

ANNA BANAŚ\*, ROBERT JANKOWSKI\*\*, ARKADIUSZ KWIECIEŃ\*\*\*

## EKSPERYMENTALNE BADANIA POLIMERÓW DO ELEMENTÓW WIBROIZOLACJI SEJSMICZNEJ

### EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC ISOLATION MADE OF POLYMER MASS

#### Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest weryfikacja doświadczalna możliwości zastosowania polimerów do elementów wibroizolacji sejsmicznej. Własności dynamiczne zastosowanego materiału zbadano na podstawie wyników badań wstępnych, poddając dynamicznemu ściskaniu i rozciąganiu elementy wykonane z masy polimerowej. Dalsze badania wykonano na stole sejsmicznym, poddając wymuszeniom sejsmicznym model konstrukcji wieżowej z wibroizolacją oraz bez wibroizolacji i porównano odpowiedzi dla obu przypadków. Wyniki badań wskazują, że zastosowanie wibroizolacji w postaci elementów polimerowych może być bardzo efektywną metodą ochrony budowli przed zniszczeniem podczas trzęsień ziemi.

*Słowa kluczowe: badania eksperymentalne, wibroizolacja sejsmiczna, polimer*

#### Abstract

The aim of the paper is the experimental verification of the applicability of the use of polymer mass for the elements of seismic isolation. Dynamic properties of the polymer were determined based on the results of the push-and-pull experiment. Further tests were conducted on a shaking table during which a model of the structure with and without seismic isolation was subjected to the same earthquake loading and their responses were compared. The results of the study indicate that the use of the seismic isolation made of polymer can be a very effective method of protecting structures from damage during earthquakes.

*Keywords: experimental study, seismic isolation, polymer*

\* Mgr inż. Anna Banaś, Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska.

\*\* Dr hab. inż. Robert Jankowski, prof. PG, Katedra Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska.

\*\*\* Dr inż. Arkadiusz Kwiecień, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Wibroizolacja sejsmiczna jest uważana za jedną z najbardziej efektywnych metod ochrony konstrukcji budowlanych przed zniszczeniem podczas trzęsień ziemi. Jej zastosowanie umożliwia wydłużenie okresu drgań własnych konstrukcji, co przy prawidłowo dobranych parametrach prowadzi do redukcji efektów rezonansowych z wymuszeniem sejsmicznym [1]. Ponadto poprzez zwiększenie tłumienia w elementach wibroizolacji możliwa jest większa dyssypacja energii i w efekcie redukcja odpowiedzi budowli podczas trzęsienia ziemi [2].

Ostatnie lata to okres intensywnych badań eksperymentalnych dotyczących zachowania się konstrukcji z wibroizolacją sejsmiczną podczas trzęsień ziemi [3–5]. Jednymi z najbardziej efektywnych rodzajów badań są testy przeprowadzane na tzw. stołach sejsmicznych, które umożliwiają wygenerowanie takiego wymuszenia, jakie występuje w trakcie rzeczywistego trzęsienia ziemi. Dolce i inni [3] wykonali serię eksperymentów na stole sejsmicznym, aby wykazać efektywność działania wibroizolacji sejsmicznej w celu ochrony zarówno konstrukcyjnych, jak i niekonstrukcyjnych elementów budowli. Testowanym modelem była trzypiętrowa, dwuprzęsłowa żelbetowa rama. Samali i inni [5] wykonali wiele badań konstrukcji z wibroizolacją sejsmiczną w postaci laminowanych łożysk gumowych oraz łożysk z rdzeniem z ołowiu. W swojej pracy skupili się głównie na badaniu zachowania się konstrukcji o asymetrycznej budowie. Podobne badania eksperymentalne prowadzone były również przez innych badaczy [4].

Pomimo, że w ostatnim czasie testy eksperymentalne odporności sejsmicznej konstrukcji z wibroizolacją zostały znacznie zintensyfikowane, istnieje potrzeba dalszych badań nad nowymi rozwiązaniami technicznymi. Celem niniejszego artykułu jest weryfikacja doświadczalna możliwości zastosowania masy polimerowej do elementów wibroizolacji sejsmicznej. Zastosowany polimer pm45 jest elastyczną zaprawą dwuskładnikową wytworzoną na bazie żywicy poliuretanowej [6]. Jego parametry dynamiczne zbadano na podstawie wyników wstępnych testów eksperymentalnych w trakcie dynamicznego ściskania i rozciągania elementów wykonanych z masy polimerowej. Dalsze badania wykonano na stole sejsmicznym, poddając wymuszeniom sejsmicznym model konstrukcji wieżowej z wibroizolacją oraz bez wibroizolacji i porównano odpowiedzi dla obu przypadków.

