

Michał BASZEŃ¹

BADANIA DOŚWIADCZALNE ODKSZTAŁCALNOŚCI WĘZŁÓW SZKIELETOWYCH BUDYNKÓW DREWNIANYCH

Większość obecnie znanych modeli obliczeniowych zawiera uproszczenia, które powodują, że otrzymane dzięki nim wyniki sił wewnętrznych, naprężeń czy przemieszczeń obarczone są pewnymi błędami. Aby uzyskać prawidłowe rozwiązanie analizowanego problemu konieczne jest poznanie rzeczywistego sposobu pracy konstrukcji. Uwzględnianie w obliczeniach węzłów podatnych, ze znanymi wartościami ich podatności, pozwala na otrzymanie rozwiązania dokładnego. Możliwe jest to dzięki badaniom eksperymentalnym. W pracy zostały przedstawione wyniki badań doświadczalnych węzłów w szkieletowych budynkach drewnianych. Badania te przeprowadzono celem wyznaczenia podatności translacyjnej oraz rotacyjnej węzłów. Eksperymenty zostały przeprowadzone na modelach węzłów o zmniejszonych wymiarach poprzecznych w stosunku do rzeczywistych wymiarów elementów drewnianych konstrukcji szkieletowych. Wyniki innych badań doświadczalnych, wykazały, że zarówno eksperymenty na próbkach pełnowymiarowych, jak i małowymiarowych w dobry sposób przedstawiają sposób pracy konstrukcji. Podczas badań rejestrowano wielkości przemieszczeń charakterystycznych punktów w węzłach. Badania podatności translacyjnej i rotacyjnej prowadzone były niezależnie od siebie, na próbkach przedstawiających różne rodzaje węzłów. Podatność translacyjną obliczana była jako stosunek przyrostu przemieszczenia węzła do przyrostu siły obciążającej węzeł. W przypadku węzła z zablokowanym podatność rotacyjną obliczano jako stosunek przyrostu kąta obrotu elementu obciążanego względem elementu podpierającego do przyrostu momentu zginającego. Podatność translacyjną określano dla dwóch rodzajów węzła, z zablokowanym oraz z możliwym przemieszczeniem w osi działającego obciążenia. Podatność rotacyjną określono natomiast dla różnych grubości obciążanego elementu. Otrzymane wyniki zaprezentowano w postaci wykresów zależności podatność-naprężenia. Powiązanie podatności z naprężeniami podyktowane zostało przeprowadzeniem eksperymentów na próbkach małowymiarowych.

Słowa kluczowe: węzły podatne, sztywność i podatność węzłów, badania w skali mikro

¹ Michał Baszeń, Politechnika Białostocka, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok; m.baszen@pb.edu.pl

1. Wprowadzenie

Podatność poszczególnych węzłów i połączeń wpływa na ogólną sztywność obiektu. Ponieważ węzły z reguły są mniej sztywne, niż poszczególne elementy powoduje to, że ogólna sztywność obiektu jest niższa, niż sztywność będąca sumą sztywności poszczególnych ścian, stropów oraz elementów dachowych.

Podatność węzłów jest powiązana ze sposobem ich konstruowania, a także ogólnym schematem pracy poszczególnych elementów konstrukcji w węźle. Sposób wykonania węzłów zależy od materiału konstrukcyjnego, czy jest to konstrukcja stalowa, żelbetowa czy drewniana, zatem sposób pracy węzłów oraz ich podatność jest inna dla każdego rodzaju obiektu.

Krzywe $M-\varphi$ opisują relację między momentem zginającym w węźle, występującym na analizowanym elemencie, a kątem obrotu elementu względem reszty węzła. Czy węzeł powinien być traktowany jako przegubowy, sztywny czy też podatny określa się na podstawie wyliczonej początkowej sztywności węzła [1].

Najlepiej rozpoznana jest kwestia podatności w konstrukcjach stalowych. Podatność takich węzłów opisują różne zależności $M-\varphi$, związane jest to ze sposobem wykonania węzłów [2], ale ze względu na dużą sztywność na ściskanie słupów stalowych uwzględniania jest tylko podatność rotacyjna.

