

Analiza deformacji jednoelementowego układu węzłowego rusztowania modułowego

Michał Pieńko

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: m.pienko@pollub.pl*

Streszczenie: Zapotrzebowanie rynku na coraz bardziej nietypowe konstrukcje, wymusza optymalne projektowanie układów rusztowań budowlanych pod względem bezpieczeństwa, ekonomii oraz czasu montażu. Tego typu podejście wymaga szczegółowej wiedzy w zakresie pracy statyczno-wytrzymałościowej elementów, jak również ich wzajemnego połączenia. W pracy przedstawiono badania laboratoryjne, dotyczące deformacji węzła rusztowania modułowego przy następujących obciążeniach: przy skręcaniu rygla, pod wpływem poziomej siły tnącej i podczas zginania w płaszczyźnie poziomej. W ramach badań został wykorzystany autorski uchwyt, umożliwiający obciążenie węzła wyżej wymienionymi obciążeniami. Wynikiem badań jest opis deformacji węzłów oraz wykresy obciążenie-przemieszczenie. Z badań przedstawionych w pracy wynika, że te wykresy zależności siła-przemieszczenie są powtarzalne, co w przypadku węzłów, które są montowane ręcznie, nie jest oczywiste. Oznacza to, że można je stosować jako podstawę weryfikacji nieliniowych analiz numerycznych, które będą musiały uwzględniać takie problemy jak: nieliniowości materiałowe, nieliniowości geometryczne, kontakt i tarcie.

Słowa kluczowe: badania laboratoryjne, rusztowania modułowe, deformacja węzła, odkształcenia plastyczne.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój programów komputerowych, służących do przeprowadzania obliczeń umożliwia przeprowadzenie dokładnych analiz statyczno-wytrzymałościowych rusztowań budowlanych jako układów prętowych. W praktyce inżynierskiej obliczenia sprowadzają się do określenia czy siły wewnętrzne, występujące w układzie nie przekraczają nośności elementów, w tym połączeń. Jednak, aby takiego sprawdzenie wykonać potrzebne są informacje o nośności tych elementów. W przypadku nośności przekroju elementów, jeżeli są one w dobrym stanie technicznym, wystarczy wiedza inżynierska i zalecenia normowe, natomiast w przypadku węzłów rusztowań projektant musi posiadać informacje o dopuszczalnych siłach wewnętrznych lub wręcz o przestrzennych zależnościach pomiędzy dopuszczalnymi różnymi rodzajami obciążeń. Opracowanie takich zależności wymaga określenia kryteriów nośności, które w przypadku rusztowań muszą uwzględniać dwa aspekty: wytrzymałość materiału oraz ograniczenia zmian własności materiałowych (np. wzmocnienia) i kształtu geometrii elementów, spowodowane koniecznością wielokrotnego montażu rusztowania. Obecnie w katalogach są podawane maksymalne dopuszczalne siły węzłowe, ale brak jest informacji czy dopuszczenie do powstania siły wewnętrznej o takiej wartości pozwala na dalsze użytkowanie rusztowania oraz, czy przy wyznaczaniu nośności węzła z zadaniem obciążenie, uwzględniono możliwość nałożenia się oddziaływań od innych elementów i z różnych rodzajów obciążeń.

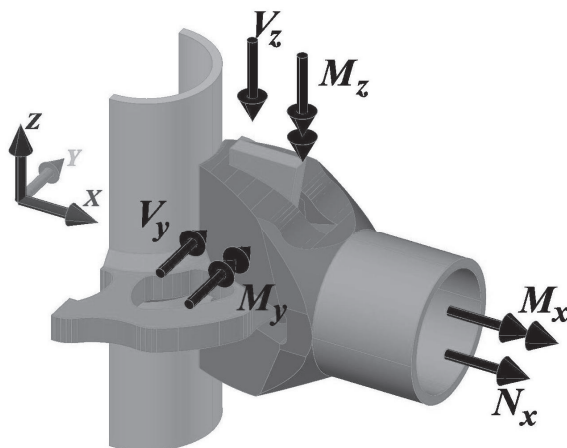
W pracy przedstawiono tematykę, związaną z modułowymi rusztowaniami budowlanymi i ich newralgicznym punktem jakim jest węzeł. Rusztowanie jest konstrukcją wielokrotnego użytku, które może podlegać różnorodnym formom obciążenia, w zależności od przeznaczenia. Połączenie elementów w większości systemów rusztowań modułowych polega na założeniu główki na rozetę i zablokowaniu jej za pomocą klina. Wielootworowe rozety umożliwiają połączenie maksymalnie ośmiu elementów, które mogą podlegać dowolnym obciążeniom. Takie rozwiązanie powoduje, że w połączeniu powstają luzy, zachodzi zjawisko tarcia pomiędzy poszczególnymi elementami a możliwość kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami zależy od rodzaju obciążenia. Należy tu zwrócić również uwagę, że węzeł łączy co prawda elementy stalowe, ale o różnych właściwościach mechanicznych, w tym o różnych charakterystykach materiałowych σ - ε (por. [1]). Złożona geometria elementów oraz wzajemna współpraca kilku komponentów węzła powodują, że w układzie powstaje przestrzenny układ naprężeń, którego wyznaczenie wymaga zarówno badań laboratoryjnych jak i analiz numerycznych. Natomiast znajomość tego stanu jest niezbędna do określenia nośności węzłów.

