

BADANIA SZTYWNOŚCI I NOŚNOŚCI PANELI ŚCIENNYCH W KONSTRUKCJI SZKIELETOWYCH BUDYNKÓW DREWNIANYCH W RÓŻNYCH KONFIGURACJACH GEOMETRYCZNYCH I KONSTRUKCYJNYCH

Marta NAZARCZUK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy zaprezentowano wyniki badań sztywności i wytrzymałości na obciążenie poziome ścian szkieletowych budynków drewnianych. Badaniom poddano sześć typów ścian różniących się budową i grubością. Poszycie ścian oprócz mocowania za pomocą łączników zostało przyklejone do szkieletu drewnianego. Badania wykonano według normy PN-EN 594:2011. Uzyskane wyniki zestawiono w formie wykresów $F - v$ (gdzie: F jest siłą poziomą, a v przemieszczeniem poziomym górnej krawędzi). Ponadto podano siły niszczące F_{max} oraz obliczono sztywność poszczególnych ścian.

Słowa kluczowe: budynki drewniane, konstrukcje szkieletowe, panele ściennie, sztywność, nośność.

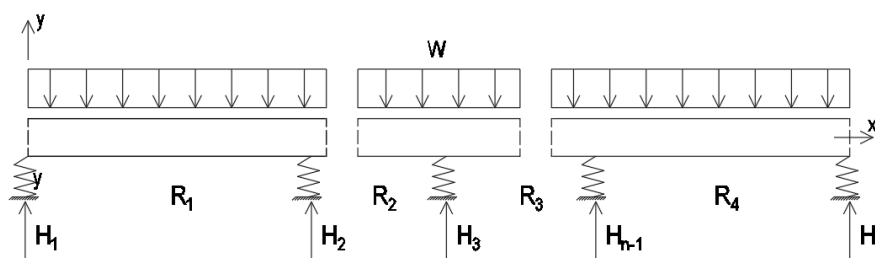
doi: 10.24427/bis-2018-vol9-no3-0004

1. Wprowadzenie

Konstrukcje drewniane stają się coraz bardziej popularne, szczególnie w krajach Europy zachodniej oraz skandynawskich, takich jak Dania, Norwegia czy Szwecja. Szwedzkie miasto Växjö planuje, aby do roku 2020 połowa nowo wybudowanych obiektów była z drewna (Växjö Municipal Council, 2013). Jest to podyktowane przede wszystkim chęcią ochrony klimatu poprzez zmniejszenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery, ponieważ materiał ten jest pod tym względem dużo korzystniejszy niż żelbet czy stal. Ponadto drewno jest materiałem odnawialnym. Tym tropem idzie też Polska – ostatnio została powołana ustawą sejmową spółka Polskie Domy Drewniane, która ma działać na rzecz promocji tego rodzaju budownictwa w naszym kraju. Nie pokrywa to się jednak ze stanem wiedzy o tych konstrukcjach – ciągle brak jest wystarczającej ilości informacji na temat nowych

konstrukcji, bardziej skomplikowanych budynków czy nowych materiałów drewnopochodnych. W związku z tym istnieje pilna potrzeba zgłębienia tematu i uzyskania informacji na temat projektowania, realizacji i użytkowania budynków na bazie drewna, głównie prefabrykowanych.

Szczególnie ważnym zagadnieniem jest zachowanie się budynków drewnianych pod wpływem obciążeń poziomych. Głównym elementem w ich przenoszeniu w przypadku konstrukcji szkieletowej są ściany usztywniające. Ich sztywność wpływa na rozkład obciążeń. Są one podporami sprężystymi R_i dla stropów, które są traktowane jako sztywne i przenoszą obciążenie poziome na ściany według schematu statycznego (Miedziałowski i Malesza, 2003) pokazanego na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat statyczny współpracy ścian usztywniających ze stropami (Miedziałowski i Malesza, 2003)

