

Marcin GÓRSKI¹
Aleksander KOZŁOWSKI²

PODATNOŚĆ PODPARCIA PŁATWI NA PODPORZE A JEJ MOMENT KRYTYCZNY

Przedstawiono analizę podatności trzech najczęściej stosowanych w praktyce rodzajów połączeń płatwi z dźwigarem oraz wpływ tych podatności na moment krytyczny płatwi. Badania dotyczyły płatwi wykonanych z kształtowników dwuteowych, o schemacie statycznym belki ciągłej. Każde z połączeń analizowane było w trzech wariantach, różniących się między sobą wysokością zamocowania łączników płatwi do dźwigara. Otrzymane wyniki porównano z teoretycznym założeniem tzw. podparcia widełkowego, stosowanego w obliczeniach projektowych. Podatność połączeń określano na dwa sposoby: za pomocą badań doświadczalnych oraz poprzez analizę modeli połączeń metodą elementów skończonych. Wartości momentu krytycznego również wyznaczano kilkoma drogami. Wykorzystano w tym celu zarówno podstawowy wzór wyprowadzony z teorii sprężystości, jak również programy MES: LTBeam i Autodesk Simulation Multiphysics. Programy te różniły się między sobą stopniem zaawansowania, a także sposobem modelowania płatwi oraz uwzględniania podatności połączeń w obliczeniach momentu krytycznego. Badania doświadczalne i analizy obliczeniowe pozwalają stwierdzić jak zmienia się wartość momentu krytycznego w zależności od zastosowanego typu połączenia. Badania wykazują wzrost odporności na zwichrzenie wraz ze zwiększaniem wysokości zamocowania łączników płatwi do dźwigara. Jednocześnie różnice w wartościach momentu krytycznego dla różnych rodzajów połączeń nie przekraczają 10%. Analiza wykazuje również, że wzór analityczny, stosowany powszechnie w projektowaniu, znacząco zaniża rzeczywiste wartości momentu krytycznego płatwi wieloprzęsłowej, co może powodować niepotrzebne przewymiarowanie konstrukcji.

Słowa kluczowe: płatew, zwichrzenie, podparcie widełkowe, połączenia, metoda elementów skończonych

¹ Autor do korespondencji: Marcin Górski, Nowdoworze 60a, 33-112 Tarnowiec, tel. 790 75 62 76, marcin.gorski.3@gmail.com

² Aleksander Kozłowski, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, tel. 178 65 12 81, kozlowsk@prz.edu.pl.

1. Wprowadzenie

Zachowanie się płatwi, a co za tym idzie, sposób sprawdzenia jej nośności, zależy od stopnia współpracy płatwi z przekryciem dachowym.

Norma PN-EN 1993-1-3 [1], dotycząca projektowania elementów z kształtowników giętych na zimno rozróżnia następujące klasy konstrukcyjne:

Klasa I: uwzględnia się udział poszycia (blach fałdowych, kasetonów) w zapewnieniu nośności i stateczności całego układu konstrukcyjnego,

Klasa II: uwzględnia się udział poszycia w zapewnieniu nośności i stateczności pojedynczego elementu konstrukcyjnego,

Klasa III: poszycie wyłącznie przekazuje obciążenie na podpierające je elementy.

Przez analogię, postanowienia te można rozszerzyć na płatwie o przekroju walcowanym, które będą przedmiotem dalszych analiz. W artykule rozpatruje się przypadek klasy III, tzn. przekrycie dachowe nie współpracuje z płatwią.

Kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa płatwi ma prawidłowe oszacowanie odporności płatwi na utratę stateczności płaskiej postaci zginania, czyli na zwichrzenie.

Norma PN-EN 1993-1-1 [2] podaje metodę obliczania nośności na zwichrzenie elementu zginanego, przez redukcję nośności przekroju na zginanie współczynnikiem zwichrzenia χ_{LT} . Współczynnik zwichrzenia zależy głównie od momentu krytycznego przy zwichrzeniu sprężystym M_{cr} .

