

## STRESZCZENIE

W niniejszej dysertacji opisano wyniki kompleksowych badań dotyczących wybranej technologii budowy szkieletowych domów drewnianych odpornych na oddziaływania sejsmiczne, w której zastosowano piankę poliuretanową jako wypełnienie międzyszkieletowe. Badania objęły testy eksperymentalne oraz dokładne analizy numeryczne z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej. Wyniki odpowiedzi dynamicznej domu z izolacją w postaci pianki poliuretanowej porównano z wynikami dla typowego rozwiązania, w którym jako izolację zastosowano wełnę mineralną.

W części pierwszej pracy przybliżono zagadnienie technologii budowy domów drewnianych szkieletowych oraz wykonano wstępne badania eksperymentalne modelu drewnianego budynku szkieletowego na stole wstrząsowym. Wyniki tych badań pokazały, iż obiekt wykazuje dobrą odporność sejsmiczną z uwagi na niemalże proporcjonalny wzrost wartości ekstremalnej odpowiedzi konstrukcji, z jednoczesnym brakiem widocznych uszkodzeń podczas kolejnych etapów prowadzonych badań. Badania te z uwagi na brak możliwości zastosowania materiałów izolacyjnych nie mogą być jednak podstawą do oceny sejsmicznej rzeczywistego domu drewnianego szkieletowego.

Następnie, szczegółowo zaprezentowano badania eksperymentalne paneli ściennych drewnianego budynku szkieletowego w dwóch wariantach izolacji (wełna mineralna i pianka poliuretanowa) pod obciążeniem harmonicznym. Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym w tym celu stanowisku badawczym dla częstotliwości 2,0 Hz dla różnych wartości przemieszczeń. Dla każdego z testów otrzymano pętle histerezy. Na ich podstawie obliczono wartość współczynnika tłumienia oraz sztywność. Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, iż zastosowanie pianki poliuretanowej prowadzi do wzrostu liczby tłumienia badanego panelu ściennego, a także wzrostu sztywności, co świadczy o pozytywnym wpływie pianki w kontekście obciążeń dynamicznych. Zastosowanie pianki poliuretanowej spowodowało bowiem połączenie poszczególnych elementów panelu w jedną całość. Jednocześnie, właściwości tłumiące pianki przyczyniły się do wzrostu tłumienia całego badanego panelu ściennego. Wyniki badań wykorzystano do zaproponowania numerycznego modelu ściany.

W drugiej części pracy opisano badania właściwości materiałowych wełny mineralnej oraz pianki poliuretanowej. W ramach badań wykonano testy statyczne ściskania i rozciągania, dynamiczną analizę mechaniczną (DMA) oraz różnicową kalorymetrię skaningową. Badania

statyczne pokazały nieliniowe zachowanie się pianki poliuretanowej. Badania DMA pozwoliły na uzyskanie parametrów termomechanicznych badanych materiałów izolacyjnych. Wyniki tych badań pokazały iż, wartość modułu zachowawczego jak i modułu stratności dla pianki poliuretanowej jest większa w porównaniu z wełną mineralną, co jest niewątpliwie korzystną kwestią z punktu widzenia parametrów mechanicznych materiału. Z kolei, badania z wykorzystaniem różnicowej kalorymetrii skaningowej pokazały iż, pianka poliuretanowa wykazuje jedynie nieznaczne pogorszenie się parametrów materiałowych na skutek procesu starzenia się materiału.

Następnie, przedstawiono wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem MES. Najpierw zaproponowano modele ścian w dwóch wariantach izolacji oraz wykonano kalibrację modeli numerycznych porównując pętle histerezy otrzymane z analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych. Na podstawie modeli paneli ściennych zaproponowano numeryczny model rzeczywistej konstrukcji drewnianego budynku szkieletowego w dwóch wariantach izolacji. Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie analizy modalnej dla obu modeli celem porównania częstotliwości drgań własnych oraz analiz dynamicznych przy wymuszeniu zapisami różnych trzęsień ziemi. Nieliniowy model materiałowy dla pianki poliuretanowej przyjęto w oparciu o wyniki badań materiałowych przedstawionych w rozdziale V. Przeprowadzono szereg numerycznych analiz sejsmicznych oraz porównano przemieszczenia i przyspieszenia w wybranych węzłach referencyjnych zlokalizowanych w narożach budynku oraz w punktach kalenicy. Wyniki analiz numerycznych potwierdziły korzystny wpływ zastosowania pianki poliuretanowej jako wypełnienia między-szkieletowego budynku drewnianego. Widać to zarówno w wynikach analizy modalnej (wyższe częstotliwości drgań własnych) jak i analizach sejsmicznych, w wyniku których w większości przypadków uzyskano znaczną redukcję ekstremalnych wartości przemieszczeń oraz przyspieszeń.

Wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych przedstawione w niniejszej dysertacji potwierdzają tezę podaną w rozdziale I, iż zastosowanie pianki poliuretanowej jako wypełnienia między-szkieletowego domu drewnianego prowadzi do zwiększenia sztywności całego obiektu, a także wzrostu tłumienia drgań, co skutkuje znacznym zwiększeniem odporności sejsmicznej konstrukcji.

## **ABSTRACT**

The present thesis presents results of complex study on the chosen technology of constructing timber-frame houses resistant to seismic excitations, in which polyurethane foam is used for skeleton filling. The study covers experimental tests and extensive numerical analyses with material nonlinearity taken into account. The results of the polyurethane foam insulated building's dynamic response is compared to a common technology, in which mineral wool is used for insulation.

The first chapter of the thesis covers the issues of timber-frame house construction technology and involves initial study performed on a shaking table for a timber-frame house model. Results of the experiment have shown good seismic resistance of the model due to a nearly proportional increase in the peak response with simultaneous lack of any visible damage during the consecutive stages of tests. However, because different insulation materials could not be applied in the model, the results of the study can not be treated as a base for the seismic assessment of a real structure.

Next, experimental study on timber-frame building's wall panels with two different insulation materials (mineral wool and polyurethane foam) subjected to harmonic load is described in detail. The experiment was conducted on a specially designed test rig for 2,0 Hz frequency for different amplitudes of displacement. For each test, a hysteresis loop was developed. On this basis, damping ratio and stiffness coefficient were calculated. Results of the study have indicated that the use of polyurethane foam leads to the increase in damping ratio as well as in stiffness of tested wall panel, what proves a positive influence of the foam from the point of view of dynamic resistance. The application of polyurethane foam has led the individual panel members to be connected together into one element. At the same time, the foam's damping properties have caused damping of the whole wall panel to increase. The results of the study have been used to propose a numerical model of a wall.

The second part of dissertation describes the study on material properties of mineral wool and polyurethane foam. Several static tests (compression and tension), dynamic mechanical analysis (DMA) and differential scanning calorimetry were conducted as a part of the study. Static tests have exhibited the polyurethane foam's nonlinear behaviour. With the DMA testing, thermomechanical parameters of the examined insulation materials have been obtained. Results of the tests have shown that the values of both storage and loss modules are larger for the

polyurethane foam than for the mineral wool, what is undisputedly a positive outcome when taking material's mechanical parameters into consideration. In turn, the differential scanning calorimetry have exhibited only a slight deterioration of polyurethane foam's material parameters in the context of time related degradation.

Afterwards, results of the numerical analyses, using the finite element method, have been presented. Firstly, wall models with two insulation materials were proposed. Calibration of the numerical models was conducted by comparing the hysteresis loops received from the numerical analysis and experimental study. A numerical model of a real timber-frame building with two insulation materials was proposed on the basis of the wall panel models. The next research stage involved conducting a modal analysis for both models, in order to compare the natural frequencies, and dynamic analyses for different earthquake excitations. Nonlinear material model for the polyurethane foam was assumed based on results of the material study presented in chapter V. A number of seismic analyses were carried out and displacements as well as accelerations in selected reference nodes, located in building's corners and points of the roof ridge, were compared. Results of the numerical analyses have confirmed the positive influence of using polyurethane foam for the skeleton filling in a timber-frame building. It is evident through both modal analyses (higher natural frequencies values) and seismic analyses, which resulted in reduction in peak displacement and acceleration values.

Results of the experimental study and numerical analyses presented in this dissertation indicate that the application of polyurethane foam for a skeleton filling of the timber-frame building leads to the increase in stiffness as well as damping of the whole structure, which results in a considerable increase in the seismic resistance of the structure.