W przypadku drewnianych konstrukcji szkieletowych praca węzła jest bardziej złożona. Oprócz podatności rotacyjnej wynikającej z obrotu elementu względem węzła, występuje także podatność translacyjna spowodowana dociskaniem poszczególnych elementów względem siebie (rys.1), co powoduje że węzły w drewnianych konstrukcjach szkieletowych i konstrukcjach stalowych będą pracowały w inny sposób.

Połączenia podatne w konstrukcjach stalowych zostały dobrze rozpoznane dzięki szerokiemu spektrum badań doświadczalnych m.in. [3], [4]. W przypadku konstrukcji drewnianych także prowadzone są badania nad węzłami podatnymi, jednak z reguły uwzględniana jest podatność rotacyjna w ramach portalowych m.in. [5], [6]. Podatność translacyjna węzłów z reguły jest pomijana, jakkolwiek uwzględniania jest w niektórych analizach węzłów kratownic drewnianych np. [7], jednak inne analizy np. [8] uwzględniają podatność kątową.

W badaniach doświadczalnych podatność węzłów jest określana jako funkcja podatności łączników stalowych [9] lub drewnianych [10], a nie jako funkcja sztywności elementów konstrukcyjnych w węźle.

2. Praca węzła

Węzeł kształtowany jest jako połączenie elementów konstrukcji ścian, stropów czy dachu. Każde takie połączenie charakteryzuje się dwoistą podatnością, zarówno rotacyjną, jak i translacyjną. Model pracy całego węzła zatem jest kompilacją modeli opisujących poszczególne połączenia.

Podobne węzły mogą pracować w zupełnie inny sposób. Przykładem takiego węzła jest węzeł strop-ściana. Rozpatrzono dwa warianty tego węzła: strop swobodnie oparty na ścianie niższej kondygnacji oraz strop oparty na ścianie niższej kondygnacji a na nim stojąca ściana wyższej kondygnacji.

W pierwszym przypadku, ze względu na brak ściany wyższej kondygnacji, występuje swoboda obrotu elementu stropu względem górnej krawędzi ściany, przez co węzeł ten charakteryzuje się dużą podatnością rotacyjną, czyli pracuje w sposób zbliżony do węzła przegubowego.

W węźle łączącym strop ze ścianami dwóch kondygnacji ograniczona jest swoboda obrotu elementu stropowego (belek stropowych). Podatność rotacyjna w tym przypadku jest mniejsza, przez co węzeł pracuje w sposób zbliżony do węzła sztywnego. Docisk ściany wyższej kondygnacji powoduje, że węzeł ten posiada też znaczną podatność translacyjną.

Uwzględnienie podatności połączenia będzie wpływać na stan graniczny nośności i użytkowania (węzeł ze ścianą wyższej kondygnacji) lub tylko na stan graniczny użytkowania (węzeł strop-ściana niższej kondygnacji).

Określenie sposobu pracy konstrukcji jest możliwe na dwa sposoby, tworząc model obliczeniowy opisujący zachowanie układu konstrukcyjnego lub też poprzez przeprowadzenie eksperymentów badawczych. Analiza doświadczalna może być przeprowadzona dla całej konstrukcji lub też dla jej części.

Ze względu na stopień skomplikowania konstrukcji, często lepszym rozwiązaniem jest przeprowadzenie eksperymentu dla części obiektu. Znając model pracy połączenia lub całego węzła możliwe jest zastosowanie tej wiedzy do stworzenia ogólnego modelu obliczeniowego całej konstrukcji, jeżeli znane są np. modele pracy elementów ściennych czy stropowych [11], [12].

Eksperymenty badawcze mogą być prowadzone na próbkach w skali naturalnej, ale także o zmniejszonych wymiarach poprzecznych. Wyniki badań [9], [13] pokazują zadowalającą dokładność takiego rodzaju eksperymentów.