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mnazarczuk@unihouse.pl

Norma PN-EN 1995-1-1:2010. Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków wskazuje dwie metody obliczeniowe paneli ściennych przy obciążeniach poziomych, jednakże są one bardzo uproszczone, do tego ich pełne stosowanie odbywać może się tylko w przypadku używania jako poszycie konstrukcyjne płyt drewnopochodnych, co nie zawsze jest uzasadnione, jeśli weźmie się pod uwagę fizykę budowlę. Poza tym na rynku dostępne są już konstrukcyjne płyty gipsowo-kartonowe lub gipsowo-włóknowe. Ich stosowanie odbywa się na podstawie Europejskich Aprobatach lub Ocen Technicznych i zawsze odnoszą się do metody A zamieszczonej w normie PN-EN 1995-1-1:2010. Ogranicza się ona do dużych nieprzerwanych obszarów poszycia, więc według niej większość ścian z otworami okiennymi lub drzwiowymi nie ma żadnej nośności na obciążenia poziome. W związku z tym konieczne staje się przeprowadzanie badań wytrzymałościowych paneli ściennych na ten rodzaj obciążenia. W pracy Baszenia (2004) zbadano 7 paneli ściennych – 4 pełne i 3 z otworami, gdzie obserwowano odkształcenia i przemieszczenia poszczególnych elementów układu – słupków, pasów górnych i dolnych oraz poszycia, a następnie wyniki wykorzystano do analizy numerycznej. Wykazano, że na sztywność panelu w głównej mierze wpływają łączniki poszycia, a także że ściany z otworami są mniej sztywne niż pełne. W pracy Maleszy (1997) zbadano 3 identyczne pełne panele ścienne w celu określenia odkształceń poziomych. Zaobserwowano redystrybucję naprężeń pomiędzy poszyciem a ramą konstrukcyjną ścian, w której główną rolę odgrywają łączniki. Do tych samych wniosków doszli Miedziałowski i Malesza w publikacji (Miedziałowski i Malesza, 2003), którzy badali ściany pełne i z otworami.

Natomiast w publikacji (Martin i in., 2006) skupiono się tylko na panelach z otworami w celu wykazania ich nośności na obciążenia poziome. Dodatkowo zmieniano ich sposoby dolnego i górnego mocowania. Testy pokazały, że warunki brzegowe mogą zmieniać sztywność ściany aż o 500%.

Autorzy publikacji (Šilih i Premrov, 2010) także skupili się na ścianach z otworami. Panele w tym przypadku były poszyte płytami gipsowo-włóknowymi i miały różne wymiary otworów. Udowodniono, że ściany tego typu poprawiają sztywność budynku, ponieważ mają nawet 50% nośności paneli pełnych i powinny być brane pod uwagę w obliczeniach.

W dalszej części publikacji zostaną zaprezentowane wyniki badań sztywności i wytrzymałości na obciążenie poziome ścian zaprojektowanych w projekcie „Budynek zeroenergetyczny w konstrukcji modułowej” współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podlaskiego na lata 2014-2020.

2. Opis metodyki badań

Badania przeprowadzono według normy PN-EN 594:2011. *Konstrukcje drewniane. Metody badań. Badania*

sztywności i nośności płyt ściennych o szkieletcie drewnianym. Określa ona metodę badania sztywności i nośności na obciążenie poziome szkieletowych ścian drewnianych. Zbadano 12 paneli ściennych wykonanych w technologii szkieletu drewnianego. Panele miały wymiary $3,00 \times 2,60$ m. Ściany podzielono na 3 grupy różniące się między sobą częścią konstrukcyjną:

- grupa 1: ściany typu SZA z warstwą konstrukcyjną w formie słupków dwuteowych o wymiarach 60×300 mm, poszytych od wewnątrz płytą gipsowo-kartonową konstrukcyjną grubości 12,5 mm, a od zewnątrz płytą gipsową konstrukcyjną zbrojoną włóknem szklanym grubości 12,5 mm,
- grupa 2: ściany typu SZB z warstwą konstrukcyjną w formie słupków dwuteowych o wymiarach 60×200 mm, poszytych od wewnątrz płytą gipsowo-kartonową konstrukcyjną grubości 12,5 mm, a od zewnątrz płytą OSB3 grubości 12 mm,
- grupa 3: ściany typu SZD z warstwą konstrukcyjną w formie słupków z drewna LVL o wymiarach 51×100 mm, poszytych od wewnątrz płytą gipsowo-kartonową konstrukcyjną grubości 12,5 mm, a od zewnątrz płytą OSB3 grubości 12 mm.