## 2. Badania własności dynamicznych masy polimerowej

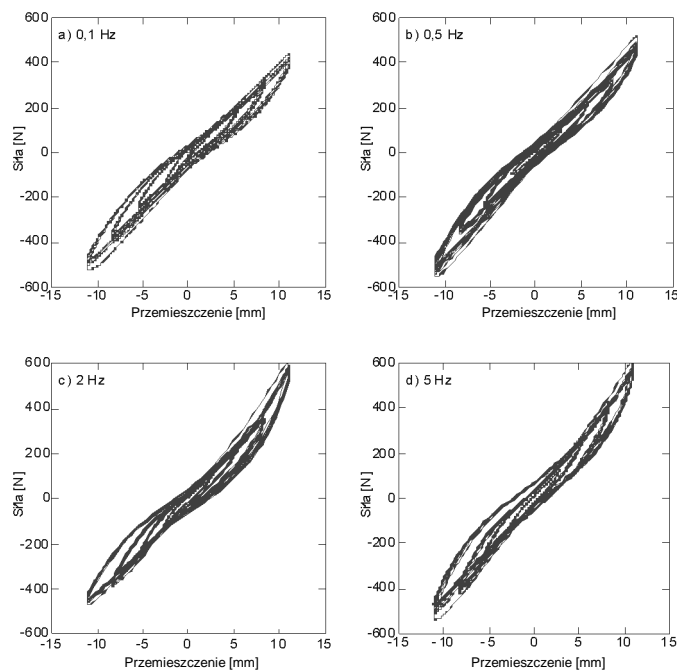
W celu sprawdzenia własności dynamicznych masy polimerowej pm45 wykonano wstępne badania eksperymentalne na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku badawczym do badań dynamicznych (rys. 1). Podczas testów elementy wykonane z masy polimerowej poddane były dynamicznemu ściskaniu i rozciąganiu do poziomów odkształceń od  $\pm 10\%$  do  $\pm 40\%$  poprzez przyłożenie wymuszenia harmonicznego w zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 5 Hz. Do badań wykorzystano próbki cylindryczne o wysokości 28 mm i średnicy 28 mm. Przykładowe wyniki eksperymentalne w postaci pętli histerezy dla częstotliwości 0,1 Hz, 0,5 Hz, 2 Hz oraz 5 Hz przedstawiono na rys. 2. Wyniki badań pokazują, że testowany materiał wykazuje mniejszą sztywność dla małych przemieszczeń z jednoczesnym efektem wzmocnienia przy dużych poziomach odkształceń.



Uzyskane pętle histerezy (dość podobne dla różnych częstotliwości wymuszenia) świadczą o jego dobrych właściwościach rozpraszania energii podczas wymuszenia dynamicznego.



Rys. 1. Stanowisko eksperymentalne do dynamicznego ściskania-rozciągania  
Fig. 1. Setup of the dynamic push-and-pull experiment



Rys. 2. Pętle histerezy dla różnych częstotliwości wymuszenia harmonicznego  
Fig. 2. Hysteresis loops for different harmonic excitation frequencies