Moment krytyczny przy zwichrzeniu sprężystym można oszacować kilkoma metodami:

- za pomocą wzorów znanych z teorii sprężystości:

W normie [2] nie podano wzorów do określania momentu krytycznego. Wzory te podano w prenormie ENV 1993-1-1 [3], a także w wielu publikacjach, m.in. [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Podstawowy wzór, zaczerpnięty z [3] ma postać:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - C_2 z_g - C_3 z_j \quad (1)$$

Wzór ten obejmuje jedynie teoretyczne przypadki warunków brzegowych: swobodny koniec, pełne utwierdzenie, lub tzw. podparcie widełkowe na podporze, które polega na zablokowaniu przemieszczenia bocznego oraz obrotu przekroju podporowego, przy jednoczesnym zapewnieniu belce swobody obrotu w płaszczyźnie zginania.

- metodą elementów skończonych. Istnieje wiele programów, które umożliwiają obliczenie wartości momentu krytycznego elementów zginanych,

różnią się one jednak sposobem modelowania belki i obliczania momentu krytycznego. Przykładami takich programów są wykorzystane w niniejszej pracy LTBeam [11], a także Autodesk Simulation Multiphysics (ASM) [12], znany dawniej pod nazwą Algor. W programach tych należy także zdefiniować warunki brzegowe podparcia na podporze.

Powszechnie znany Autodesk Robot Structural Analysis, pomimo iż również jest programem MES, w przypadku wyznaczania momentu krytycznego korzysta z podejścia analitycznego obliczając M_{cr} ze wzoru (1), co przy skomplikowanych warunkach podparcia i obciążenia prowadzi niekiedy do błędno oszacowania wartości momentu krytycznego [13].

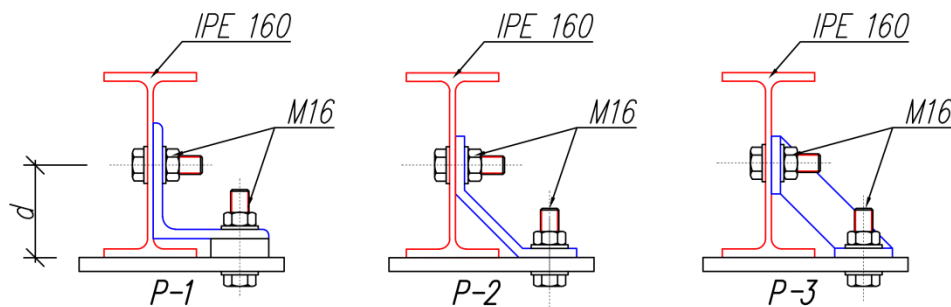
Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk podatnościowych połączeń płatwi walcowanych na gorąco z ryglami dachowymi i zbadanie wpływu tych parametrów na wartość momentu krytycznego belki. Przeanalizowano trzy najczęściej stosowane typy połączenia płatwi z dwuteownikami walcowanymi, które przedstawiono na rys.1:

Typ P-1: połączenie przy pomocy kątownika 100x100x8, wraz z podkładką dystansową z blachy, łączone śrubami M16

Typ P-2: połączenie przy pomocy łączników z blachy o grubości 8 mm giętej lub spawanej z mniejszych elementów, łączonej śrubami M16

Typ P-3: połączenie przy pomocy prostopadłych do siebie łączników z blach o grubości 8 mm przyspawanych do ukośnego żebra o tej samej grubości oraz śrub M16.

Jako płatew przyjęto kształtnik IPE160. Wszystkie elementy wykonano ze stali S235.



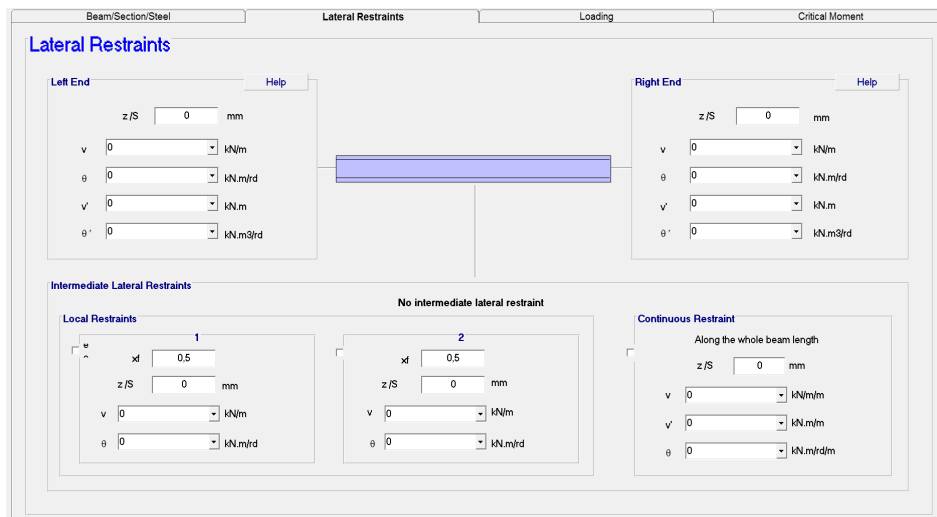
Rys. 1. Badane typy połączenia płatwi dwuteowych z dźwigarem.