Panele w poszczególnych grupach różniły się między sobą rodzajem łączników mocujących poszycie do belek konstrukcyjnych:

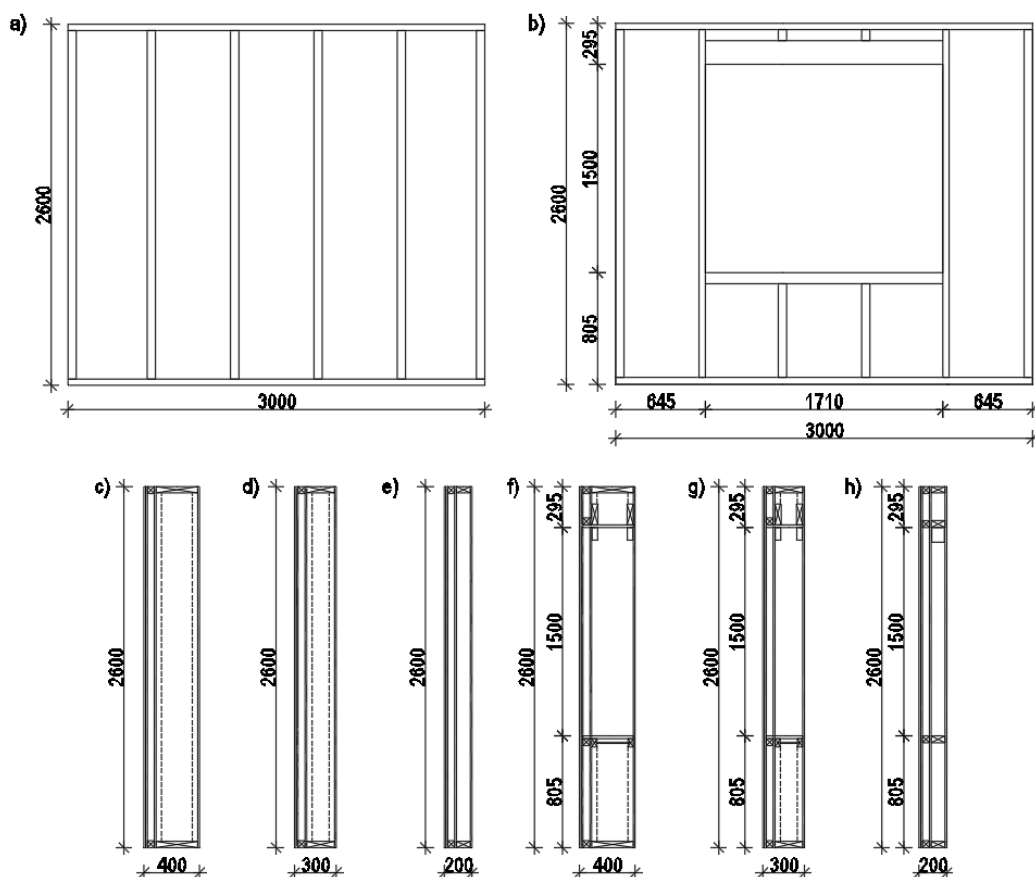
- rodzaj 1: zszywki o wymiarach $1,53 \times 50$ mm w rozstawie 70 mm,
- rodzaj 2: zszywki o wymiarach $1,53 \times 50$ mm w rozstawie 120 mm,
- rodzaj 3: wkręty o wymiarach $3,5 \times 35$ mm.

Dodatkowo poszycie we wszystkich ścianach było przyklejone do ramy konstrukcyjnej, ponieważ badanie wykonano w ramach dofinansowania z funduszy unijnych i panele były projektowane nie tylko pod względem wytrzymałościowym. Klej w tym przypadku użyty został w celu poprawy szczelności ścian zewnętrznych i musiały być one przygotowane do badań w sposób identyczny, jak planowano je później wbudować w budynek testowy.

Różnicowano też formę ścian – w każdej grupie 3 panele były pełne, natomiast 1 posiadał otwór o wymiarach 1710×1500 mm, którego umiejscowienie pokazano na rysunku 2. W tabeli 1 opisano poszczególne panele.