W celu określenia nośności połączenia jak również określenie charakterystyk, opisujących zachowanie węzła podczas obciążania, konieczne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych. W normach [2] i [3] nie ma dokładnych informacji, jak powinno wyglądać stanowisko badawcze. Dokładny opis i schematy stanowisk możemy odnaleźć tylko w przypadku połączeń, dotyczących złączy rurowych. Zgodnie z normami możliwe jest określanie nośności połączenia na podstawie badań całego pola rusztowania, co według autora może dostarczać wielu błędów ze względu na występowanie różnorodnych luzów. Tak jak w przypadku badań, przedstawionych w pracy [4], w tym artykule zostały opisane badania przeprowadzone na autorskim uchwycie, umożliwiającym obciążenie węzła w standardowej maszynie wytrzymałościowej. Badania laboratoryjne są pierwszym etapem poprzedzającym stworzenie modelu numerycznego, odwzorowującego zachowanie węzła pod wpływem obciążenia. Newralgiczne miejsce, jakim jest bezpośredni styk klina i talerzyka, nie jest widoczne w momencie przeprowadzania badań. Analiza numeryczna pozwala śledzić bezpośrednio przebieg w dowolnym miejscu modelu. Umożliwia również jednoczesne obciążenie węzła większą liczbą elementów i przeanalizowanie wzajemnego wpływu obciążeń na rozkład naprężeń. Aby analiza numeryczna była poprawna konieczne jest zarówno przeprowadzenie tożsamyh badań laboratoryjnych węzła jak również określenie charakterystyk materiałowych poszczególnych elementów wchodzących w skład węzła. W artykule [1] opisano badania laboratoryjne, na podstawie których określono charakterystyki materiałowe próbek materiału z rury stojaka oraz klina. W pracy [4] zbadano zachowanie się węzła rusztowania modułowego w przypadku rozciągania rygła, rozciągania stężenia, ścinania i zginania rygła w płaszczyźnie pionowej. W tej pracy zostaną przedstawione badania deformacji od pozostałych rodzajów obciążeń jakim może być poddany węzeł rusztowania modułowego. Badania zostały wykonane na przykładzie systemu firmy ALTRAD MOSTOSTAL.

2. Przygotowanie stanowisk badawczych

Badania zostały wykonane na prasie wytrzymałościowej MTS 250, której tłok ma możliwość ruchu w pionie oraz może obracać się wokół własnej osi. Podstawowe parametry tej prasy to: zakres sił ± 250 kN, skok tłoka ± 120 mm, kąt obrotu $\pm 55^\circ$, moment skręcający ± 2200 Nm. Przyłożenie obciążeń do węzła, pokazanych na Rys.1, wymagało zaprojektowania i wykonania odpowiednich uchwytów. Rozwiązania te zostały opisane w artykule [4],

gdzie opisano również badania laboratoryjne, w których analizowano pracę węzła pod wpływem takich sił i momentów jak: siła tnąca w płaszczyźnie pionowej V_z , moment, wywołujący zginanie w płaszczyźnie pionowej M_y , i siła rozciągająca rygiel N_x . Praca węzła pod wpływem pozostałych obciążeń, przedstawionych na Rys.1, czyli momentu skręcającego M_x , siły tnącej w płaszczyźnie poziomej V_y oraz momentu, zginającego w płaszczyźnie poziomej M_z , są przedmiotem niniejszej pracy. Ze względu na symetrię węzła jednoelementowego w każdym opisanym przypadku węzeł obciążano w jednym kierunku. Każde badanie zostało przeprowadzone pięciokrotnie, przy czym za każdym razem stosowano nowe komponenty węzła, dostarczone przez producenta.



