

# Technologia budowy domów drewnianych o konstrukcji szkieletowej odpornych na wpływy dynamiczne

## Eksperymentalne badania modeli ścian zewnętrznych

Mgr inż. Marcin Szczepański, dr hab. inż. Robert Jankowski, prof. nadzw. PG  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Przygotowanie procesu inwestycyjnego w dużej mierze zależy od technologii budowy, w ramach której istotną rolę pełni dobór właściwych materiałów budowlanych. W przypadku technologii budowy małych domów jednorodzinnych odpornych na wpływy dynamiczne, w tym na wymuszenia sejsmiczne i parasejsmiczne [10, 11], jednym z najbardziej atrakcyjnych materiałów jest drewno. Technologia drewnianego budownictwa szkieletowego jest chyba najszybciej rozwijającą się technologią budownictwa jednorodzinnego zarówno w Polsce, jak i w innych krajach na świecie. Przekonanie inwestorów o ekologicznej i energooszczędnej funkcji takich konstrukcji wykorzystywanych przy budowie coraz bardziej popularnych domów pasywnych na pewno potęguje ten rozwój [5].

Prawidłowo zaprojektowane konstrukcje wykazują również relatywnie dobrą odporność na oddziaływania dynamiczne, w tym nawet na ekstremalne trzęsienia ziemi [9]. Jako poszycie ścian, stropów i dachów drewnianych domów szkieletowych stosuje się przede wszystkim wilgocioodporne płyty drewnopochodne, np. MFP lub OSB/3. Płyty te ze względu na swoje dobre właściwości wytrzymałościowe usztywniają całą konstrukcję, a dzięki odporności na siły ścinające oraz krótkiemu okresowi drgań własnych zmniejszają działającą siłę przekazywaną na konstrukcję podczas wymuszenia dynamicznego [9].

Z zebranych w Ameryce Północnej i Japonii doświadczeń wynika, że domy drewniane niekiedy są w stanie przetrwać katastroficzne trzęsienia ziemi jedynie z niewielkimi uszkodzeniami [9]. Bardzo efektywnym rozwiązaniem konstrukcyjnym zarówno w krajach aktywnych, jak i nieaktywnych sejsmicznie jest zastosowanie sklejki jako paneli ściennych. Zastosowanie tego materiału wpływa korzystnie na poziome ścinanie oraz rozprasza energię, prowadząc tym samym do usztywnienia konstrukcji [6, 7]. Domy szkieletowe są relatywnie sztywne, a tym samym odporne na oddziaływania dynamiczne, przenoszone przez grunt, np. ekstremalne trzęsienia ziemi, a także obciążenia parasejsmiczne i impaktowe [2, 8].

Podczas trzęsień ziemi wielokrotnie obserwowano i wyodrębniono mechanizmy zniszczenia konstrukcji drewnianych domów szkieletowych. Stopień zniszczenia dokonanego w danym budynku drewnianym na skutek trzęsienia ziemi zależy od intensywności danego wstrząsu sejsmicznego [4].

Istotnym elementem prawidłowego użytkowania konstrukcji szkieletowych jest też izolacja cieplna. Zastosowane, w celu izolacji cieplnej szkieletu drewnianego, materiały mogą stanowić też jego znaczne usztywnienie. Dotyczy to w sposób szczególny pianki poliuretanowej. Celem niniejszego artykułu jest analiza efektywności zastosowania takiego rozwiązania poprzez porównanie zachowania się elementów ściennych, z których jeden wykonano w technologii tradycyjnej wypełniony wełną, drugi natomiast wypełniono pianką poliuretanową. Efekt ten zrealizowano, wykonując badania eksperymetalne, w trakcie których

poddawano wymuszeniom harmonicznym oba fragmenty zewnętrznych ścian konstrukcyjnych drewnianego budynku szkieletowego.