Właściwości użytych materiałów są następujące:

- słupki dwuteowe:
 - materiał półki (drewno LVL):
 $f_{m,k} = 26,0$ MPa; $f_{t,0,k} = 16,0$ MPa; $f_{c,0,k} = 22,0$ MPa;
 $E_{0,mean} = 11,0$ GPa; $\rho_k = 430$ kg/m³,
 - materiał środka (płyta pilśniowa):
 $f_{m,90,k} = 31,0$ MPa; $f_{t,90,k} = 20,0$ MPa;
 $f_{c,90,k} = 21,0$ MPa; $E_{0,mean} = 5,3$ GPa;
 $G_{mean} = 2,1$ GPa; $\rho_k = 900$ kg/m³,
- słupki LVL:
 $f_{m,k} = 44,0$ MPa; $f_{t,0,k} = 36,0$ MPa; $f_{c,0,k} = 40,0$ MPa;
 $E_{0,mean} = 14,0$ GPa; $G_{mean} = 0,6$ GPa; $\rho_k = 480$ kg/m³,
- płyta gipsowa konstrukcyjna $\rho_k = 1000$ kg/m³:
 - prostopadle do płaszczyzny płyty: $f_{m,0,k} = 8,4$ MPa;
 $f_{m,90,k} = 4,9$ MPa; $f_{c,k} = 8,0$ MPa; $E_{0,mean} = 4,65$ GPa,
 - w płaszczyźnie płyty:
 $f_{m,0,k} = 5,9$ MPa; $f_{m,90,k} = 3,9$ MPa; $f_{c,k} = 6,5$ MPa;
 $f_{v,k} = 3,3$ MPa; $E_{0,mean} = 3,7$ GPa; $G_{mean} = 2,5$ GPa;



Rys. 2. Widok badanych paneli: a) panel pełny, b) panel z otworem c) przekrój ściany SZA pełnej, d) przekrój ściany SZB pełnej, e) przekrój ściany SZD pełnej, f) przekrój ściany SZA z otworem, g) przekrój ściany SZB z otworem, h) przekrój ściany SZD z otworem

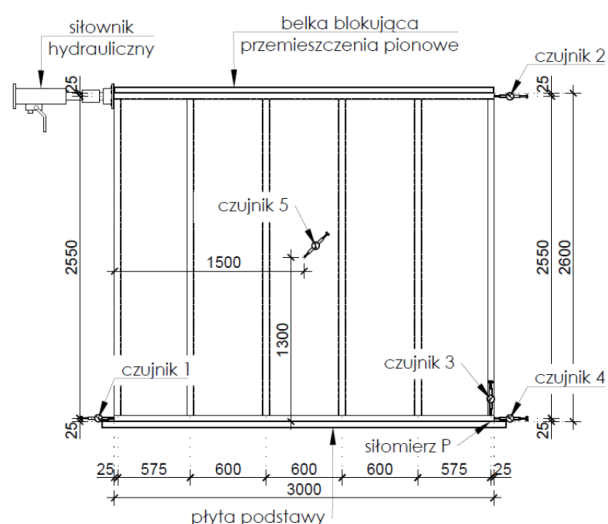
Tab. 1. Opis paneli do badań

Lp.	Grupa	Układ warstw	Łączniki poszycia
1	SZA	2 x płyta gipsowo-kartonowa grubości 12,5 mm łaty drewniane 50×50 mm płyta gipsowo-kartonowa konstrukcyjna gr. 12,5 mm słupki dwuteowe 60×300 mm płyta gipsowo-kartonowa konstrukcyjna zewnętrzna grubości 12,5 mm	SZA3 7 (pełny): zszywki 1,58×50
			SZA4 8 (pełny): zszywki 1,58×50 mm co 120 mm
			SZA (pełny): wkrety 3,5×35 mm
2	SZB	2 x płyta gipsowo-kartonowa grubości 12,5 mm łaty drewniane 50×50 mm płyta gipsowo-kartonowa konstrukcyjna grubości 12,5 mm słupki dwuteowe 60×200 mm płyta OSB3 grubości 12 mm	SZA6 10 (z otworem): zszywki 1,58×50 mm co 70 mm
			SZB3 11 (pełny): zszywki 1,58×50 mm co 70 mm
			SZB4 12 (pełny): zszywki 1,58×50 mm co 120 mm SZB5 13 (pełny): wkrety 3,5×35 mm
3	SZD	2 x płyta gipsowo-kartonowa grubości 12,5 mm łaty drewniane 50×50 mm płyta gipsowo-kartonowa konstrukcyjna grubości 12,5 mm słupki LVL 51×100 mm płyta OSB3 grubości 12 mm	SZB6 14 (z otworem): zszywki 1,58×50 mm co 70 mm
			SZD3 15 (pełny): zszywki 1,58×50 mm co 70 mm
			SZD4 16 (pełny): zszywki 1,58×50 mm co 120 mm SZD5 17 (pełny): wkrety 3,5×35 mm SZD6 18 (z otworem): zszywki 1,58×50 mm co 70 mm

