

dr inż. Marek Lehmann^{1)*}

ORCID: 0000-0002-1314-3014

dr inż. Marek Ziarkiewicz¹⁾

ORCID: 0000-0002-0118-9365

Investigation of timber frame walls loaded horizontally in their plane

Badania drewnianych ścian szkieletowych obciążonych poziomo w płaszczyźnie

DOI: 10.15199/33.2025.07.11

Abstract. In cooperation with the manufacturer of modular houses and timber structures, tests were carried out on timber frame walls covered with gypsum-fiber board loaded with horizontal force in their plane. Various wall variants were tested: walls in which the sheathing was connected to the structure with staples, screws or nails, walls with or without stiffening wooden cross-braces. As a result, the results of the tests were the determination of the maximum horizontal force and stiffness of the tested walls. It was found that the gypsum-fibre board cladding is the main factor influencing the maximum horizontal force. At the same time, it was observed that connecting the cladding to the frame with screws allows for obtaining higher values of horizontal force by approx. 25% compared to connections with nails and staples. The presence of the brace did not contribute to the increase in horizontal force but improved the stiffness of the walls under consideration.

Keywords: timber structures; modular buildings; horizontal force; stiffness

Streszczenie. We współpracy z producentem domów modułowych i konstrukcji drewnianych przeprowadzono testy drewnianych ścian szkieletowych pokrytych płytą gipsowo-włóknową obciążonych siłą poziomą w ich płaszczyźnie. Testowano ściany, w których poszycie łączono z konstrukcją za pomocą zszywek, wkrętów lub gwoździ oraz ściany z drewnianymi usztywnieniami lub bez nich. Rezultatem badań było określenie maksymalnej siły poziomej i sztywności badanych ścian. Stwierdzono, że poszycie z płyty gipsowo-włóknowej stanowi główny czynnik wpływający na maksymalną siłę poziomą. Jednocześnie zaobserwowano, że łączenie poszycia ze szkieletem wkrętami pozwala uzyskać większe wartości siły poziomej o ok. 25% w porównaniu z połączeniami na gwoździe oraz zszywki. Występowanie zastrzału nie przyczyniło się do zwiększenia siły poziomej, ale poprawiło sztywność rozpatrywanych ścian.

Słowa kluczowe: konstrukcje drewniane; budynki modułowe; siła pozioma; sztywność.

One way to reduce CO₂ emissions in construction is to use pro-ecological materials, such as wood [1 ÷ 4]. Modular wooden construction is becoming increasingly popular in the world, not only for ecological reasons, but also due to the rapid implementation of construction projects and significant reduction of waste [5 ÷ 10].

In the Scandinavian countries, most wooden residential houses are built of lightweight wooden frame walls and a roof in which the structural elements are slender wooden trusses. The walls carry not only vertical loads, but also horizontal loads from wind. In recent years, the use of large-sized wooden frame modules for the construction of multi-storey buildings has been observed. In the case of such buildings, the horizontal forces acting on the shear walls are much greater than in the case of single-storey buildings. Although the standardization and formalization of design practices and the degree of prefabrication have increased significantly in recent decades, further research on wooden frame walls is still advisable [11 ÷ 16].

As part of the research and development project [17], carried out in partnership with a company specializing in the prefabrication of wooden structures, tests were carried out on walls with a wooden frame with a gypsum-fiber board sheathing, loaded with a horizontal force in the plane until

Jednym ze sposobów redukcji emisji CO₂ w budownictwie jest stosowanie proekologicznych materiałów, takich jak drewno [1 ÷ 4]. Modułowe budownictwo drewniane cieszy się coraz większą popularnością na świecie nie tylko ze względów ekologicznych, ale także z powodu szybkiej realizacji obiektów budowlanych oraz znacznej redukcji odpadów [5 ÷ 10].

W krajach skandynawskich większość drewnianych domów mieszkalnych zbudowana jest z lekkich ścian drewnianych o konstrukcji ramowej oraz dachu, w którym elementy konstrukcyjne stanowią smukłe kratownice drewniane. Ściany przenoszą nie tylko obciążenia pionowe, ale także poziome od oddziaływania wiatru. W ostatnich latach obserwuje się stosowanie wielkogabarytowych modułów o konstrukcji drewnianej do wznoszenia budynków wielokondygnacyjnych. W przypadku takich budynków siły poziome działające na ściany usztywniające są znacznie większe niż w przypadku budynków parterowych. Mimo że w ostatnich dziesięcioleciach standaryzacja i formalizacja praktyk projektowych oraz stopień prefabrykacji znacznie się zwiększyły, nadal są wskazane dalsze badania drewnianych ścian o konstrukcji ramowej [11 ÷ 16].

W ramach projektu badawczo-rozwojowego [17], realizowanego w partnerstwie z przedsiębiorstwem specjalizującym się w prefabrykacji konstrukcji drewnianych, przeprowadzono badania ścian o szkielecie drewnianym z poszyciem z płyty gipsowo-włóknowej, obciążonych siłą poziomą w płaszczyźnie aż do zniszczenia. Ich celem było określenie

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

^{*)} Correspondence address: marek.lehmann@tu.koszalin.pl

failure. Their aim was to determine the best connector between the sheathing board and the wooden frame, based on the displacements, deformations and damages of the walls under the influence of the acting load and their maximum load-bearing capacity.

Research program and method

In order to determine the best connector between the new cladding plate and the structure and to optimize the walls in terms of stiffness, the side walls of the modules measuring 3.0 x 3.0 m were subjected to tests. A special stand was designed for the tests. The frame in which the walls were placed was made of HEB300 steel elements connected with M24 screws. Additionally, the elements constituting the wall supports, sensor holders, actuator mounting and limiters of displacement from the wall plane were also implemented. The actuator was placed on a separate element independent of the frame. The load was applied in the upper strip at a height of approx. 3.0 m. The walls were subjected to a point load using a hydraulic actuator. The test method included measuring wall displacements using inductive sensors connected to the SAD-256 data acquisition system and the GOM PONTOS system.