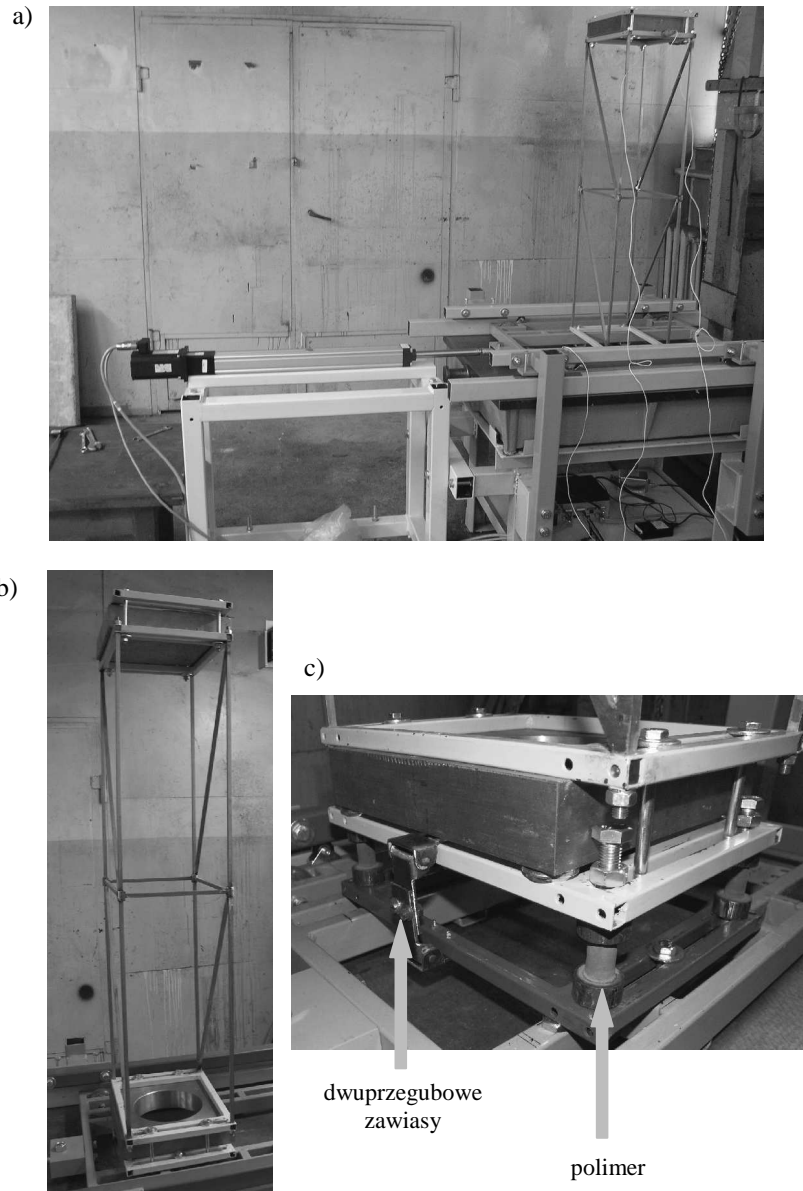
### 3. Badania polimerów jako elementów wibroizolacji

Dalsze badania wykonano na specjalnym stole sejsmicznym (rys. 3a) znajdującym się w Laboratorium Katedry Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej. Urządzenie to umożliwia uzyskiwanie wymuszeń dynamicznych powstających podczas największych trzęsień ziemi. Składa się ono z platformy o wymiarach  $0,75 \times 0,6$  m, która pozwala na testowanie modeli o wadze do 100 kg. Wymuszenie sejsmiczne przekazywane jest przez liniowy siłownik dynamiczny PARKER ET50. Siłownik umożliwia ruch platformy z amplitudą wynoszącą 0,5 m, maksymalnym przyspieszeniem  $10 \text{ m/s}^2$  oraz maksymalną siłą równą 3300 N.