- płyta OSB3:
 $f_{m,0,k} = 16,4 \text{ MPa}$; $f_{m,90,k} = 8,2 \text{ MPa}$; $f_{t,0,k} = 9,4 \text{ MPa}$;
 $f_{t,90,k} = 7,0 \text{ MPa}$; $f_{c,0,k} = 15,4 \text{ MPa}$; $f_{c,90,k} = 12,7 \text{ MPa}$;
 $f_{v,k} = 6,8 \text{ MPa}$; $E_{0,mean} = 4,93 \text{ GPa}$; $E_{90,mean} = 1,98 \text{ GPa}$;
 $G_{mean} = 1,08 \text{ GPa}$

Do klejenia poszycia użyto kleju Kestopur 200/40, którego wytrzymałość na ścinanie i rozciąganie wynosi 10 MPa. Właściwości wytrzymałościowe zszywek są następujące: $f_{ax,k,350} = 4,9 \text{ MPa}$; $f_{head,k,350} = 30,0 \text{ MPa}$; $M_{y,k} = 750 \text{ Nmm}$. Wytrzymałość na ścinanie wkrętów do płyt wynosiła 0,21 kN.

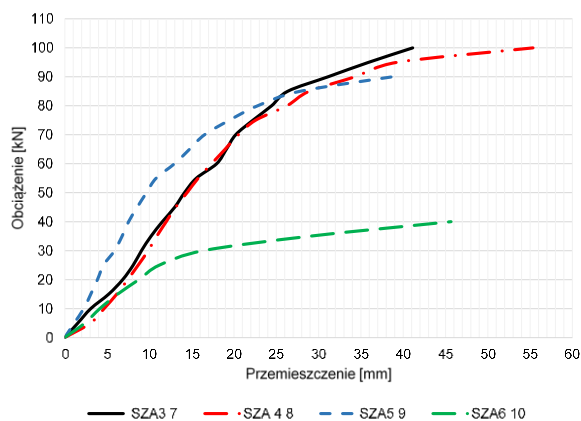
Panele od góry obciążono belką blokującą przemieszczenia pionowe. Od dołu zamocowano je do stanowiska badawczego śrubami w rozstawie co 60 cm. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego.

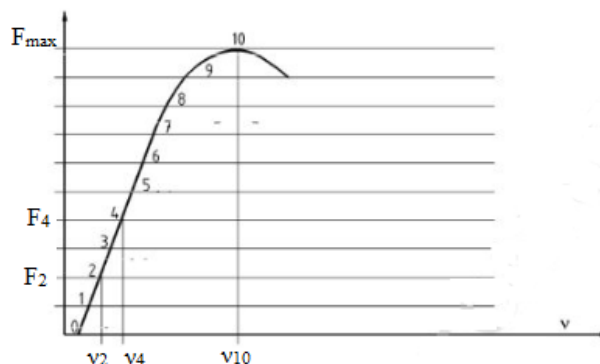
Czujniki mierzyły następujące wielkości:

- czujnik 1: przemieszczenie poziome w płaszczyźnie ściany,
- czujnik 2: przemieszczenie poziome w płaszczyźnie ściany,