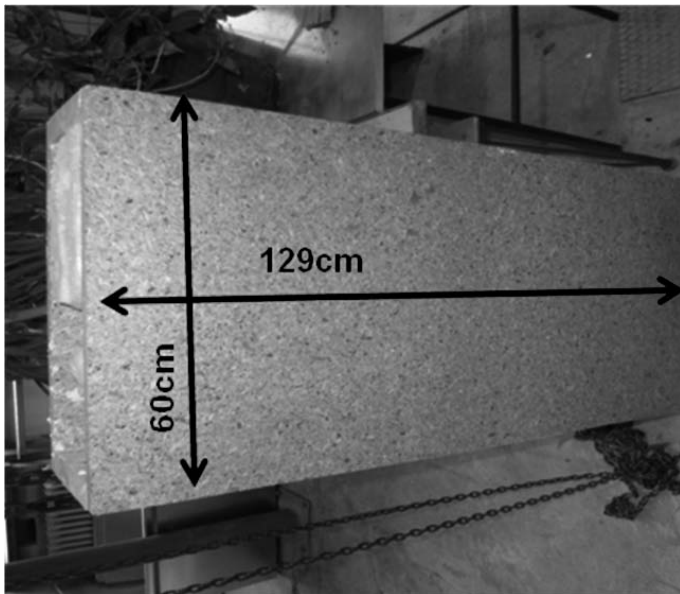
### OPIS STANOWISKA DO BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W badaniach eksperymetalnych użyto specjalnie w tym celu zaprojektowanego stanowiska badawczego znajdującego się w laboratorium Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej (rys. 1). Stanowisko składa się z utwierdzonej do podłoża ramy stalowej o wymiarach  $3,0 \times 0,50$  m oraz przyspawanego prostopadle do niej uchwyty mocującego o wymiarach  $1,50 \times 0,60$  m, umożliwiającego testowanie specjalnie przygotowanych w tym celu elementów ściennych. Po jednej ze stron ramy stalowej jest zamocowany siłownik firmy PARKER o skoku 0,5 m, maksymalnym przyspieszeniu  $10 \text{ m/s}^2$  i maksymalnej sile 45 kN. Parametry zaprojektowanego stanowiska umożliwiają przeprowadzenie badań zniszczeniowych drewnianych elementów ściennych.

Do celów badań eksperymetalnych wykonano dwa modele ścian zewnętrznych drewnianego budynku szkieletowego (rys. 2). Modele wykonano w całości z drewna, opierając się przy tym na modularnym rozstawie belek drewnianego budynku szkieletowego wynoszącym 60 cm. Jeden z elementów wykonano w technologii tradycyjnej (wypełnienie między-szkieletowe wełną mineralną), natomiast drugi w szkielecie obustronnie obitym płytami OSB3 wypełniono pianką poliuretanową. Podstawowe wymiary każdego z modeli to: długość 129 cm, szerokość 60 cm (rys. 2). W celu jednostronnego utwierdzenia modelu na jednej z krawędzi ramy mocującej wykonano specjalne mocowanie pozwalające przykręcić model do ramy śrubami o średni-



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego z zamocowanym elementem ściennym



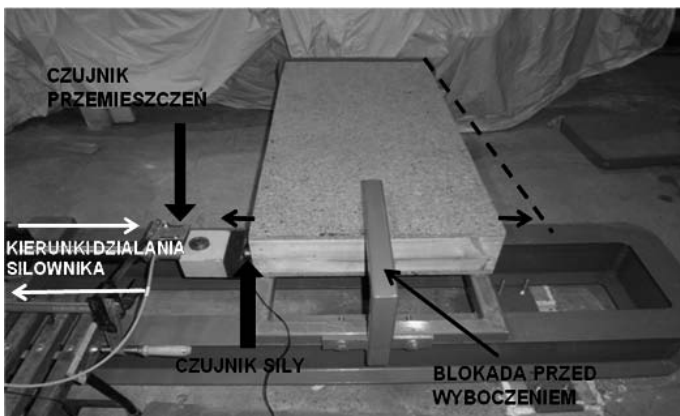
Rys. 2. Widok modelu ściany drewnianego budynku szkieletowego (wypełnienie pianką poliuretanową)

cy 10 mm. Po drugiej stronie mocowania wykonano blokadę zabezpieczającą górną płaszczyznę elementu przed wyboczeniem w trakcie wykonywanych badań (rys. 3).