The tests were carried out using 8 PS-type displacement sensors with a range of 300 mm and a CL-16 tensometric force sensor with a range of 200 kN (Figure 1). The walls were tested statically. A horizontal force was applied in the upper part with an increment of approx. 1 kN/min. Sensor 1 recorded the force transferred to the wall, sensors 2 and 3 were used to control the even transfer of force to the element, and sensors 4 – 7 recorded the main displacements of the wall, which were used for the analysis. Sensor 8 did not show significant values and was therefore omitted from the analysis. The GOM PONTOS optical system was also used to measure the displacements. Special round markers were placed on the walls. The measurement covered the entire walls.

najlepszego łącznika między płytami poszycia a szkieletem drewnianym, na podstawie przemieszczeń, odkształceń i uszkodzeń ścian pod wpływem działającego obciążenia oraz ich maksymalnej nośności.

Program i metoda badań

W celu określenia najlepszego łącznika między płytą okładzinową a konstrukcją oraz optymalizacji ścian pod kątem sztywności badaniom poddano ściany boczne modułów o wymiarach 3,0 x 3,0 m. Na potrzeby badań zaprojektowano specjalne stanowisko. Rama, w której umieszczano ściany, została wykonana z elementów stalowych o przekroju HEB300 łączonych na śruby M24. Dodatkowo zrealizowano również elementy stanowiące podpory ścian, uchwyty czujników, mocowanie siłownika oraz ograniczniki przemieszczenia z płaszczyzny ściany. Siłownik umieszczono na osobnym elemencie niezależnym od ramy. Obciążenie przyłożono w pasie górnym na wysokości ok. 3,0 m. Ściany poddano punktowemu obciążeniu za pomocą siłownika hydraulicznego. Metoda badań obejmowała pomiar przemieszczeń ściany za pomocą indukcyjnych czujników podłączonych do systemu akwizycji danych SAD-256 oraz systemu GOM PONTOS.

Do badań zastosowano 8 czujników przemieszczeń typu PS o zakresie 300 mm oraz tensometryczny czujnik siły CL-16 o zakresie 200 kN (rysunek 1). Ściany badano w sposób statyczny. Siłę poziomą przyłożono w górnej części z przyrostem ok. 1 kN/min. Czujnik 1 rejestrował siłę przekazywaną na ścianę, czujniki 2 i 3 służyły do kontroli równomiernego przekazywania siły na element, a czujniki 4 – 7 rejestrowały przemieszczenia główne ściany, które wykorzystano do analizy. Czujnik 8 nie pokazywał istotnych wartości i dlatego pominięto go w analizie. Do pomiaru przemieszczeń zastosowano również system optyczny GOM PONTOS. Na ścianach umieszczono specjalne okrągłe markery. Pomiarom objęto całe ściany.

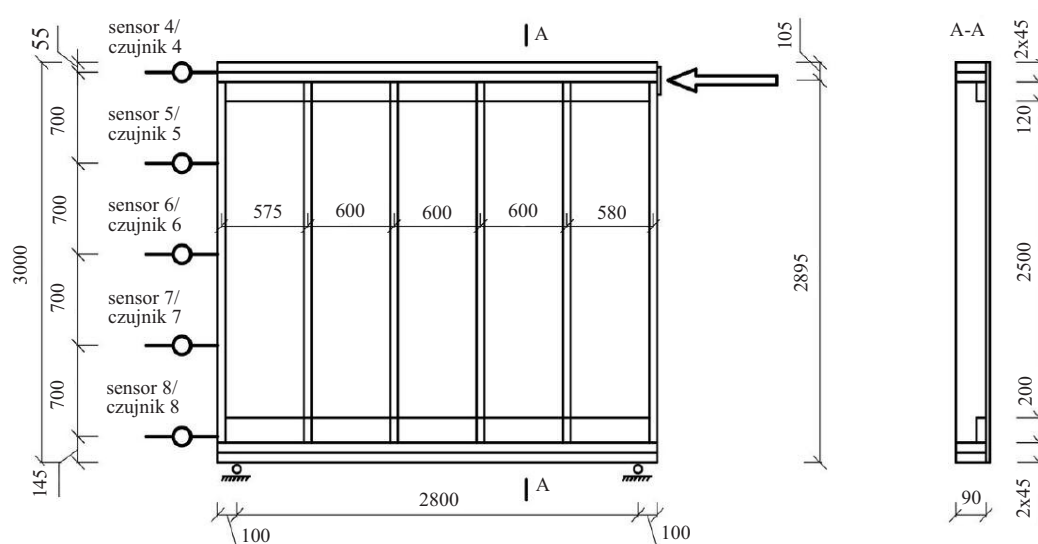


Fig. 1. Location of displacement sensors and force sensor

Rys. 1. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń oraz czujnika siły

The research programme included seven research elements, differing in the presence or absence of sheathing, type of fasteners, presence of braces and window openings. Detailed characteristics of the tested elements are presented in Table 1. All walls were of the same size with a dimensional proportion of $h/l = 1.0$. The sheathing was made of 12.5 mm thick gypsum-chip board, which was attached to the frame on one side. The cross-sectional dimensions of the posts are 45 x 90 mm, and the foundation consists of two elements with a cross-section of 45 x 90 mm laid flat and one element with a cross-section of 30 x 200 mm, and the upper chord consists of 3 elements: two with a cross-section of 45 x 90 mm laid flat and one element with a cross-section of 45 x 120 mm. The braces with a cross-section of 10 x 150 mm are fixed with nails in the upper and lower chords of the walls. Due to the innovative research station, the tests of the first walls allowed its testing.