Rys. 5. Wykres siła-przemieszczenie ścian typu SZA

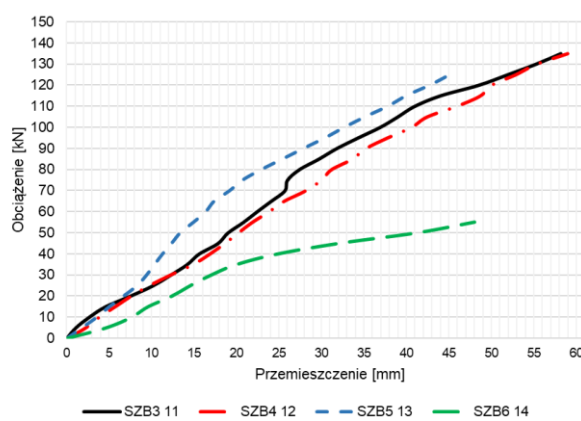
- czujnik 3: przemieszczenie pionowe w płaszczyźnie ściany uwzględniające docisk ściany do płyty podstawy,
 - czujnik 4: przemieszczenie poziome w płaszczyźnie ściany,
 - czujnik 5: odkształcenie ukośne w płaszczyźnie ściany.
- Przyrost siły podczas badania wynosił 5 kN co 30 sekund. Proces obciążania przeprowadzono do momentu zniszczenia ściany F_{max} (rys. 4).



Rys. 4. Proces obciążania ściany według normy PN-EN 594:2011

3. Wyniki badań

Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono wykresy siła-przemieszczenie dla poszczególnych grup ścian. Wzięto pod uwagę przemieszczenie w prawym górnym rogu panelu (z czujnika 2). Można zaobserwować, że ściany z otworami mają około 30-40% nośności ścian pełnych, jednakże wartości te są dość znaczące i wynoszą w przypadku każdej z grup około 40-50 kN. Widać także, że rozstaw i rodzaj łączników wpływa na odkształcenia. Natomiast nośność ścian bez otworów w obrębie poszczególnych grup jest podobna – obciążenie graniczne było podobne bez względu na rodzaj łączników.



Rys. 6. Wykres siła-przemieszczenie ścian typu SZB

Można też zauważyć, że ściany z poszyciem

zewnątrznym z płyt gipsowych konstrukcyjnych (SZA) mają mniejszą nośność niż ściany z poszyciem z płyt OSB3, co jest prawidłowe, ponieważ płyty

drewnopochodne są sztywniejsze niż płyty gipsowe.

Według normy PN-EN 594:2011, sztywność ściany na obciążenie poziome można obliczyć według wzoru:

$$R = \frac{F_4 - F_2}{v_4 - v_2} \quad \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (1)$$

gdzie: F_2 jest to obciążenie poziome o wartości $0,2 F_{max}$ w N, F_4 – obciążenie poziome o wartości $0,4 F_{max}$ w N, a v_2 i v_4 odpowiednio przemieszczenia odpowiadające siłom F_2 i F_4 w mm.

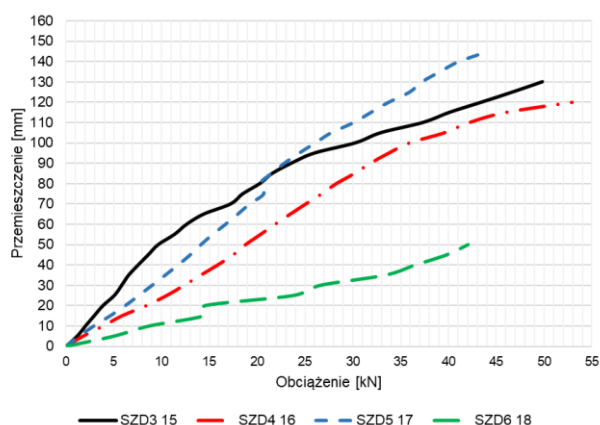
Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 8.

4. Podsumowanie

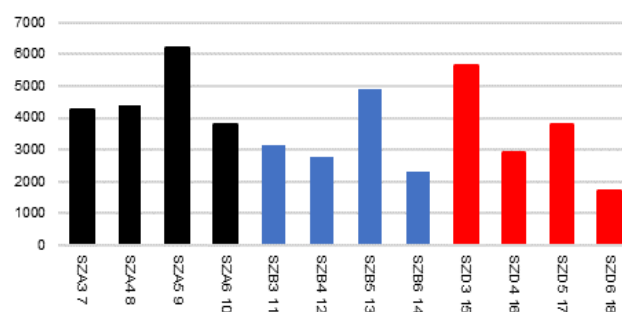
Badania pokazują, że sztywność ścian zależy od ich konfiguracji. Panele z otworami są najmniej sztywne w każdej rozpatrywanej grupie. Największą sztywnością natomiast cechuje się grupa ścian SZA. Miały one największą wysokość słupka konstrukcyjnego. Należałoby

w przyszłości zbadać ściany w połączeniu z belkami ociepowymi stropów, co z pewnością wykazałoby jeszcze większą sztywność układu.