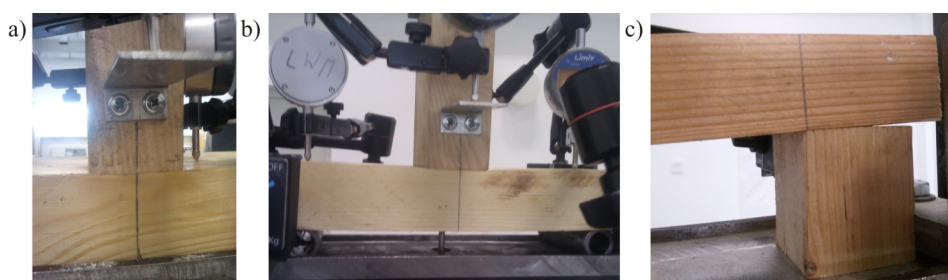
Ze względu na skomplikowanie konstrukcji węzła możliwa jest uproszczona analiza dzięki badaniom pojedynczych połączeń występujących w analizowanym węźle. Rozpoznany sposób pracy pojedynczego połączenia umożliwia opracowanie modelu obliczeniowego całego węzła. Weryfikację modelu można uzyskać przeprowadzając badania doświadczalne całego węzła.

3. Metodologia badań doświadczalnych

Celem badań było określenie podatności węzłów wynikającej z podatności materiałowej elementów konstrukcji. Obserwowano podatności translacyjną i rotacyjną niezależnie od siebie. Aby uprościć badania założono, że analizowana będzie praca pojedynczych połączeń, a nie całego węzła. Dodatkowo pominięto w analizach wpływ poszycia oraz łączników. Analizy przeprowadzono w porównaniu do wielkości naprężeń ściskających dla podatności translacyjnej oraz naprężeń zginających dla podatności rotacyjnej.

Badania przeprowadzono dla trzech różnych węzłów. Podatność translacyjną określano dla węzła słupki-rygiel dolny ściany dla dwóch wariantów. W pierwszym zakładano brak możliwości przemieszczenia całego węzła w osi obciążenia. Występuje tylko docisk słupka do rygla poziomego, np. węzeł oparty na sztywnej podwalinie (rys. 1a). W drugim wariantcie węzeł miał możliwość przemieszczenia w osi obciążenia zewnętrznego, np. węzeł w nadprożu albo oparcie belki stropowej na ryglu ściany pomiędzy dwoma słupkami (rys. 1b).

Podatność rotacyjną określano dla przypadku oparcia belki na elemencie pionowym, np. belka stropowa umiejscowiona nad słupkiem ściany (rys. 1c).

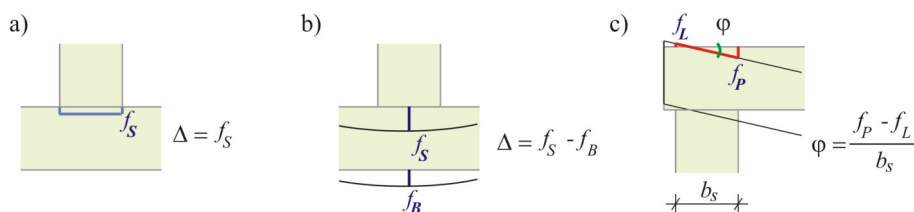


Rys. 1. Badanie doświadczalne podatności: a) translacyjnej - węzeł bez możliwości przemieszczenia, b) translacyjnej - węzeł z możliwością przemieszczenia, c) rotacyjnej

Fig. 1. Experimental tests of semi-rigidity (inverse of stiffness): a) axial - joint with restricted vertical displacement, b) axial - joint with permissible vertical displacement, c) rotational

Badania prowadzone były do utraty nośności przez któryś z elementów. Podatność translacyjną określano na próbkach o wymiarach poprzecznych 45x90mm, zaś podatność rotacyjną obliczano na podstawie wyników przemieszczeń belek poziomych o wymiarach poprzecznych 22x45mm oraz 30x45cm.

Podatność (translacyjną, rotacyjną) obliczano, jako stosunek przyrostu wartości przemieszczenia węzła (liniowego, kąтового) do przyrostu obciążenia w węźle (siła, moment) (rys. 2). W przypadku węzła bez możliwości, jako wartość przemieszczenia przyjmowano wielkość docisku słupka do rygla.