Table 1. Characteristics of tested wall elements

Tabela 1. Charakterystyka badanych elementów ściennych

Name/Nazwa elementu	Thickness [mm]/Grubość [mm]	Connectors*/Łączniki*	Notes/Uwagi
90x	90	lack/brak	no plate cladding, no braces/brak poszycia z płyt, brak zastrzałów
90a	90	staples/zszywki	no braces/brak zastrzałów
90b	90	nails/gwoździe	no braces/brak zastrzałów
90c	90	screws/wkręty	no braces/brak zastrzałów
90za	90	staples/zszywki	one diagonal brace across the wall/jeden zastrzał po przekątnej ściany
90zb	90	nails/gwoździe	one diagonal brace across the wall/jeden zastrzał po przekątnej ściany
90zc	90	screws/wkręty	one diagonal brace across the wall/jeden zastrzał po przekątnej ściany

* – concerns the connection of the cladding to the wooden frame/* – dotyczy połączenia poszycia ze szkieletem drewnianym

Research results and their analysis

Static analysis of a 90 mm thick wall without cladding and braces, designated as 90x. The 90x wall allowed for verification of the test stand, including the actuator, force sensor, and displacement sensors. Measurement registration was carried out using the SAD-256 system. Figure 2 shows the relationship between the horizontal force P and the displacement for sensors 4 – 7. The analysis shows that the maximum displacement of 200 mm occurred at a force of about 1.4 kN, which means that the load-bearing capacity of the wooden frame under the action of the horizontal force is practically marginal.

Analysis of 90 mm thick walls without shots (walls 90a, 90b, 90c). Testing of the wall with sheathing. The SAD-256 system was used, and in the case of the 90c wall also the PON TOS system. Figure 3 shows the horizontal force P – a deflection relationship for the 90a wall. The maximum horizontal

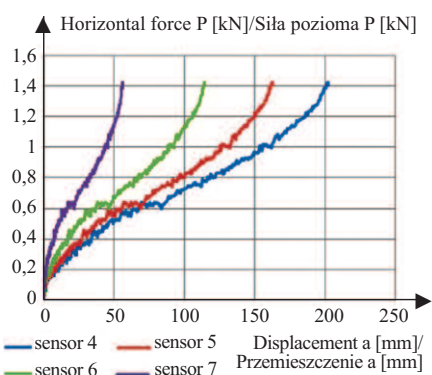


Fig. 2. Force – displacement relationship for a wall 90x

Rys. 2. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90x

Wyniki badań i ich analiza

Analiza statyczna ściany grubości 90 mm bez poszycia i zastrzałów oznaczonej jako 90x. Ściana 90x pozwoliła na weryfikację stanowiska badawczego, m.in. siłownika, czujnika siły oraz czujników przemieszczeń. Rejestrację pomiarową zrealizowano za pomocą systemu SAD-256. Na rysunku 2 przedstawiono zależność siła pozioma P – przemieszczenie a w przypadku czujników 4 – 7. Z analizy wynika, że maksymalne przemieszczenie 200 mm pojawiło się przy sile ok. 1,4 kN, co oznacza, że nośność na działanie siły poziomej szkieleto drewniane jest praktycznie marginalna.

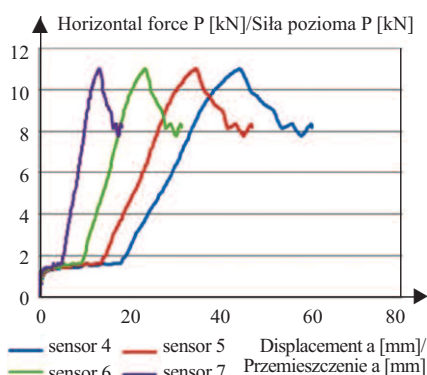


Fig. 3. Force – displacement relationship for a wall 90a

Rys. 3. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90a

Analiza ścian grubości 90 mm bez zastrzałów (ściana 90a, 90b, 90c). Badano ściany z poszyciem. Użyto systemu SAD-256, a w przypadku ściany 90c również PONTOS. Na rysunku 3 przedstawiono zależność siła pozioma P – ugięcie a w przypadku ściany 90a. Mak-

force is about 10 kN with a deflection of about 45 mm in the case of sensor 4. It should be noted that blocking the vertical displacement of the wall was achieved by means of steel elements attached to the bottom chord. During the tests, it was observed that the twisted lower chord was detached from the rest of the structure by a force of approximately 1.6 kN, which is shown in Figure 3. Therefore, the adopted concept of blocking the vertical sliding was rejected and the test results were treated as indicative.

In the case of wall 90b, where the boards were fastened with nails, the test stand was changed accordingly and the sliding lock was vertical was carried out by pressing the upper strip to the test stand. The displacements and forces were registered using the SAD-256 program in a similar way as in the case of the previously tested walls. In Figure 4 the dependence of the horizontal force P on the displacement a for four sensors is presented. No defects were observed in the test stand and no supporting elements disturbed the operation of the given wall. It was therefore concluded that only in the current phase of the test stand work was the wall work valid. The work of wall 90b was divided into two phases. The first is the situation at the initial stage of loading, where a linear increase in displacements can be observed in relation to the increase in force P . When the force reached a level of about 18 kN, the first cracks in the wall sheathing were observed, which resulted in a sudden, slight decrease in force. The maximum deflection at the end of the first phase was about 40 mm (sensor 4). From this point on, the wall continued to work in the second phase, which is characterized by a significant increase in displacements in relation to the constant or, to a small extent, abruptly changing value of the horizontal force. In the final stage of the second phase, significant displacements and separation of the skin from the steel frame were noted (photo 1), which resulted in a decrease in the force.

Figure 5 shows the dependence of P for the 90c wall, the sheathing of which was fixed with screws. This wall was also tested using the PONTOS system. The first phase of the work was carried out with a force of about 22 kN and the greatest deflection of 52 mm (sensor 4). This is therefore the greatest force value obtained in the tests of three walls. In the second phase, no increase in the horizontal force was observed. There was only a slight decrease to about 20 kN, and the test itself was not completed at a displacement of 75 mm. Wall destruction on the last stage of the tests is presented on the photo 2. The displacement vectors in the direction of the force P and perpendicular to the wall plane

symalna siła pozioma wynosi ok. 10 kN przy ugięciu ok. 45 mm w przypadku czujnika 4. Należy zaznaczyć, że blokowanie przemieszczenia ściany w kierunku pionowym realizowane było za pomocą elementów stalowych zamocowanych do pasa dolnego. W trakcie badania zaobserwowano, że skrępowany pas dolny odspaja się od reszty konstrukcji przy sile ok. 1,6 kN, co przedstawiono na rysunku 3. W związku z tym odrzucono przyjętą koncepcję blokowania przesuwu w kierunku pionowym, a wyniki badań potraktowano jako poglądowe.