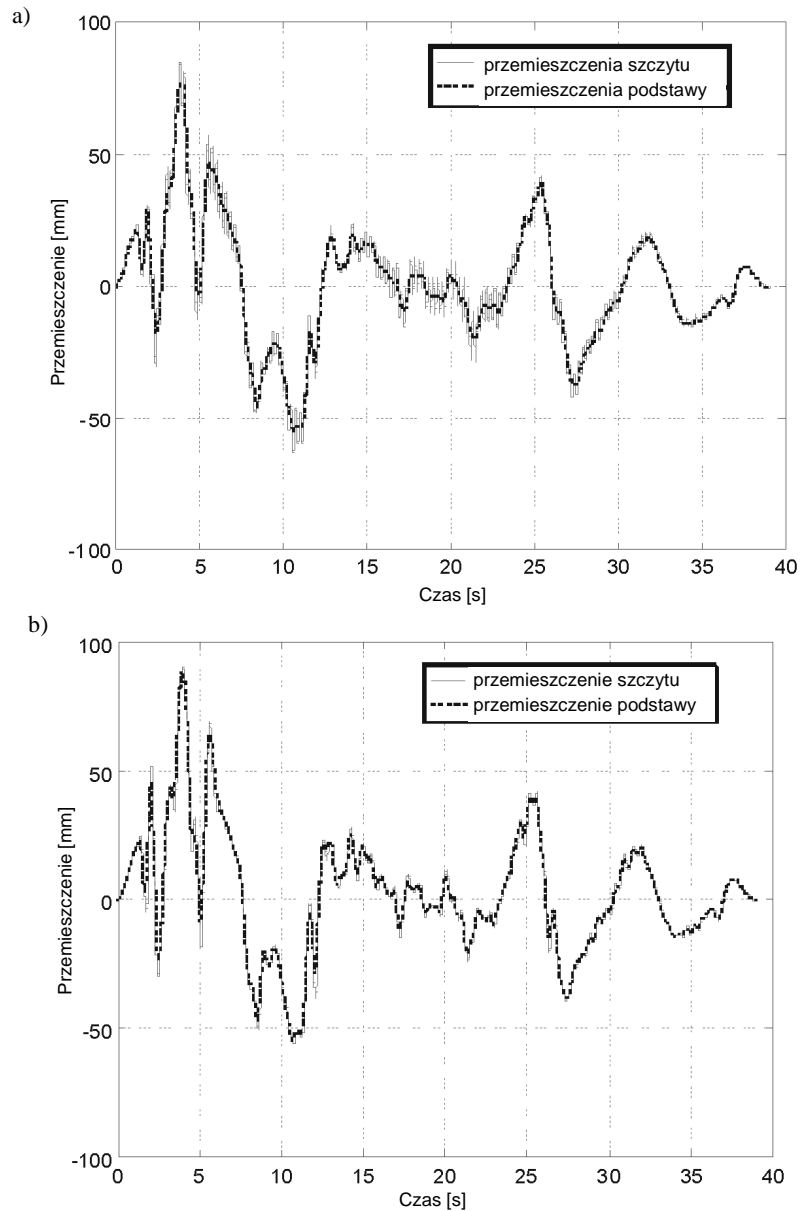
Badaniom poddano model konstrukcji wieżowej o wysokości 1 m (rys. 3b). Model ten zbudowano z czterech prętów o przekroju kwadratowym  $8 \times 8$  mm. Aby wzmocnić konstrukcję, zainstalowano w połowie wysokości wieży dodatkowe poziome poprzeczki. W celu wyeliminowania ruchu poprzecznego konstrukcji, jak również drgań skrętnych, zastosowano ukośne wzmocnienia w kierunku ortogonalnym do wymuszenia. Pionowe pręty tworzą szkielet konstrukcji o podstawie prostokąta. W kierunku zgodnym z wymuszeniem wymiar podstawy wieży wynosi 0,22 m, natomiast w kierunku prostopadłym 0,3 m. Całkowita masa konstrukcji szkieletowej wynosi 3,864 kg. W konstrukcji dodatkowo zainstalowano dwie płyty o wymiarach zewnętrznych  $0,25 \times 0,25 \times 0,05$  m. Jedna z nich o masie 9,485 kg została umieszczona na szczycie wieży (strop), druga – o masie 18,337 kg – przy podstawie konstrukcji (fundament). Analiza drgań swobodnych konstrukcji utwierdzonej pokazała, że dominująca częstotliwość wynosi 3,94 Hz, zaś liczba tłumienia drgań ma wartość 0,55%.

Elementy polimerowe wykorzystane do badań eksperymentalnych efektywności wibroizolacji sejsmicznej wykonano z polimeru pm45 w formie walców (rys. 3c). Średnica walców wynosiła 15 mm, natomiast wysokość 28 mm. Podczas instalacji elementów polimerowych pojawił się problem wyeliminowania w nich sił ściskających i rozciągających. Ze względu na to, że sam polimer nie jest wystarczająco sztywny, w kierunku pionowym zainstalowano na bokach konstrukcji specjalnie skonstruowane dwuprzegubowe zawiasy (rys. 3c). Umożliwiły one swobodny ruch poziomy konstrukcji, jednocześnie eliminując siły ściskające i rozciągające w elementach polimerowych powodujące kołysanie. Analiza drgań swobodnych konstrukcji z wibroizolacją pokazała, że dominująca częstotliwość wynosi 1,82 Hz, zaś liczba tłumienia drgań dla tej postaci ma wartość 17,31%.

Badanie efektywności działania wibroizolacji z udziałem elementów polimerowych wykonane na stole sejsmicznym przebiegało w dwóch etapach. W pierwszym etapie badano zachowanie się utwierdzonej konstrukcji wieży, którą obciążono horyzontalnie składową NS przebiegu czasowego trzęsienia ziemi El Centro (18.05.1940) o zmniejszonej skali. Konieczność przeskaldowania zapisu wymuszenia sejsmicznego wynikała z obawy przed zniszczeniem elementów polimerowych oraz uplastycznieniem stalowych prętów przy pełnym wymuszeniu. Po wstępnych próbach przyjęto współczynnik skalujący o wartości 0,6. W drugim etapie model konstrukcji wyposażono w elementy polimerowe oraz zawiasy u jego podstawy i testy powtórzono dla tego samego wymuszenia sejsmicznego. Podczas badań eksperymentalnych mierzono za pomocą czujnika laserowego przemieszczenia szczytu i podstawy konstrukcji utwierdzonej oraz konstrukcji z wibroizolacją. Wyniki badań przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Stanowisko eksperymentalne do badań sejsmicznych: a) widok ogólny, b) model konstrukcji, c) wibroizolacja  
 Fig. 3. Setup of the shaking table experiment: a) general view, b) structural model, c) seismic isolation