Fig. 1. Tested types of I-beam purlins with the girder connections.

2. Obliczenia momentu krytycznego metodą elementów skończonych

2.1. Obliczenia programem LTBeam

LTBeam jest darmowym programem służącym wyznaczaniu wartości momentu krytycznego metodą elementów skończonych. Dzieli on belkę na 100 – 200 elementów prętowych, o 7 stopniach swobody w każdym węźle (a właściwie o 4 stopniach swobody, gdyż 3 pozostałe są zbędne przy obliczaniu zwichrzenia). Dodatkowy stopień swobody w stosunku do standardowych modeli prętowych wynika z uwzględnienia spaczenia przekrojów. Program umożliwia m.in. uwzględnienie podatności podpór (rys. 2), dowolnego rozkładu momentu zginającego, dodatkowych podpór pośrednich, czy miejsca przyłożenia obciążenia. Wynik uzyskuje się rozwiązując zagadnienie uogólnionego problemu własnego (analogicznie jak to ma miejsce w dynamice).

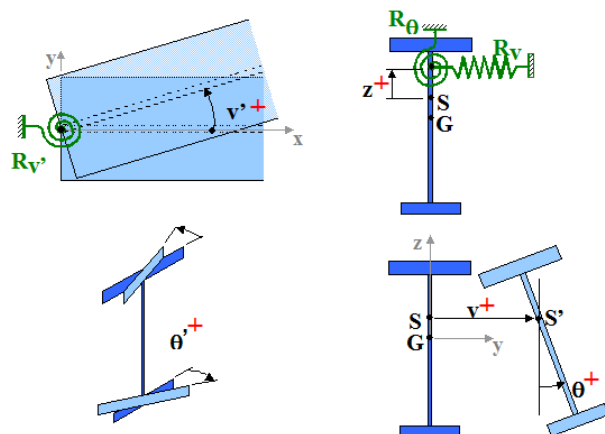


Rys. 2. Okno programu LTBeam, umożliwiające wprowadzenie podatności podpór do obliczeń.

Fig. 2. LTBeam's window for entering flexibility of supports included in calculations.

LTBeam umożliwia wprowadzenie podpór sprężystych na 4 stopniach swobody (rys. 3):

1. Przesunięcie boczne środka ścinania przekroju (v)
2. Skręcenie przekroju względem środka ścinania (θ)
3. Obrót elementu wywołany zginaniem bocznym (v')
4. Spaczenie przekroju (θ')



Rys. 3. Dostępne warunki brzegowe belki w programie LTBeam.

Fig. 3. Available beam boundary conditions in LTBeam.

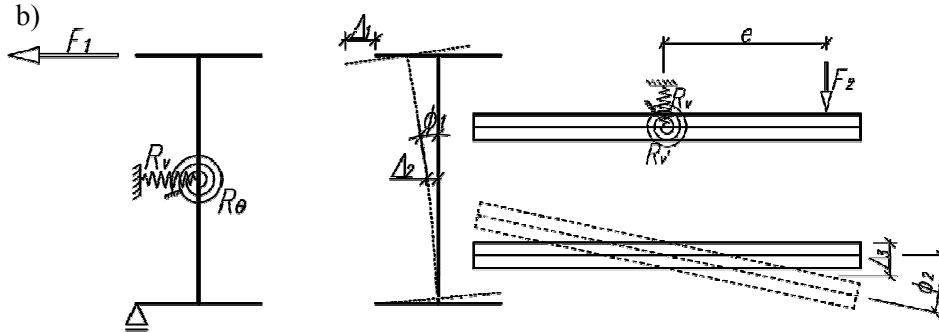
2.2. Obliczenia programem Autodesk Simulation Multiphysics (Algor)