W przypadku ściany 90b, w której płyty zostały zamocowane za pomocą gwoździ, stanowisko do badań odpowiednio zmieniono, a blokadę przesuwu pionowego realizowano przez docisk pasa górnego do stanowiska badawczego. Rejestrację przemieszczeń oraz siły realizowano za pomocą programu SAD-256 podobnie, jak w przypadku wcześniej badanych ścian. Na rysunku 4 przedstawiono zależność siły poziomej P od przemieszczenia a w przypadku czterech czujników. Nie zaobserwowano defektów stanowiska badawczego i żadne elementy wsparcze nie zaburzały pracy badanej ściany. Stwierdzono więc, że dopiero w obecnej fazie dopracowano stanowisko badawcze ścian. Pracę ściany 90b podzielono na dwie fazy. Pierwsza to sytuacja w początkowym etapie obciążania, gdzie można zauważyć liniowy przyrost przemieszczeń w stosunku do przyrostu siły P . Wraz z osiągnięciem siły na poziomie ok. 18 kN zaobserwowano pierwsze spękania

poszycia ścian, co skutkowało skokowym, niewielkim spadkiem siły. Maksymalne ugięcie pod koniec pierwszej fazy wynosiło ok. 40 mm (czujnik 4). Od tego momentu ściana pracowała w drugiej fazie, która charakteryzuje się znacznym przyrostem przemieszczeń w stosunku do stałej lub w niewielkim stopniu skokowo zmiennej wartości siły poziomej. W końcowym etapie drugiej fazy odnotowano znaczne przemieszczenia i odspojenia poszycia od szkieletu stalowego (fotografia 1), co skutkowało spadkiem siły.

Rysunek 5 przedstawia zależność P - a w przypadku ściany 90c, której poszycie zostało zamocowane za pomocą wkrętów. Ściana ta była badana również za pomocą systemu PONTOS. Pierwsza faza pracy została zrealizowana przy sile ok. 22 kN i największym ugięciu 52 mm (czujnik 4). Tym samym jest to największa wartość siły uzyskana w badaniach trzech ścian. W drugiej fazie nie zaobserwowano zwiększenia siły poziomej. Nastąpił jedynie lekki jej spadek do ok. 20 kN, a samo badanie zakończono przy przemieszczeniu 75 mm. Na fotografii 2 przedstawiono zniszczenie ściany w końcowym etapie badania. Analizowano wektory przemieszczeń w kierunku działania siły P oraz prostopadle do płaszczyzny ściany. Ich wartości przed-

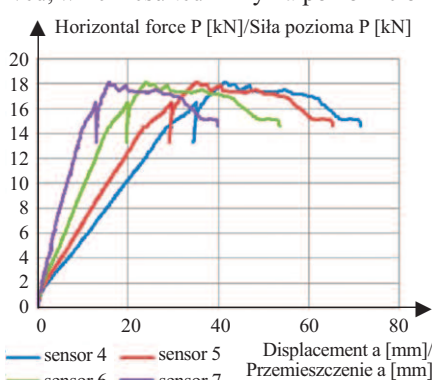


Fig. 4. Force – displacement relationship for a wall 90b

Rys. 4. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90b



Fot. 1. Zniszczone poszycie w miejscu łączenia z drewnianym szkieletem ściany 90b

Photo 1. Damaged cladding at the joint with the wooden frame of 90b wall

were analyzed. Their values were presented for the case of the maximum force P , i.e. the limit of the linear increase in load relative to displacements (end of the first phase). The vectors from Photograph 3 increase linearly with the increase in wall height, which is identical to the P - a graphs shown in Figure 5.

The largest displacements of the wall from the plane were observed at the extreme column directly adjacent to the actuator (Photograph 4). The value of the displacement vector was 5 mm in the case of the point at the middle of the column height. The displacements at the remaining points were insignificant and amounted to 2 – 3 mm.

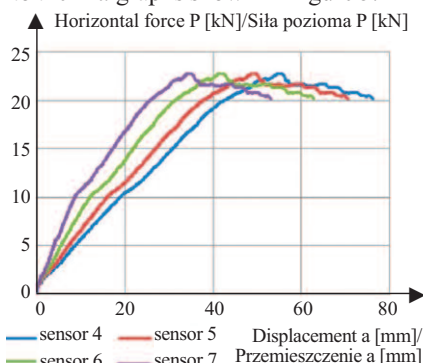


Fig. 5. Force – displacement relationship for a wall 90c

Rys. 5. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90c

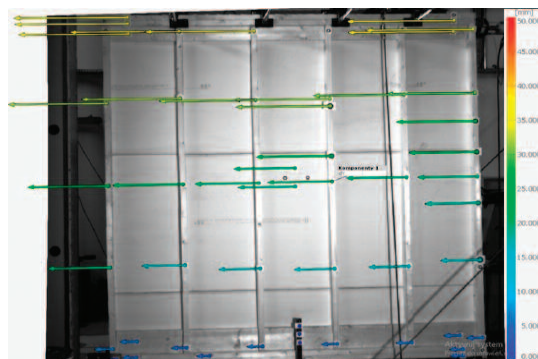


Photo 3. Displacement vectors in the direction of the horizontal force (end of the first phase) for the 90c wall

Fot. 3. Wektory przemieszczeń na kierunku działania siły poziomej (koniec pierwszej fazy pracy) w przypadku ściany 90c

In the case of the 90c wall, an alternative bar model was also made. Its purpose was to define the deformations and to interpret the compressed and tensioned elements. The model consisted of posts and upper and lower flanges. No significant increase in the deformations of the mentioned bars was observed, and their values were within the measurement tolerance of the PONTOS system.