Rys.1. Schemat obciążeń węzła rusztowania modułowego

2.1. Obciążanie węzła momentem skręcającym M_x

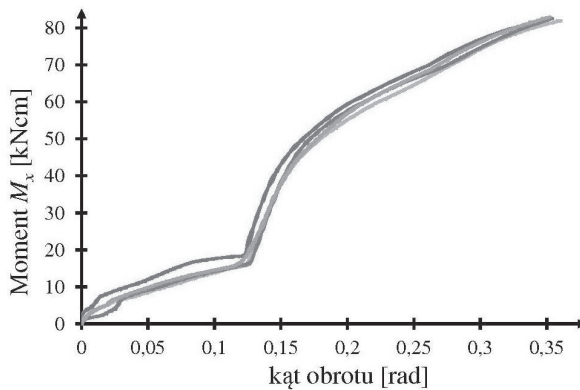
Pierwszym z rozpatrywanych układów obciążenia jest węzeł poddany skręcaniu rygla. Badanie zostało przeprowadzone przy pomocy maszyny MTS 250, w której możliwe jest zadanie momentu skręcającego. Ponieważ maszyna wytrzymałościowa nie była przystosowana do normatywnej średnicy rury rusztowania, zastosowano trzpień przykręcane bezpośrednio do rury, mające znacznie większą nośność w stosunku do komponentów węzła (Rys.2). W zaprojektowany uchwyt w postaci płaskownika z przyspawanymi obejmami zamontowano fragment rury stojaka z talerzykiem.



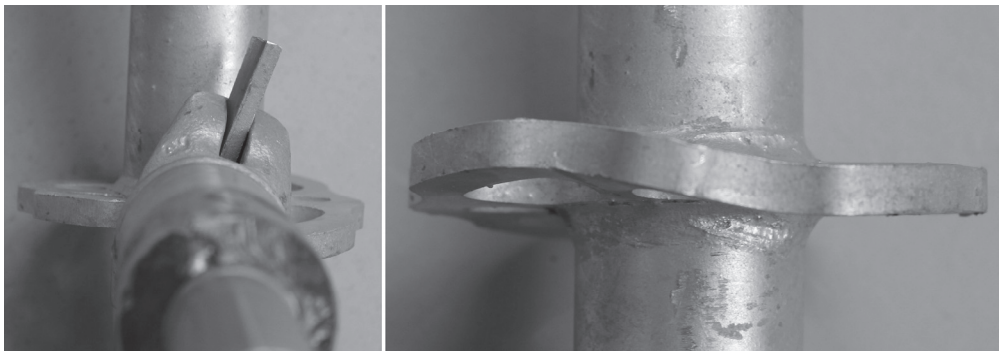
Rys.2. Uchwyt zastosowany w przypadku skręcania rygla M_x

Szczelina w głowni rygła jest o trzy milimetry większa niż grubość talerzyka. Tego typu odstęp powoduje, że w przypadku skręcania sztywność połączenia do momentu oparcia się obu ścianek głowni o talerzyk jest znikoma (Rys.3). Elementem zapewniającym sztywność do momentu obrotu o ok. 7° jest tylko klin oraz wyokrąglenie głowni bezpośrednio dotykające rurę rygła. Przemieszczenie, po którym sztywność połączenia wzrasta, wykracza poza zakres przemieszczeń z jakimi mamy do czynienia w konstrukcjach rusztowań. Tak duże skręcenie rygła nie jest możliwe, bo oznaczałoby znaczne odkształcenie konstrukcji, a więc przekroczenie dopuszczalnych nośności elementów, oraz przekroczenie stanów granicznych użytkowania.

Zniszczenia powstałe pod wpływem momentu skręcającego dotyczą klina, który uległ wygięciu jak również nastąpiło skręcenie talerzyka w obrębie oddziaływania ścianek głowni. Na rys.4 można zauważyć obtarcia w obrębie bezpośredniego oddziaływania głowni na rurę. W katalogu producenta możemy znaleźć informację na temat nośności węzła w przypadku skręcania o wartości ok. 50kNcm co stanowi ok. 25% nośności obliczeniowej rury rygła.