Rys. 2. Wyznaczanie przemieszczeń dla określenia podatności: a) translacyjnej - węzeł bez możliwości przemieszczenia, b) translacyjnej - węzeł z możliwością przemieszczenia, c) rotacyjnej

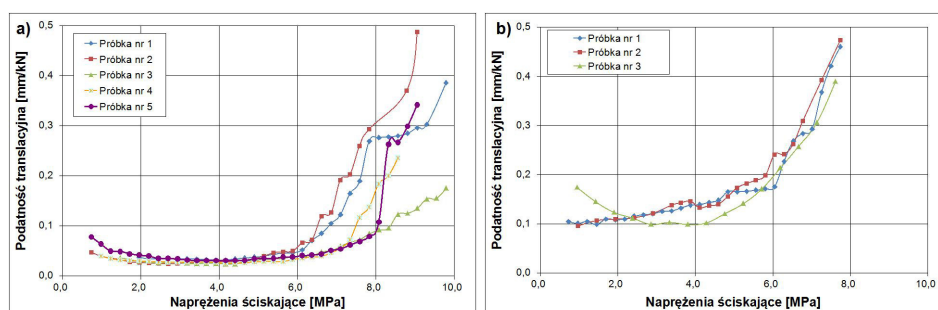
Fig. 2. Calculation of displacement to obtain semi-rigidity: a) axial - joint with restricted vertical displacement, b) axial - joint with permissible vertical displacement, c) rotational

Ze względu na brak łączników, belka oparta była swobodnie na elementach podparcia, dlatego też podatność określano jako zależną nie od momentu węzłowego, ale od maksymalnego momentu zginającego próbkę.

4. Wyniki badań

4.1. Podatność translacyjna

Na rysunkach poniżej pokazano zależność podatności od wartości naprężeń ściskających występujących w strefie kontaktu między elementem poziomym i pionowym węzła.



Rys. 3. Wykres zależności 'podatność translacyjna węzła' - 'naprężenia ściskające': a) węzeł bez możliwości przemieszczenia, b) węzeł z możliwością przemieszczenia

Fig. 3. 'Joint axial semi-rigidity'-to-'normal stress' relationship: a) joint with restricted vertical displacement, b) joint with permissible vertical displacement

Wartość podatności początkowej została obliczona dla naprężeń ściskających na poziomie ok. 1 MPa. We wcześniejszej fazie obciążania elementy w analizowanym węźle dopasowują się, co daje zawyżone wartości podatności.

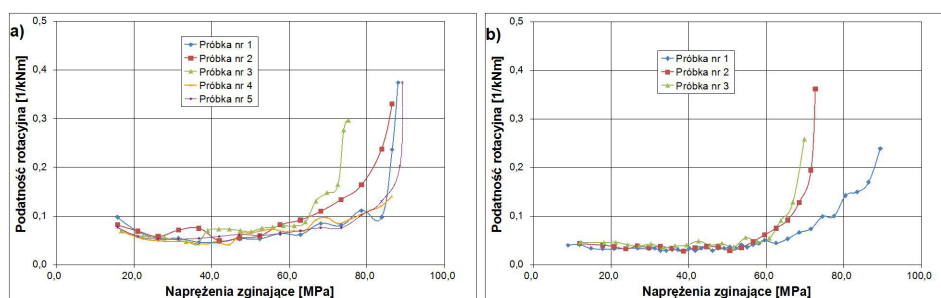
Wartość podatności początkowej dla węzła bez możliwości przemieszczenia kształtuje się na poziomie ok. 0,03 mm/kN, podczas gdy w węzłach z możliwym przemieszczeniem wartość ta jest większa i wynosi ok. 0,1 mm/kN.