Analysis of 90 mm thick walls with braces (walls for 90za, 90zb, 90zc).

Figure 6 shows the relationship between the horizontal force P and the deflection a in the case of four displacement sensors. The first phase of the element's operation ended at a level of approx. 16.5 kN, with a maximum displacement of approx. 30 mm (sensor 4). The second phase has a different course than in the previous cases, because after exceeding the linear relation P , the displacements increased, but with a clear increase in force, the

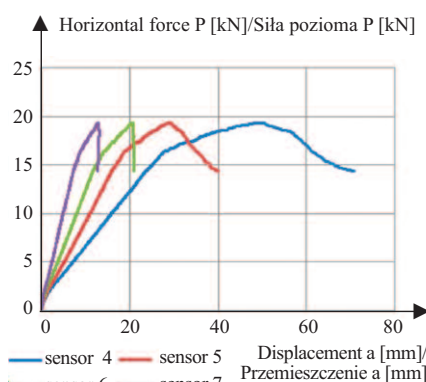


Fig. 6. Force – displacement relationship for a wall 90za

Rys. 6. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90za

stawiono w przypadku maksymalnej siły P , czyli granicy liniowego przyrostu obciążenia względem przemieszczeń (koniec fazy pierwszej). Wektory z fotografii 3 zwiększają się liniowo wraz ze wzrostem wysokości ściany, co jest tożsame z wykresami P - a przedstawionymi na rysunku 5. Największe przemieszczenia ściany

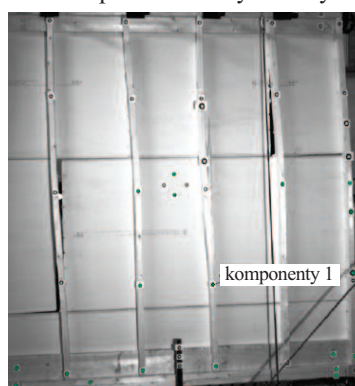


Photo 2. The form of destruction of wall 90c

Fot. 2. Postać zniszczenia ściany 90c

z płaszczyzny zaobserwowano w słupku skrajnym w bezpośrednim sąsiedztwie siłownika (fotografia 4). Wartość wektora przemieszczeń wyniosła 5 mm w przypadku punktu w połowie wysokości słupa. Przemieszczenia w pozostałych punktach były nieznaczne i wynosiły 2 – 3 mm.

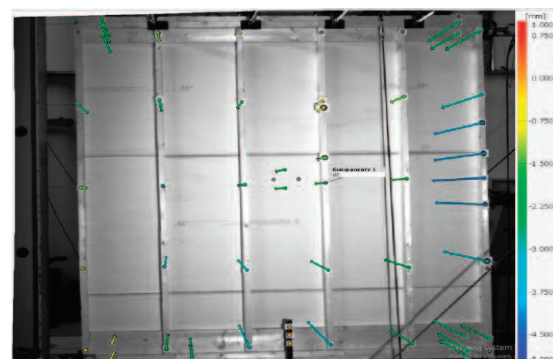


Photo 4. Displacement vectors in the direction perpendicular to the wall plane (end of the first phase)

Fot. 4. Wektory przemieszczeń na kierunku prostopadłym do płaszczyzny ściany (koniec pierwszej fazy pracy)

W przypadku ściany 90c wykonano również zastępczy model prętowy. Miał on na celu zdefiniowanie odkształceń oraz zinterpretowanie elementów ściskanych i rozciąganych. Model składał się ze słupków oraz pasów górnych i dolnych. Nie zaobserwowano dużego przyrostu odkształceń wymienionych prętów, a ich wartości mieściły się w tolerancji pomiarowej systemu PONTOS.

Analiza ścian grubości 90 mm z zastrzałami (ściana 90za, 90zb, 90zc).

Na rysunku 6 przedstawiono zależność pomiędzy siłą poziomą P i ugięciem a w przypadku czterech czujników przemieszczeń. Pierwsza faza pracy elementu kończyła się na poziomie ok. 16,5 kN, przy maksymalnym przemieszczeniu ok. 30 mm (czujnik 4). Faza druga ma inny przebieg niż w poprzednich przypadkach, gdyż po przekroczeniu liniowej relacji P - a następował przyrost przemieszczeń, ale przy wyraźnym wzroście siły, której maksymalna wartość wy-

maximum value of which was approximately 19.2 kN, and the maximum deflection was 55 mm. After reaching this value of force, it decreased, and the test itself did not end at the displacement of 70 mm.

In the examination of the 90z wall using the PONTOS system, no displacements of points defined on the walls were recorded. The largest displacement perpendicular to the plane of 5 mm was recorded in the middle of the wall. Due to the fact that some points were not defined by the PONTOS system, the substitute rod model was not complete. Only the deformation of the shot was analyzed.

In the case of the 90-tooth wall, in which nail fasteners were used, the first phase ended at a force level of about 17 kN (Figure 7) and a maximum deflection of 25 mm. In the second phase, the initial force increased to a maximum value of about 18 kN, and the deflection reached a value of 34 mm. Then, a drop in force was observed, and the test was not completed at a deflection of more than 80 mm (sensor 4). Photograph 5 shows the 90-bar wall at the end of each stage of the test, photo 6 shows

nosiła ok. 19,2 kN, a maksymalne ugięcie 55 mm. Po osiągnięciu tej wartości siły nastąpił jej spadek, a samo badanie zakończyło się przy przemieszczeniu 70 mm.

W badaniu ściany 90za za pomocą systemu PONTOS nie odnotowano przemieszczeń punktów zdefiniowanych na ścianach. Największe przemieszczenie prostopadłe do płaszczyzny o wartości 5 mm zarejestrowano w środku ściany. Ze względu na niezdefiniowanie części punktów przez system PONTOS, zastępczy model prętowy nie był kompletny. Analizowano jedynie odkształcenia zastrzału.