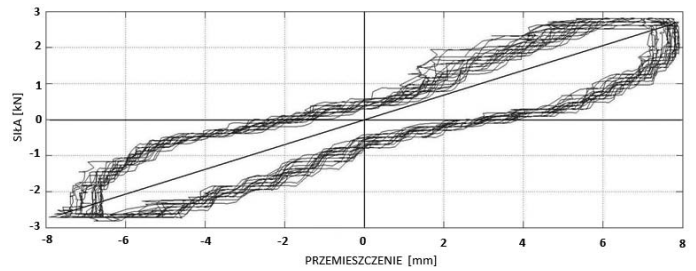
### OPIS PRZEPROWADZONYCH BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Podczas badań eksperymentalnych oba modele poddano wymuszeniom harmonicznym. Badania przeprowadzono przy częstotliwości:  $f = 0,5$  Hz;  $f = 1,0$  Hz;  $f = 2,0$  Hz;  $f = 5,0$  Hz przy różnej wartości zadanego przemieszczenia. Podczas każdego z przebiegów na elementach zamocowano czujnik siły KMM40 o maksymalnej sile mierzalnej 50 kN oraz laserowy czujnik przemieszczeń optoNCDT1302 o maksymalnym mierzalnym przemieszczeniu  $\pm 100$  mm, które rejestrowały pomiary dla zadanego wymuszenia dynamicznego (rys. 3).

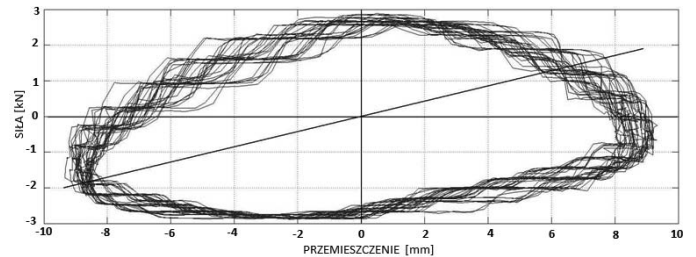
W pierwszym etapie badań na stanowisku zamocowano model wykonany w technologii tradycyjnej, wypełniony wełną mineralną. Model utwierdzono w narożnikach czterema śrubami o średnicy 10 mm oraz zabezpieczono przed wyboczeniem specjalną blokadą. Badanie polegało na przykładaniu wymuszeń harmonicznymi o przemieszczeniach z zakresu od 8 do 75 mm.



Rys. 3. Wyposażenie stanowiska badawczego



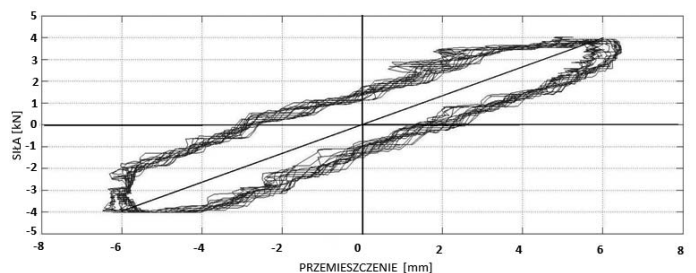
Rys. 4. Pętla histerezy przy częstotliwości 2 Hz (wypełnienie wełną mineralną)



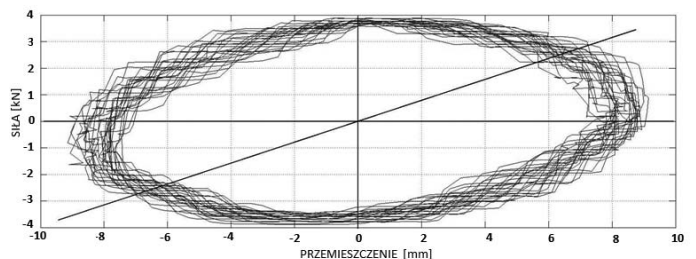
Rys. 5. Pętla histerezy przy częstotliwości 5 Hz (wypełnienie wełną mineralną)

Wartość zaprogramowanego przemieszczenia była przykładana z odpowiednią częstotliwością z zakresu od 0,5 do 5,0 Hz. Na podstawie badań uzyskano pętla histerezy dla każdego z zadanych wymuszeń. Na podstawie pętli wyliczono liczby tłumienia drgań oraz sztywności [3]. Przykładowe wyniki badań elementu wypełnionego wełną mineralną to: a)  $f = 2$  Hz; liczba tłumienia: 17,09%, sztywność: 416,66 kN/m (rys. 4) b)  $f = 5$  Hz; liczba tłumienia: 41,53%, sztywność: 232,55 kN/m (rys. 5).