Rys. 4. Przebiegi czasowe przemieszczeń dla trzęsienia ziemi El Centro:  
a) konstrukcja utwierdzona, b) konstrukcja z wibroizolacją

Fig. 4. Displacement time histories under the El Centro earthquake:  
a) fixed structure, b) isolated structure

Porównanie pomiędzy wykresami przemieszczeń dla konstrukcji utwierdzonej (rys. 4a) oraz konstrukcji z wibroizolacją (rys. 4b) wskazuje na to, że:

- użycie elementów polimerowych jako wibroizolacji sejsmicznej skutkuje wytłumieniem drgań szczytu konstrukcji podczas trzęsienia ziemi,
- ekstremalne przemieszczenie relatywne pomiędzy podstawą a szczytem konstrukcji jest znacząco zredukowane dla konstrukcji z wibroizolacją; wartość ta dla konstrukcji utwierdzonej wyniosła 12,1 mm, zaś w przypadku konstrukcji z wibroizolacją 9,9 mm, więc redukcja wyniosła 18,2%.

#### 4. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących efektywności zastosowania polimerów do elementów wibroizolacji sejsmicznej. W celu sprawdzenia własności dynamicznych masy polimerowej wykonano wstępne badania na specjalnym stanowisku do dynamicznego ściskania i rozciągania. Dalsze testy wykonano na stole sejsmicznym, poddając wymuszeniom sejsmicznym model konstrukcji wieżowej z wibroizolacją oraz bez wibroizolacji w celu porównania odpowiedzi uzyskanych w obu przypadkach.

Wyniki badań dynamicznego ściskania i rozciągania pokazują, że testowany polimer wykazuje mniejszą sztywność dla małych przemieszczeń oraz efekt wzmocnienia przy dużych poziomach odkształceń. Otrzymane pętle histerezy świadczą o dobrych właściwościach materiału do rozpraszania energii podczas wymuszenia dynamicznego. W wyniku badań przeprowadzonych na stole sejsmicznym uzyskano wytłumienie drgań szczytu konstrukcji z wibroizolacją podczas trzęsienia ziemi, a w efekcie znaczną redukcję ekstremalnych wartości relatywnych przemieszczeń pomiędzy podstawą a szczytem konstrukcji. Wyniki badań wskazują zatem, że zastosowanie metody wibroizolacji w postaci elementów polimerowych może być bardzo efektywną metodą ochrony budowli przed zniszczeniem podczas trzęsień ziemi.

Opisany w niniejszym artykule eksperyment na stole sejsmicznym przeprowadzono dla relatywnie małego modelu konstrukcji. Potrzebne są zatem dalsze badania z zastosowaniem większych modeli rzeczywistych konstrukcji budowlanych w celu weryfikacji uzyskanych wyników. Interesujące byłoby też zbadanie wpływu obciążenia pionowego elementów polimerowych na ich własności tłumiące, który to wpływ występuje w konstrukcjach rzeczywistych.

#### Literatura

- [1] Chopra A., *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA 1995.
- [2] Jankowski R., *Nonlinear rate dependent model of high damping rubber bearing*, Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 1, 2003, 307-403.
- [3] Dolce M., Cardone D., Ponzio C., *Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 36, 2007, 573-569.
- [4] Ragni L., Dezi L., Dall'Asta A., Leoni G., *HDR devices for seismic protection of frame structures: Experimental results and numerical simulations*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 38, 2009, 1199-1217.



- [5] Samali B., Wu Y., Li J., *Shake table tests on a mass eccentric model with base isolation*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 32, 2003, 1353-1372.
- [6] Kwiecień A., Zając B., Jankowski R., *Static and dynamic properties of a flexible joint working in cracked historical masonries*, Proc. of 6th International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, Bath, 2–4 July 2008, Taylor & Francis/CRCPress/Balkema, vol. 2, London 2008, 931-939.