W przypadku ściany 90zb, w której użyto łączników w postaci gwoździ, faza pierwsza kończy się na poziomie siły ok. 17 kN (rysunek 7) i ugięciu maksymalnym 25 mm. W fazie drugiej siła początkowo zwiększyła się do wartości maksymalnej ok. 18 kN, a ugięcie osiągnęło wartość ok. 34 mm. Następnie zaobserwowano spadek siły, a badanie zakończono przy ugięciu ponad 80 mm (czujnik 4). Na fotografii 5 przedstawiono ścianę 90zb w końcowym etapie badania, na fotografii 6 jej zniszczenie, a na fotografii 7 zastępczy

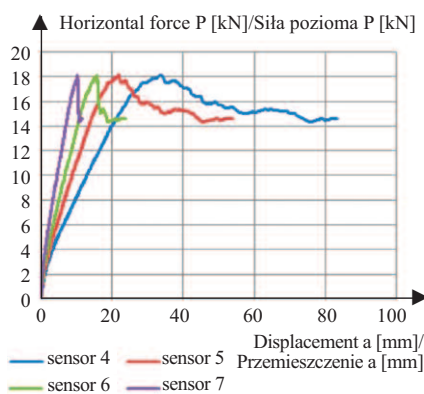


Fig. 7. Force – displacement relationship for a wall 90zb

Rys. 7. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90zb

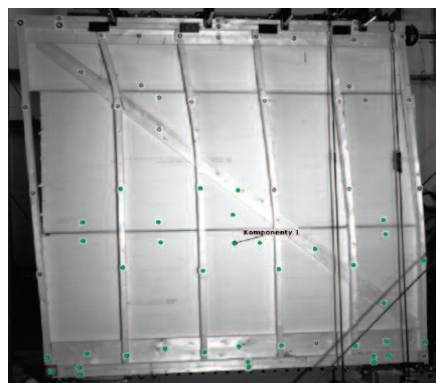


Photo 5. View of the 90zb wall in the final stage of the test

Fot. 5. Ściana 90zb w końcowym etapie badania

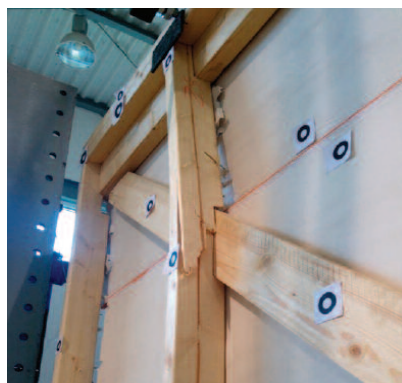


Photo 6. Detail of the destruction of the 90zb wall – separation of the cladding and a destroyed post

Fot. 6. Szczegół zniszczenia ściany 90zb – odspojenie poszycia i zniszczony słupek

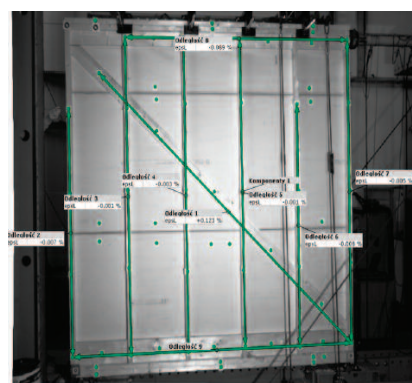


Photo 7. The adopted measurement bar system for a 90zb wall

Fot. 7. Zastępczy model prętowy ściany 90zb

its destruction, and photo 7 shows a substitute model of the 90-bar wall. No deformation was observed in the columns and the upper and lower flanges of the wall during the first phase of its operation and in the second phase, until the maximum horizontal force was achieved. The analysis of the 90-bar wall (screw connections) included only measurement using the SAD-256 program. Figure 8 shows the dependence of P - a in the case of four displacement sensors. The first phase of operation lasted until a force of 19.06 kN and a deflection of 36 mm were reached. Then, a momentary increase in displacement was noted at a constant force value and a later increase in force of a character close to linear,

model prętowy ściany 90zb. W słupkach oraz pasach górnym i dolnym ściany nie zaobserwowano odkształceń w pierwszej fazie jej pracy oraz w drugiej, do osiągnięcia maksymalnej siły poziomej. Analiza ściany 90zc (łączniki w postaci wkrętów) obejmowała tylko pomiar programem SAD-256. Na rysunku 8 przedstawiono zależność P - a w przypadku czterech czujników przemieszczeń. Pierwsza faza pracy występowała do osiągnięcia siły 19,06 kN i ugięcia 36 mm. Następnie odnotowano chwilowy przyrost przemieszczeń przy stałej wartości siły i późniejszy przyrost siły o charakterze zbliżonym do linio-

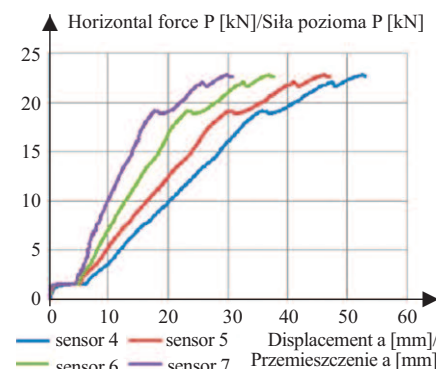


Fig. 8. Force – displacement relationship for a nl 90zc

Rys. 8. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ściany 90zc

but with a larger increase in displacement in relation to the smaller increase in force. Finally, the maximum force was about 22 kN, with a deflection of over 50 mm in the case of sensor 4.

A comparative analysis was performed for all 90 mm thick walls, the results of which are presented in Figure 9 and Table 2. Analysis of P-a curves showed that forces greater than 20 kN were obtained in the case of fastening with screws. Therefore, for further analysis of the walls in the main tests, among other things, due to achieving the highest horizontal forces, fasteners in the form of screws were adopted.

In the case of walls with fasteners in the form of staples and nails, a similar force value was achieved, i.e. approx. 20 kN. The presence of a (tensile) brace does not affect the horizontal force values, but increases the stiffness of the walls. This can be seen by the different slopes of the "force-displacement" curves compared to the walls without braces, which have a F_I/a_I value of 0.48, and the walls with braces have a F_I/a_I value of 0.61. It should be noted that the P-a curve for wall 90a is presented for illustrative purposes only, and after modifying the setup, a similar force should be expected as for wall 90a at the slope of the curve characterizing the walls without braces.