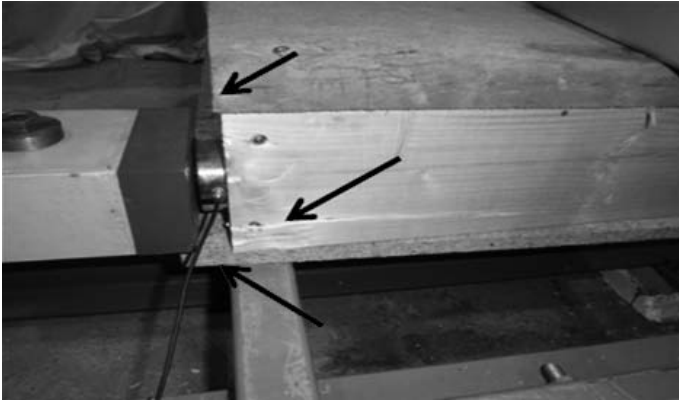
W drugim etapie na stanowisku zainstalowano model wypełniony pianką poliuretanową. Po utwierdzeniu i zabezpieczeniu modelu przed wyboczeniem przeprowadzono szereg pomiarów do zadanych wymuszeń odpowiadających wymuszeniom wygenerowanym w etapie pierwszym. Przykładowe wartości liczby tłumienia drgań oraz sztywności policzone na podstawie otrzymanych pętli histerezy [3] dla elementu wypełnionego pianką



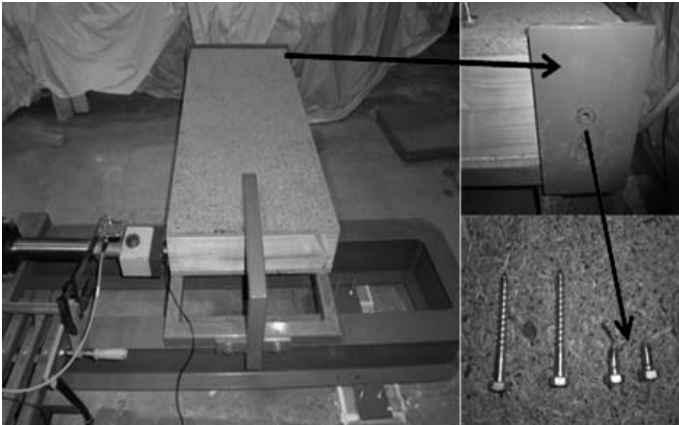
Rys. 6. Pętla histerezy przy częstotliwości 2 Hz (wypełnienie pianką poliuretanową).



Rys. 7. Pętla histerezy przy częstotliwości 5 Hz (wypełnienie pianką poliuretanową)



Rys. 8. Element nr 1 po badaniach



Rys. 9. Element nr 2 po badaniach

poliuretanową wyglądają następująco: a)  $f = 2$  Hz; liczba tłumienia: 22,25%, sztywność: 668,60 kN/m (rys. 6) b)  $f = 5$  Hz; liczba tłumienia: 66,40%, sztywność: 387,50 kN/m (rys. 7).

Dla elementu ściennego wypełnionego wełną badania przestały być miarodajne przy zadanej częstotliwości wymuszenia  $f = 2$  Hz i przemieszczeniu  $x = 28$  mm. Płyty poszycia podczas tak zadanego wymuszenia zaczęły odrywać się od szkieletu, w łącznikach scalających szkielet następowało powolne ścinanie prowadzące do ich luzowania, a tym samym do rozwarstwienia szkieletu (rys. 8).