Rys.3. Wykres zależności moment skręcający-kąt obrotu w przypadku skręcania rygła

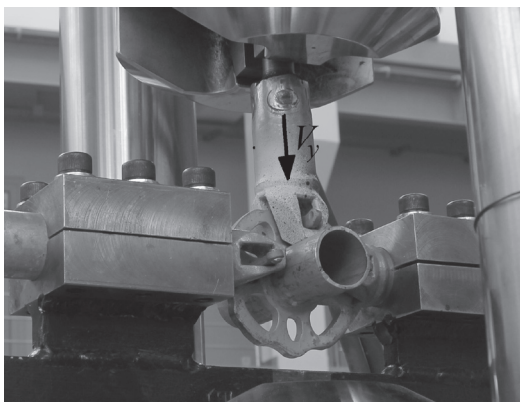


Rys.4. Forma zniszczenia węzła w przypadku skręcania rygła

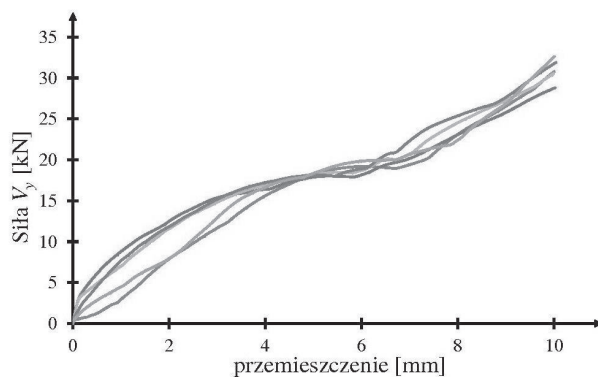
2.2. Obciążenie węzła siłą ścinającą V_y

Obciążenie w postaci siły tnącej w płaszczyźnie pomostu jest obciążeniem specyficznym, ale nie wykluczonym. Mamy z nim do czynienia np. w przypadku kotwienia rusztowania do budynku. Sytuacja ta występuje, gdy trzeba ominąć otwór w ścianie lub inną przeszkodę, uniemożliwiająca montaż łącznika kotwiącego bezpośrednio do stojaka.

Uzyskanie czystego ścinania na maszynie wytrzymałościowej, służącej do osiowego rozciągania, jest praktycznie niemożliwe. Zawsze będziemy mieli do czynienia ze zginaniem. W celu zminimalizowania wpływu zginania na formę odkształcenia pod wpływem ścinania w zaproponowanym uchwycie zminimalizowano ramię działania siły poprzez maksymalne usztywnienie uchwytu (Rys.5). Siła tnąca powinna być przyłożona bezpośrednio do rygła, lecz tego typu obciążenie nie byłoby możliwe w dostępnych maszynach laboratoryjnych i wymagałoby stworzenia kolejnego uchwytu o skomplikowanej budowie. Problemem okazało się również przyłożenie samej siły osiowej. W pierwszych próbach przyłożono siłę do rygła pionowego jako rozciągającą, ale po przekroczeniu siły ok. 20kN, talerzyk i klin w połączeniu służącym do przekazania siły, ulegały odkształceniom plastycznym. Dlatego też zdecydowano się na obciążanie węzła, w zaproponowanym układzie, siłą ściskającą. W takim układzie obciążenie jest przekazywane przez znacznie większą powierzchnię styku rury i głowni rygła.