Figure 10 shows the dependence of the horizontal force on the deformation of the brace of the 90za and 90zb walls, read using the PONTOS system. In both cases, it can be seen that the brace worked as if it was stretched. The deformations in both walls were identical in the initial phase of loading. The difference occurs in the horizontal deformations in the case of the maximum force. The deformation of the 90za wall reached a value of 0.21%, and that of the 90zb wall – 0.126%.

Summary

Conclusions from the analysis of the obtained results and the method of destruction of the tested walls:

- gypsum-fiber board as a cladding is the main factor influencing the horizontal forces acting in the wall plane;
- the highest horizontal forces were noted in the case of walls in which the cladding was fixed with screws;
- no significant difference in forces was observed in the case of the use of staples and nails;

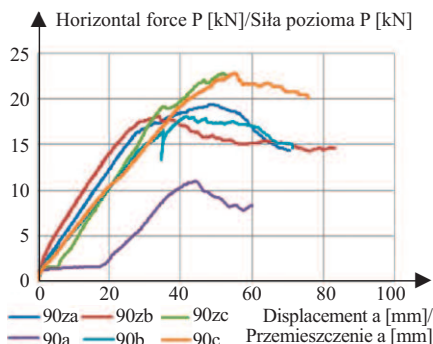


Fig. 9. Force – displacement relationship for 90 mm walls

Rys. 9. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku ścian o grubości 90 mm

Table 2. Summary of the values of forces and displacements of the tested walls

Tabela 2. Zestawienie wartości sił i przemieszczeń badanych ścian

Wall/Ściana	F_I [kN]	F_{max} [kN]	a_I [mm]	a_{max} [mm]	F_I/a_I [kN/mm]
90a	10,50	10,98	42,58*	44,09*	0,26*
90b	17,04	17,96	35,25	42,03	0,48
90c	19,37	22,74	40,62	55,42	0,48
90za	16,62	19,28	28,16	50,04	0,59
90zb	16,58	18,10	23,32	33,80	0,63
90zc	19,06	22,66	30,94	52,79	0,61

Notes: F_I – maximum horizontal force in phase I; F_{max} – maximum horizontal force; a_I – maximum horizontal displacement in phase I (sensor 4); a_{max} – maximum horizontal displacement (sensor 4); * – unreliable value/Uwagi: F_I – maksymalna siła pozioma w fazie I; F_{max} – maksymalna siła pozioma; a_I – maksymalne przemieszczenie poziome w fazie I (czujnik 4); a_{max} – maksymalne przemieszczenie poziome (czujnik 4); * – wartość niemiarodajna

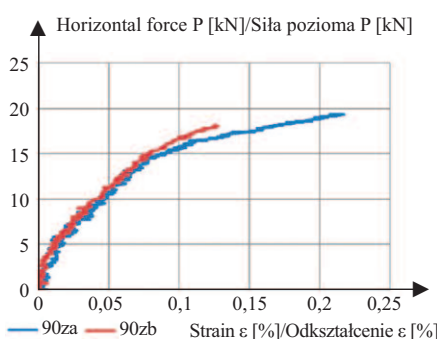


Fig. 10. Relationship between force and strain for braces in walls 90za and 90zb

Rys. 10. Zależność siła – odkształcenie w przypadku zastrzałów w ścianach 90za i 90zb

wego, lecz przy większym wzroście przemieszczeń w stosunku do mniejszego przyrostu siły. Ostatecznie maksymalna siła wyniosła ok. 22 kN, przy ugięciu ponad 50 mm w przypadku czujnika 4.

Wykonano analizę porównawczą wszystkich ścian grubości 90 mm, której wyniki przedstawiono na rysunku 9 i w tabeli 2. Analizując krzywe P-a stwierdzono, że siły większe niż 20 kN uzyskano w przypadku zamocowania za pomocą wkrętów. W związku z tym do dalszej analizy ścian w badaniach głównych, m.in. ze względu na osiągnięcie największych sił poziomych, przyjęto łączniki w postaci wkrętów.

W przypadku ścian z łącznikami w postaci zszywek i gwoździ osiągnięto podobną wartość siły, tzn. ok. 20 kN. Występowanie zastrzału (rozciąganego) nie ma wpływu na wartości siły poziomej, ale zwiększa sztywność ścian. Można to zaobserwować przez inne nachylenie krzywych „siła-przemieszczenie” w porównaniu ze ścianami bez zastrzałów, których wartość F_I/a_I wynosi 0,48, a ścian z zastrzałem 0,61. Należy zwrócić uwagę, że krzywa P-a dotycząca ściany 90a została przedstawiona poglądowo, a po zmodyfikowaniu stanowiska należy spodziewać się podobnej siły jak w przypadku ściany 90za przy nachyleniu krzywej charakteryzującej ścianę bez zastrzałów.

Na rysunku 10 przedstawiono zależność siły poziomej od odkształcenia zastrzału ścian 90za oraz 90zb, odczytanego za pomocą systemu PONTOS. W obu przypadkach widać, że zastrzał pracował jak rozciągany. Odkształcenia w obu ścianach były identyczne w początkowej fazie obciążenia. Różnica występuje w poziomie odkształceń w przypadku siły maksymalnej. Odkształcenie ściany 90za osiągnęło wartość 0,21%, a ściany 90zb – 0,126%.

Podsumowanie

Wnioski z analizy uzyskanych wyników oraz sposobu zniszczenia badanych ścian:

- płyta gipsowo-włóknowa jako poszycie stanowi główny czynnik wpływający na siły poziome działające w płaszczyźnie ściany;
- największe siły poziome odnotowano w przypadku ścian, w których poszycie było mocowane na wkręty;

- two phases of work in the tested walls were distinguished – the first phase, in which the horizontal force increased linearly with the displacement and most often ended with the achievement of the maximum force loading the wall, and the second phase, in which the walls were locally damaged, and thus the displacement increased with a decrease in the loading force;

- the main form of wall destruction was bonding of the wooden frame sheathing, in the case of walls with braces, secondary destruction of the posts was also observed at the point of connection with the braces;

- the braces in the current arrangement did not have a major influence on the maximum horizontal forces, increasing the stiffness of the wall elements.