Badania wykazały też, że ściany z otworami mają od 30 do 40% nośności ścian pełnych. W budynkach prefabrykowanych modułowych w technologii szkieletu drewnianego w kierunku podłużnym budynku zazwyczaj wszystkie ściany mają duże otwory drzwiowe i okienne. Projektując ściany w oparciu o posycie z płyt innych niż drewnopochodne, obowiązująca norma PN-EN 1995-1-1:2010 nie pozwala na przyjmowanie ich do obliczeń nośności budynku na obciążenie wiatrem, które w lekkich budynkach szkieletowych odgrywa ważną rolę w wymiarowaniu konstrukcji. W związku z tym projektanci zmuszeni są do stosowania w takich ścianach sztywnych ram stalowych lub do zamieniania ścian działowych na ściany usztywniające – oba rozwiązania podrażają koszty budowy, jednakże z przeprowadzonych testów wynika, że z tych zabiegów można by było zrezygnować.



Rys. 7. Wykres siła-przemieszczenie ścian typu SZD



Rys. 8. Sztywność paneli ściennych

Tab. 2. Sztywność i nośność na obciążenie poziome badanych paneli

Lp.	Numer panelu	F_{max} [kN]	F_2 [kN]	F_4 [kN]	v_2 [mm]	v_4 [mm]	R [N/mm]
1	SZA3 7	100	20	40	6,85	11,54	4264
2	SZA4 8	100	20	40	7,44	11,99	4396
3	SZA5 9	90	18	36	3,87	6,78	6186
4	SZA6 10	40	8	16	4,15	6,26	3791
5	SZB3 11	135	27	54	12,24	20,8	3154
6	SZB4 12	135	27	54	12,18	21,84	2795
7	SZB5 13	125	25	50	8,26	13,35	4912
8	SZB6 14	55	11	22	7,6	12,35	2316
9	SZD3 15	130	26	52	5,04	9,64	5652
10	SZD4 16	120	24	48	10,52	18,76	2913
11	SZD5 17	145	29	58	8,99	16,67	3776
12	SZD6 18	50	10	20	8,69	14,52	1715

Literatura

- Baszeń M. (2004). Model Obliczeniowy Elementów z Otworami Konstrukcji Szkieletowych Budynków Drewnianych z Poszyciem Wraz z Weryfikacją Doświadczalną. Rozprawa doktorska, *Politechnika Białostocka*, Białystok.
- Malesza M. (1997). Redystrybucja Sił Wewnętrznych i Odkształcalność Tarcz Ściennych z Nośnym Drewnianym Szkieletem i Współpracującym Poszyciem. Rozprawa doktorska, *Politechnika Białostocka*, Białystok.
- Martin Z. A., Skaggs T. D., Keith E. L., Yeh B. (2006). Development of narrow wall bracing and effects of boundary conditions. In: *World Conference on Timber Engineering*, Portland.
- Miedziałowski C., Malesza M. (2003). Budynki o Szkielecie Drewnianym z Poszyciem. *Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej*, Warszawa-Białystok.
- Šilih E. K., Premrov M. (2010). Analysis of timber-framed wall elements with openings. *Construction and Building Materials*, tom 24, nr 9, 1656-1663.
- Växjö Municipal Council (2013). Växjö the modern wooden city. Växjö Municipality's Wood Construction Strategy. *Växjö Municipal Council*, Växjö.

STIFFNESS AND LOAD BEARING TESTS OF TIMBER FRAME WALL PANELS IN DIFFERENT CONFIGURATIONS OF THE GEOMETRY AND STRUCTURAL COMPONENTS

Abstract: In the article results of stiffness and load bearing tests under horizontal load of timber frame walls are presented. Six different types of walls were tested. The difference between panels is their structural configuration and thickness. Structural sheathing was glued and mechanically fixed to the frame. The test were conducted according to PN-EN 594:2011. The results are presented on F - v graphs (where: F is the horizontal force and v is the horizontal displacement of the upper edge). Furthermore, ultimate forces F_{\max} are presented and stiffness of every wall was calculated according to aforementioned code.