Podatność węzłów pozostaje niezmienną do poziomu ok. 6MPa dla naprężeń ściskających, gdy następuje jej gwałtowny wzrost. Zniszczenie węzłów z możliwością przemieszczenia zostało zaobserwowane dla naprężeń bliskich 8 MPa (rys. 3b), podczas gdy węzły bez możliwości przemieszczenia ulegały zniszczeniu przy większych obciążeniach (rys. 3a). Spowodowane jest to występowaniem naprężeń zginających w węzłach z możliwością przemieszczenia.

4.2. Podatność rotacyjna

Kolejne analizy pozwoliły na określenie zależności między podatnością rotacyjną, a naprężeniami zginającymi w obciążanej belce. Przeprowadzono bada-

nia dla dwóch grubości elementu poziomego. Podobnie, jak w przypadku podatności translacyjnej w początkowej fazie eksperymentu wystąpił efekt dopasowania elementów na ich styku, dlatego wartość podatności początkowej wyznaczono dla naprężeń zginających na poziomie ok. 20 MPa.



Rys. 4. Wykres zależności podatności rotacyjnej węzła - naprężenia zginające: a) belka o grubości 22mm, b) belka o grubości 30mm

Fig. 4. Joint rotational semi-rigidity to bending stress relationship: a) top plate 22mm thick, b) top plate 30mm thick

Początkowa podatność rotacyjna dla belki o grubości 22mm wynosiła ok. 0,05 1/kNm, podczas gdy podatność belki o grubości 30mm była mniejsza i wynosiła ok. 0,03 1/kNm.

Węzeł zachowuje początkową podatność rotacyjną do poziomu naprężeń zginających w belce równych ok. 60 MPa (belka o gr. 30mm, rys. 4b) lub ok. 80 MPa (gr. 22mm, rys. 4a). Po przekroczeniu tego poziomu naprężeń następuje gwałtowny wzrost podatności rotacyjnej węzła.

Podatność rotacyjna zależna jest od sztywności belek zginanych, większa sztywność belki - mniejsza podatność węzła. Równocześnie węzły belek o większej sztywności przy mniejszych wartościach naprężeń stają się bardziej podatne. Gdy naprężenia zginające w belkach obu rodzajów przekraczają poziom 60 MPa podatności węzłów osiągają podobną wartość. Przy zwiększeniu naprężeń zginających podatność węzła z belką o większej sztywności rośnie szybciej, niż podatność belki o mniejszej sztywności.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz analizy otrzymanych wyników pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- wszystkie węzły konstrukcji drewnianych charakteryzują się pewną podatnością początkową, która zależna jest od sposobu konstruowania węzłów, jak również od sztywności poszczególnych elementów,

- możliwe jest wyliczenie wartości podatności początkowej węzła, zarówno translacyjnej jak i rotacyjnej, gdy nastąpi pełne dopasowanie elementów w obciążonym węźle,
- krzywe zależności podatność - naprężenia pokazują, że węzeł charakteryzuje się stałą wartością podatności przez większość procesu obciążania, dopiero gdy obciążenie zbliża się do wartości obciążenia niszczącego, następuje gwałtowny wzrost podatności zarówno translacyjnej, jak i rotacyjnej,
- jeżeli w węźle nie występuje blokada przemieszczenia na kierunku przykładowego obciążenia zewnętrznego, to podatność translacyjna takiego węzła jest kilkukrotnie większa, niż podatność węzła z zablokowaną możliwością przemieszczenia,
- zastosowanie elementów zginanych o większej sztywności zmniejsza podatność rotacyjną węzła, ale równocześnie zmniejsza nośność węzła na zginanie.

