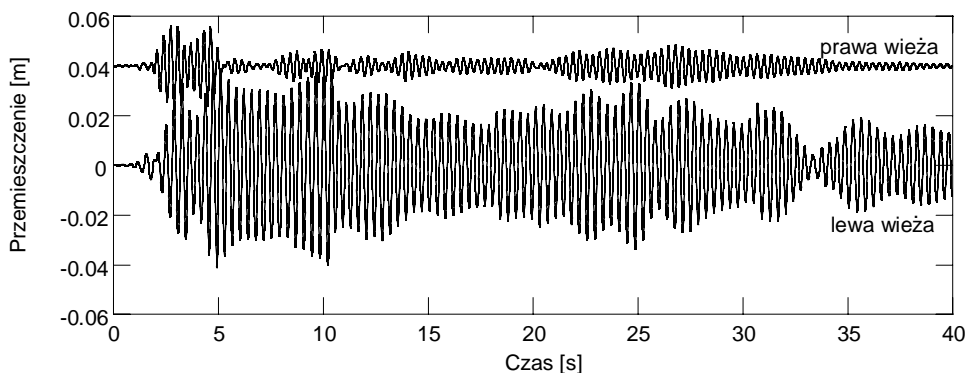
Fig. 3. Displacement time histories of towers in the case of concrete-to-concrete pounding



Ryc. 4. Przebiegi czasowe przemieszczeń wież dla przypadku zderzeń pomiędzy elementami stalowymi

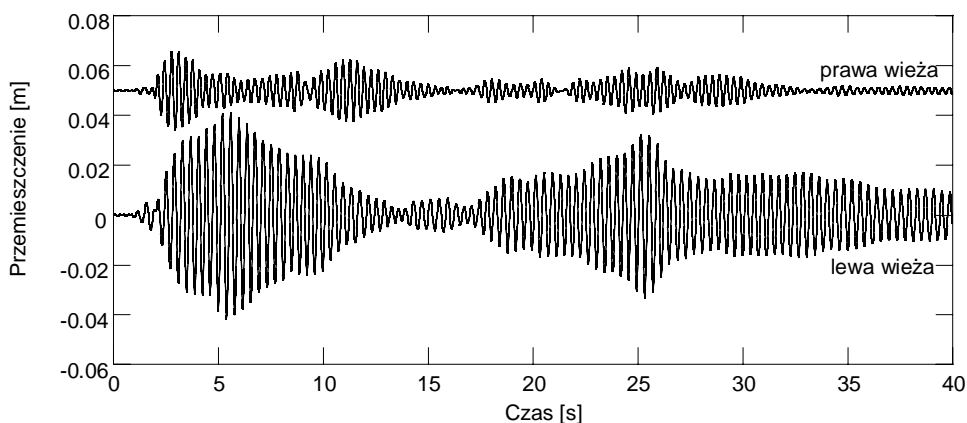
Fig. 4. Displacement time histories of towers in the case of steel-to-steel pounding





Ryc. 5. Przebiegi czasowe przemieszczeń wież dla przypadku zderzeń pomiędzy elementami drewnianymi

Fig. 5. Displacement time histories of towers in the case of timber-to-timber pounding



Ryc. 6. Przebiegi czasowe przemieszczeń wież dla drgań niezależnych (bez zderzeń)

Fig. 6. Displacement time histories of towers for independent vibrations (without pounding)

Tablica 1

**Ekstremalne wartości przemieszczeń dla zderzeń pomiędzy elementami wykonanymi z różnych materiałów budowlanych oraz dla przypadku bez zderzeń**

	Ekstremalne przemieszczenie [mm]			
	zderzenia pomiędzy elementami betonowymi	zderzenia pomiędzy elementami stalowymi	zderzenia pomiędzy elementami drewnianymi	bez zderzeń
Prawa wieża	16,35	16,33	16,37	16,08
Lewa wieża	42,25	43,42	41,22	41,40

Z drugiej strony wyniki badań przedstawione na ryc. 3–6 wskazują, że wpływ kolizji na zachowanie się prawej wieży (szywniejszej i cięższej) nie jest już tak istotny. Patrząc na przebiegi czasowe, warto zwrócić uwagę, że zderzenie, które miało miejsce około piątej sekundy spowodowało częściowe wytlumienie drgań tej konstrukcji. Jednak w czasie całego trzęsienia ziemi kolizje spowodowały niewielki, prawie identyczny (od 1,6% do 1,8%) wzrost wartości ekstremalnej przemieszczenia wieży prawej dla wszystkich testowanych materiałów (tabl. 1).

#### 4. Uwagi końcowe

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stole wstrząsowym, w trakcie których poddano wymuszeniom sejsmicznym modele dwóch kolidujących ze sobą wież o różnych parametrach dynamicznych. Wyniki te potwierdziły wnioski ogólne uzyskane na podstawie badań numerycznych. Pokazały, że zderzenia mogą prowadzić do znacznego wzrostu odpowiedzi konstrukcji podczas trzęsień ziemi, choć mogą również mieć pozytywny wpływ i częściowo wytlumić drgania. Ponadto zaobserwowano istotną zależność zachowania się konstrukcji od rodzaju materiału, z którego wykonano elementy kolidujące ze sobą.

Eksperyment opisany w niniejszym artykule przeprowadzono na relatywnie małych modelach (ograniczenia stołu sejsmicznego). Potrzebne są zatem dalsze badania z zastosowaniem większych modeli rzeczywistych konstrukcji budowlanych w celu weryfikacji uzyskanych wyników.

#### Literatura

- [1] Zembaty Z., Cholewicki A., Jankowski R., Szulc J., *Trzęsienia ziemi 21 września 2004 r. w Polsce północno-wschodniej oraz ich wpływ na obiekty budowlane*, Inżynieria i Budownictwo, vol. LXI, nr 1, 2005, 3-9.
- [2] Kasai K., Maison B., *Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake*, Engineering Structures, Vol. 19, No. 3, 1997, 195-207.
- [3] Jankowski R., *Non-linear modelling of earthquake induced pounding of buildings*, Mechanics of the 21st Century – Proceedings of XXI ICTAM, Springer, Dordrecht, Netherlands 2005, paper ID 12659.
- [4] Jankowski R., Wilde K., *A simple method of conditional random field simulation of ground motions for long structures*, Engineering Structures, Vol. 22, No. 5, 2000, 552-561.
- [5] Anagnostopoulos S.A., *Pounding of buildings in series during earthquakes*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, No. 4, 1988, 443-456.
- [6] Jankowski R., Wilde K., Fujino Y., *Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, No. 5, 1998, 487-502.
- [7] Pantelides C.P., Ma X., *Linear and nonlinear pounding of structural systems*, Computers and Structures, Vol. 66, No. 1, 1998, 79-92.



- [8] Chau K.T., Wei X.X., *Pounding of structures modelled as non-linear impacts of two oscillators*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, No. 5, 2001, 633-651.
- [9] Jankowski R., *Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, No. 6, 2005, 595-611.
- [10] Jankowski R., *Pounding force response spectrum under earthquake excitation*, Engineering Structures, Vol. 28, No. 8, 2006, 1149-1161.
- [11] Chau K.T., Wei X.X., Guo X., Shen C.Y., *Experimental and theoretical simulations of seismic poundings between two adjacent structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, No. 4, 2003, 537-554.