Program ten jest bardzo zaawansowanym narzędziem korzystającym z metody elementów skończonych i umożliwiającym wirtualne badanie szerokiego spektrum zjawisk fizycznych, takich jak statyka, dynamika, mechanika płynów, temperatura oraz wiele innych. Algor oferuje również analizę wyboczeniową, która oblicza współczynnik krytyczny oraz postacie utraty stateczności rozwiązując uogólniony problem własny. Modelując zginaną belkę za pomocą elementów przestrzennych, pod postacią utraty stateczności kryje się zwichrzenie belki. Analiza wyboczeniowa jest tu analizą liniową.

3. Wyznaczenie charakterystyk podatnościowych połączenia płatwi z dźwigarem

3.1 Sposób obliczania podatności

W badaniach uwzględniono podatności podpór dla trzech pierwszych stopni swobody, dostępnych w programie LTBeam (rys.3), pozostawiając nieskrępowaną możliwość deplanacji przekrojów podporowych. Wyznaczanie charakterystyk podatnościowych przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie badano model połączenia przykładając poziomą siłę F_1 do środka pasa górnego fragmentu płatwi i odczytując wartości przemieszczeń górnego pasa (Δ_1) oraz w połowie wysokości belki (Δ_2), tak jak to pokazano na rys. 4a. Następnie ten sam model obciążano poziomą siłą F_2 przyłożoną na wysokości połowy średnicy i działającą na pewnym mimośrodku e względem połączenia (rys. 4b), odczytując wartość przemieszczenia miejsca przyłożenia siły (Δ_3).



Rys. 4. Schemat statyczny badanego połączenia przy wyznaczaniu podatności R_v , R_θ oraz $R_{v'}$.

Fig. 4. Static schema of tested connection for determine flexibility R_v , R_θ and $R_{v'}$.

Wartości podatności wyznaczano ze wzorów (2), (3) i (4):

$$R_v = \frac{F_1}{\Delta_2} \quad (2)$$

$$R_\theta = \frac{M_1}{\phi_1} = \frac{F_1 \cdot h}{2 \cdot \arctg\left(\frac{\Delta_1 - \Delta_2 - \frac{F_1 \cdot h^3}{2 \cdot E \cdot l \cdot t_w^3}}{0,5 \cdot h}\right)} \quad (3)$$

$$R_{v'} = \frac{M_2}{\phi_2} = \frac{F_2 \cdot e}{\arctg\left(\frac{\Delta_3 - \Delta_2}{e}\right)} \quad (4)$$

gdzie: h – wysokość belki, l – długość belki

3.2 Badania doświadczalne

Do badań doświadczalnych wykorzystano belkę IPE160 o długości 60 cm łączoną z badanymi łącznikami śrubami na wysokości $d=80$ mm. Jako pas górny dźwigara zastosowano fragment kształtownika HEA180, który zabezpieczono przed możliwością przesuwu oraz obrotu.

W pierwszym etapie przykładano poziomą siłę F_1 do pasa górnego belki za pomocą szekli ze śrubą przełożoną przez otwór w belce, do której zamocowany został siłomierz o zakresie pomiarowym 5kN. Wartość siły regulowano poprzez dokręcanie do blachy oporowej nakrętki na gwintowanym pręcie rozciąganym połączonym z siłomierzem (rys. 5).



Rys. 5. Widok stanowiska badawczego w pierwszym etapie badań wraz z połączeniem P-1.

Fig. 5. View of the test stand in first stage of research with the P-1 connection.

Badano przemieszczenia w 4 punktach belki (rys. 6) – pasa górnego (czujnik 1), środka belki (czujnik 2), pasa dolnego belki (czujnik 3) oraz podpory w postaci dźwigara (czujnik 4). Dodatkowo mierzono bezpośrednio obrót belki przy pomocy inklinometru przymocowanego do środka płatwi (na rys. 6 zaznaczony strzałką).