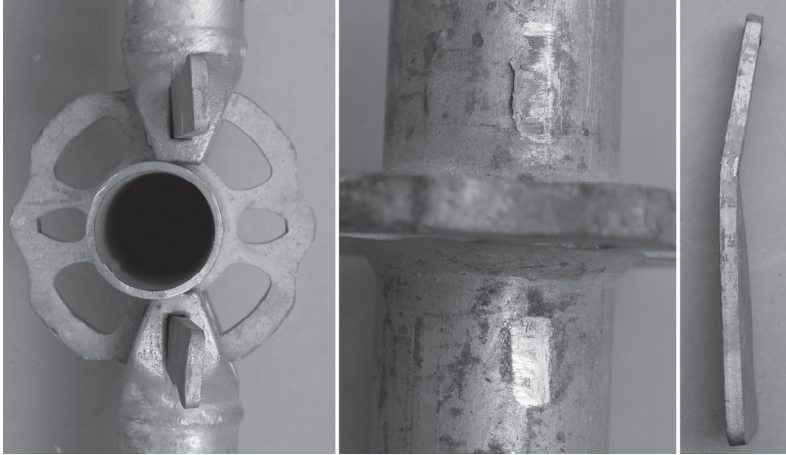


Rys.5. Uchwyt zastosowany w przypadku ścinania rygła



Rys.6. Wykres zależności siła-przemieszczenie w przypadku ścinania rygła

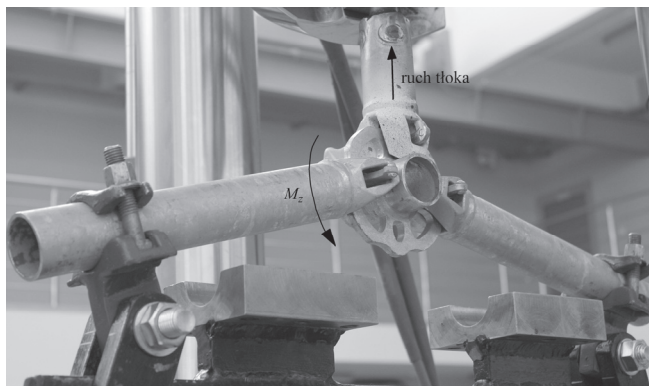
Na Rys.6 pokazane są wykresy siły V_y w funkcji przemieszczenia. Na wykresie tym charakterystycznym punktem jest zmiana nachylenia wykresów po przekroczeniu przemieszczenia ok. 6mm. W zakresie badanych obciążeń nie uzyskano momentu, w którym następowalby nagły wzrost przemieszczeń czyli całkowite zniszczenie węzła. Producent określa nośność węzła w przypadku siły ścinającej w płaszczyźnie pomostu na poziomie 9,3kN czyli należy przypuszczać, że nośność ta jest wyznaczona na podstawie nośności elementów, łączonych za pomocą rozety.



Rys.7. Forma zniszczenia węzła w przypadku ścinania rygła w płaszczyźnie poziomej

2.3. Badanie pracy węzła podczas zginania rygła w płaszczyźnie poziomej

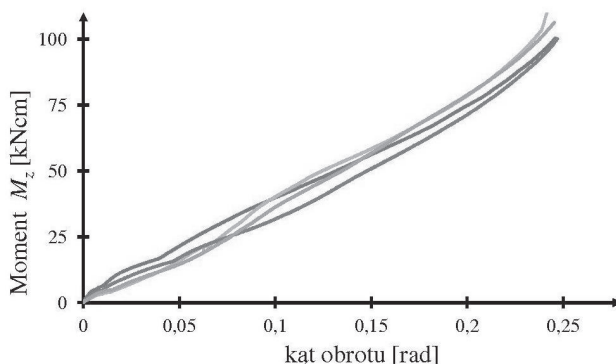
W celu uzyskania momentu zginającego w płaszczyźnie poziomej za pomocą maszyny służącej do osiowego rozciągania wykorzystano ten sam uchwyt jak w przypadku momentu zginającego M_y [4]. Różnica w badaniu polegała na zmianie elementów, podlegających rozciąganiu, oraz obróceniu płaszczyzny pracy rygli i węzła.



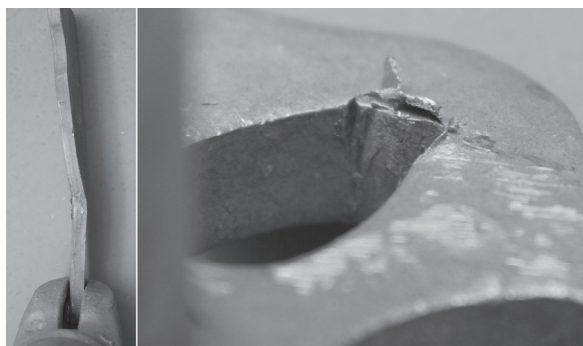
Rys.8. Uchwyt zastosowany w przypadku zginania rygła momentem M_z

Siła uzyskana po próbnym obciążeniu była na tyle mała, że nie wystąpił problem, opisany w poprzednim punkcie, tzn. nie nastąpiło zniszczenie elementów, które miały tylko przekazać obciążenie. Dlatego zdecydowano się na obciążanie węzła siłą rozciągającą, przekazywaną bezpośrednio z klina na talerzyk. Siła, przy której przerywano obciążanie wynosiła zaledwie 6kN, nie powoduje praktycznie żadnych odkształceń zarówno w zakresie siły rozciągającej jak również ścinania elementu w płaszczyźnie badanych elementów. Zgodnie z zasadami mechaniki zginanie uzyskano poprzez zastosowanie ramienia działania siły (Rys.8). Ponieważ węzeł poddany zginaniu ulega znacznym odkształceniom konieczne było zastosowanie podwójnych przegubów, umożliwiających znaczny obrót uchwytów bez wprowadzania dodatkowych obciążeń.