Istotną zmianą w odpowiedzi konstrukcji elementu drugiego (z wypełnieniem pianką poliuretanową) było ścięcie śrub o średnicy 10 mm w miejscu utwierdzenia elementu na ramie mocującej, gdy zadane wymuszenie miało amplitudę większą niż 50 mm. Konstrukcja elementu wypełnionego pianką poliuretanową po przejściu przez wszystkie zadane wymuszenia pozostała jednak praktycznie nienaruszona (rys. 9).

## WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych uzyskano szereg pomiarów, na podstawie których utworzono pętle histerezy. Badania wykazały, że zastosowanie pianki poliuretanowej jako wypełnienia między-szkieletowego drewnianych ścian zewnętrznych budynku szkieletowego znacznie je usztywnia oraz dodatkowo zwiększa tłumienie. Przy zastosowaniu pianki poliuretanowej i zadanej częstotliwości wymuszenia 2 Hz liczba tłumienia wzrosła o 30,2%, natomiast sztywność

o 60,5%; przy zadanej częstotliwości wymuszenia 5 Hz liczba tłumienia wzrosła o 59,9%, natomiast sztywność o 66,6%. Analizując uzyskane wyniki w kontekście przykładowego spektrum odpowiedzi z Eurokodu 8 [1], wyraźnie nasuwają się wnioski stanowiące o potrzebie dosztywniania konstrukcji drewnianych, a tym samym zwiększania częstotliwości drgań własnych takich konstrukcji. Postępując w ten sposób, dążymy do sytuacji, w której nasza konstrukcja podczas trzęsienia ziemi przemieszcza się razem z gruntem, wykazując relatywnie małe odkształcenia. Z tego punktu widzenia wypełnienie przestrzeni między szkieletem ściany drewnianego budynku szkieletowego pianką poliuretanową wydaje się być bardzo efektywnym rozwiązaniem, które prowadzi do zwiększenia sztywności konstrukcji i dodatkowo do zwiększenia tłumienia drgań.

W najbliższym czasie planuje się wykonanie dokładnych analiz numerycznych do rzeczywistej konstrukcji domu drewnianego z wypełnieniem w postaci pianki poliuretanowej celem weryfikacji uzyskanych wniosków. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań eksperymentalnych posłużą do kalibracji modelu numerycznego.

## LITERATURA

1. ECS, Eurocode 8: Design Provisions for earthquake resistance of structures. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 1998.
2. Jankowski R.: Badania dynamiczne modeli konstrukcji budowlanych na stole wstrząsowym, Czasopismo Techniczne, 2-B/2007, 29-37.
3. Jankowski R.: **Nonlinear rate dependent model of high damping rubber bearing**. Bulletin of Earthquake Engineering EAEE, Vol. 1, No. 3, 2003, 397-403.
4. Kiyono J., Furukawa A.: Casualty occurrence mechanism in the collapse of timber-frame house during an earthquake. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 33, 2004, 1233-1248.
5. Nitka W.: Mój dom z drewna. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2010.
6. Pei S., Van de Lindt J. W.: Coupled shear-bending formulation for seismic analysis of stacked wood shear wall systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 38, 2009, 1631-1647.
7. Seo J-M., Choi I-K., Lee J-R.: Experimental study on the aseismic capacity of a wooden house using shaking table. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, 1999, 1143-1162.
8. Szczepański M., Jankowski R.: **Experimental dynamic study on a timber-frame house using shaking table**. [W:] Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures and Concrete Technology, Gdansk University of Technology, Gdańsk 2011, 155-162.
9. Toratti T.: Seismic design of timber structures. FEMA, 1994.
10. 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, nr 1/2005, 3-9.
11. Zembaty Z., Jankowski R., Cholewicki A., Szulc J., Trzęsienie ziemi 30 listopada 2004 r. na Podhalu oraz jego wpływ na obiekty budowlane. Inżynieria i Budownictwo, nr 9/2005, 507-511.

**PODZIĘKOWANIE:** Autorzy pragną podziękować Panu Maciejowi Wysokińskiemu z firmy budowlanej STOLKAL za wykonanie modeli do badań eksperymentalnych. Słowa podziękowania kierowane są również do Pana Bohdana Kowalewskiego za pomoc przy realizacji badań eksperymentalnych.