Badania doświadczalne pozwalają na lepsze poznanie sposobu pracy obiektów wznoszonych w technologii lekkiego szkieletu drewnianego. Obserwacja odkształceń pojedynczych połączeń pod obciążeniem zewnętrznym, pozwoli w przyszłości na sformułowanie modelu obliczeniowego opisującego pracę całych węzłów.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiŚ/5/13 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-8. Projektowanie konstrukcji stalowych: Projektowanie węzłów.
- [2] Kozłowski A.: Kształtowanie szkieletów stalowych i zespolonych o węzłach półsztywnych, Oficyna wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
- [3] Broniewicz M.: Prognozowanie charakterystyk M-O [moment-obrót] węzłów typu "T" z rur prostokątnych na podstawie znajomości parametrów geometrycznych połączenia, Konstrukcje Stalowe, Nr 1, 1998, s. 36-38.
- [4] Klich R., Wojnar A., Kozłowski A.: Badania doświadczalne węzłów narożnych ram wykonanych z profili cienkościennych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Z. 50 [256], 2008, s. 121-129.
- [5] Leijten A.J.M.: Requirements for moment connections in statically indeterminate timber structures, Engineering Structures, vol. 33, 2011, pp. 3027-3032.
- [6] Scheibmair F., Quenneville P.: The quick connect moment connection for portal frame buildings – an introduction and case study, World Conference on Timber Engineering, WCTE 2012, Auckland, 2012.
- [7] Fournely E., Moutou Pitti R., Bouchair A.: Behavior of Timber Lattice Beam with Semi-Rigid Joints: analytical and experimental study, PRO LIGNO, vol. 8, no 3, 2012, pp. 19-41.
- [8] Gupta R., Gebremedhin K.G., Cooke R.J.: Analysis of metal-plate-connected wood trusses with semi-rigid joints, Transactions of the ASAE, vol. 35, no 3, 1992, pp. 1011-1018.

- [9] Patton-Mallory M., Gutkowski R.M., Soltis L.A.: Research Paper FPL 448 – Racking Performance of Light-Frame Walls Sheathed on Two Sides. U.S. Department of Agriculture, Forest Product Laboratory, 1983.
- [10] Arciszewska-Kędzior A., Kunecky J., Hasníková H., Sebera V.: Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: Experimental and numerical analysis, *Engineering Structures*, vol. 94, 2015, pp. 1-8.
- [11] Malesza M., Miedziałowski Cz.: Discrete analytical models of the wood-framed with sheathing building structures and selected experimental test results, *Archive of Civil Engineering*, vol. 49, no 2, 2003, pp. 213-240.
- [12] Baszeń M., Miedziałowski Cz.: Experimental tests of light wood-framed construction, in: *Lightweight structures in civil engineering*, Wydawnictwo Naukowe Micro-Publisher Jan B. Obrębski, Warszawa 2004, pp. 29-32.
- [13] Morlier J., Bos F., Castéra P.: Diagnosis of a Portal Frame using Advanced Signal Processing of Laser Vibrometer Data, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 297, no 1-2, 2006, pp. 420-431.

EXPERIMENTAL STUDIES OF JOINT DEFORMABILITY IN WOOD LIGHT-FRAME STRUCTURES

Summary

Most of currently known calculation models comprises simplicity. The values of internal forces, stresses or displacements obtained by these models are subjected to be inaccurate. To reach proper solution for analyzed problem it is necessary to recognize real behavior of the structure. The exact solution is possible by complying semi-rigid joints with its stiffness or semi-rigidity (inverse of stiffness) in the calculation model. The value of joint stiffness could be identified by experimental research. The paper presents results of experimental studies of joint behavior in wood light-framed structures. These studies were carried out to define axial and rotational stiffness (and semi-rigidity) of the joints. The experiments was processed on small-scale specimens. The results of other experimental studies showed that both the full-scale and small-scale experiments in a good way illustrate the behavior of the structure. During the tests displacements of specific point of the joints were recorded. The tests of axial and rotational semi-rigidity was carried out independently for different types of joints. The axial semi-rigidity of joint was calculated as the ratio of joint displacement increase to loading force increase, while rotational semi-rigidity as the ratio of joint rotation increase to bending moment increase. The axial semi-rigidity was determined for two types of joint with restricted and permissible displacement in the axis of external load. Rotational semi-rigidity was determined according to the thickness of rotated element. The obtained results were presented as graphs describing semi-rigidity-to-stress relationships. The semi-rigidity was linked with stress because the tests were not provided on normal dimension specimen.

Keywords: semi-rigid joint, joint stiffness and semi-rigidity, small scale experiments

Przesłano do redakcji: 20.12.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.