W przypadku zginania momentem M_z nie zaobserwowano znacznych zmian w przebiegu wykresu zależności moment – kąt obrotu (Rys.9). Badanie przerwano ponieważ zakres przemieszczeń w znacznym sposób przekroczył wartość 16° , które w praktyce oznaczają chociażby przekroczenie stanu granicznego użytkowania. Zniszczenia na skutek obciążenia węzła momentem zginającym zaobserwowano jedynie w zakresie klina (Rys.10), który uległ wygięciu oraz talerzyka w miejscu styku z klinem. Producent rusztowań określa nośność węzła w przypadku zginania na poziomie $M_z=22\text{kNcm}$, co stanowi ok. 20% nośności obliczeniowej rury rygla.



Rys.9. Wykres zależności moment skręcający-kąt obrotu w przypadku skręcania rygla



Rys.10. Forma zniszczenia węzła w przypadku zginania rygla z płaszczyźnie poziomej

3. Podsumowanie

Przedstawione badania laboratoryjne stanowią uzupełnienie badań opisanych w artykule [4]. W zależności od przyłożonego obciążenia obserwowano różne formy zniszczenia. W przypadku zginania i skręcania badania przeprowadzono w zakresie znacznie wykraczającym poza zakres przemieszczeń występujących w rzeczywistych konstrukcjach. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wartości podawane przez producentów rusztowań nie są związane ze zmianą sposobu pracy węzła. Niestety producent nie podaje na podstawie jakich kryteriów przyjęto zakresy dopuszczalnych sił węzłowych.

Ważnym wnioskiem z badań, wskazującym, że mogą one być podstawą do weryfikacji analiz numerycznych, jest to, że widać powtarzalność zachowania się węzła w kolejnych badaniach. Biorąc pod uwagę, że każdy z badanych elementów był składany oddzielnie, to różna siła wbicia klina mogła doprowadzić do uzyskania zupełnie innych wyników. Należy

przypuszczać, że ukształtowanie powierzchni styków komponentów węzła jest tak wykonane, że w węzłach rusztowania (przynajmniej nowych fabrycznie) oddzielnie montowanych, układ naprężeń przy tych samych obciążeniach jest podobny.

Ponieważ w rzeczywistych konstrukcjach dochodzi do nałożenia się poszczególnych form obciążenia, to kolejnym krokiem badań będą analizy numeryczne, które pozwolą na bezpośrednio uwzględnienie ich wzajemnego wpływu na rozkład naprężeń.

Autor jest uczestnikiem projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy - Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- 1 Pieńko, M., Błazik-Borowa E. The verification of the numerical model of a modular scaffolding node based on laboratory tests. Mat. konf. 20th International Conference on Computer Methods in Mechanics, Poznań 2013, p. MS08-5-MS08-6 (2013).
- 2 PN-EN 12811-3:2002. Tymczasowe urządzenia budowlane. Część 3: Obciążenia badawcze.
- 3 PN-EN 12810-2:2002. Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych. Część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji.
- 4 Pieńko, M.: Analiza deformacji układów węzłowych rusztowań budowlanych, Budownictwo i Architektura, 12(1)/2013, s. 267-274 (2013).

The analysis of the deformation of single node in a modular scaffolding system

Michał Pieńko

Department of Structure Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: m.pienko@pollub.pl

Abstract: The increasingly complex engineering structures of scaffoldings require optimal designing in terms of safety, economy and erection. This approach requires detailed knowledge of the static-strength properties of elements, as well as knowledge of their interconnections. The paper deals with the laboratory tests of deformations in modular scaffolding nodes for the following loads: torque of the ledger, shearing and bending in the horizontal plane. The original grip was used in the study, which allows to load the node with aforementioned loads. The result of research is a description of the deformation of the nodes and the load-displacement graphs. The studies presented in the paper indicate that graphs are repeatable, which is not obvious in the case of nodes assembled manually. This means that it can be used as a basis for the verification of non-linear numerical analysis, which will have to take into account such issues as the material nonlinearities, geometric nonlinearities, contact and friction.

Keywords: the laboratory research, modular scaffoldings, the deformation of nodes, plastic deformations.