The described studies will allow for further analysis of walls with gypsum-fibre sheathing, in which perforations and a different bracing system were planned. Both the SAD-256 measurement system and the PONTOS stereoscopic system allow for a satisfactory registration of measurements during the test. Ultimately, the comprehensive studies will serve to better understand the static work of wooden modular construction. In the future, a model of a modular two-storey box consisting of, among others, the described walls, subjected to horizontal forces in laboratory conditions, will be analysed.

Received: 06.03.2025

Revised: 30.04.2025

Published: 23.07.2025

- nie zaobserwowano znacznej różnicy sił w przypadku zastosowania zszywek i gwoździ;

- wyróżniono dwie fazy pracy w badanych ścianach – pierwsza faza, w której siła pozioma zwiększyła się liniowo wraz z przemieszczeniem i najczęściej kończyła się osiągnięciem maksymalnej siły obciążającej ściany oraz druga faza, w której dochodziło do lokalnego zniszczenia ścian, a tym samym zwiększenia przemieszczenia przy spadku siły obciążającej;

- główną postacią zniszczenia ścian było odspojenie się poszycia od szkieletu drewnianego, w przypadku ścian z zastrzałami zaobserwowano również wtórne zniszczenie słupków w miejscu łączenia z zastrzałami;

- zastrzały w obecnym układzie nie miały większego wpływu na maksymalne siły poziome, zwiększając sztywność elementów ściennych.

Opisane badania pozwolą na dalszą analizę ścian z poszyciem gipsowo-włóknowym, w którym przewidziano otworowanie oraz inny układ stężeń. Zarówno system pomiarowy SAD-256, jak i stereoskopowy system PONTOS pozwalają na zadowalającą rejestrację pomiarów podczas badania. Ostatecznie kompleksowe badania posłużą do lepszego zrozumienia pracy statycznej drewnianego budownictwa modułowego. W dalszej perspektywie analizowany będzie model modułowego dwukondygnacyjnego boksu złożonego m.in. z opisywanych ścian, poddanego siłom poziomym w warunkach laboratoryjnych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 06.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.04.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] United Nations Environment Programme, 2020 global status report for buildings and construction, Nairobi, https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR_ES.pdf?sequence=3&isAllowed=y, 2020.
- [2] Amico BD, Pomponi F, Hart J. Global potential for material substitution In building construction: the case of cross laminated timber. *J. Clean. Prod.* 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123487>.
- [3] Puettmann M, Pierobon F, Ganguly I, Gu H, Chen C, Liang S, Jones S, Maples I, Wishnie M. Comparative LCAs of conventional and mass timber buildings in regions with potential for mass timber penetration, *Sustain. Times.* 2021, <https://doi.org/10.3390/su132413987>.
- [4] Felmer G, Morales-Vera R, Astroza R, Gonz'alez I, Puettmann M, Wishnie M, A lifecycle assessment of a low-energy mass-timber building and mainstream concrete alternative in Central Chile, *Sustain. Times.* 2022, <https://doi.org/10.3390/su14031249>.
- [5] Arashpour M, Wakefield R, Abbasi B, Lee EWM, Minas J. Off-site construction optimization: sequencing multiple job classes with time constraints, *Autom. Construct.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.001>.
- [6] Arashpour M, Wake R, Blismas N, Minas J. Optimization of process integration and multi-skilled resource utilization in off-site construction, *Autom. Construct.* 2015, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.002>.
- [7] Hwang B, Shan M, Looi K. Key constraints and mitigation strategies for pre-fabricated pre finished volumetric construction, *J. Clean. Prod.* 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.136>.
- [8] Gibb AGF. Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation, John Wiley & Sons, 1999, https://books.google.com/books?id=uTiN_aGtXzwC.

- [9] Kamali M, Hewage K, Sadiq R. Conventional versus modular construction methods: a comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings, *Energy Build.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109479>.

- [10] Kamali M, Hewage K. Life cycle performance of modular buildings: a critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031>.

- [11] Zheng W, Lu W, Liu W, Wang L, Ling Z. Experimental investigation of laterally loaded double-shear-nail connections used in midply wood shear walls. *Constr Build Mater* 2015; 101: 761–71.

- [12] Paevere PJ, Foliente GC, Kasal B. Load-sharing and redistribution in a one-story woodframe building. *J Struct Eng* 2003; 129 (9): 1275–84.

- [13] Doudak G, Smith I, McClure G, Mohammad M, Lepper P. Tests and finite element models of wood light-frame shear walls with openings. *Prog Struct Eng Mater* 2006; 8 (4): 165–74.

- [14] Togay A, Anil O, Karagöz İşleyen U, Ediz I, Durucan C. Finite-element analyses of light timber-framed walls with and without openings. *Proc Inst Civ Eng-Struct Build* 2017; 170 (8): 555–69.

- [15] Kozem Šilih E, Premrov M, Kuhta M, Šilih S. A parametric numerical study on the horizontal load-bearing capacity of the FPB-sheated timber framed wall elements with openings. *Int J Civ Eng.* 2015; 13 (4): 468–77.

- [16] Anil O, Togay A, İşleyen UK, Söğütü C, Döngel N. Hysteretic behavior of bimer framed shear wall with openings. *Constr Build Mater.* 2016; 116: 203–15.

- [17] Prace B+R prowadzone przez firmę WASCOVILLA S.C. i Politechnikę Koszalińską nad stworzeniem kompleksu rozwiązań systemowych do budowy budynków mieszkalnych wielorodzinnych w systemie modułów mieszkalnych konstrukcji drewnianej łączonych na wysokość i długość budynku. Nr projektu RPZP. 01.01.00-IZ. 00-32-008/20-00.