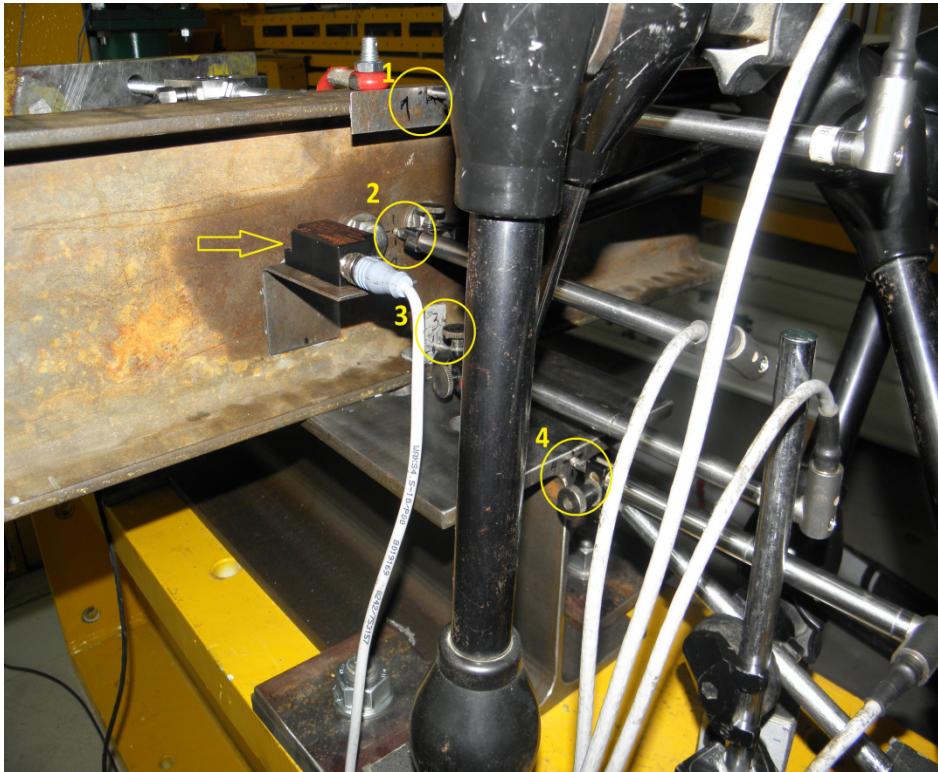
Każde z połączeń obciążano w następujący sposób:

- 1) stopniowe przykładanie siły do wartości 3 kN,
- 2) odciążenie do zera,
- 3) przyłożenie siły 3 kN, a następnie stopniowe jej zwiększanie do maksymalnej możliwej wartości. W przypadku połączeń P-1 oraz P-2 były to siły powodujące uplastycznienie łączących elementów. W przypadku połączenia P-3 maksymalna siła była ograniczona zakresem pracy siłomierza (5 kN).
- 4) całkowite odciążenie.

Połączenie P-1 na końcu jeszcze raz obciążono siłą do wartości 4 kN, po czym odciążono do zera.

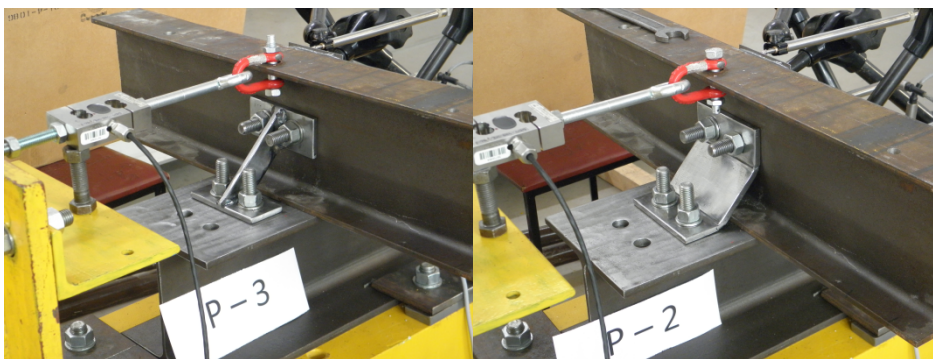
Na rys. 7 przedstawiono widok badanych połączeń P-2 oraz P-3.

Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wykresy z wyników badań.



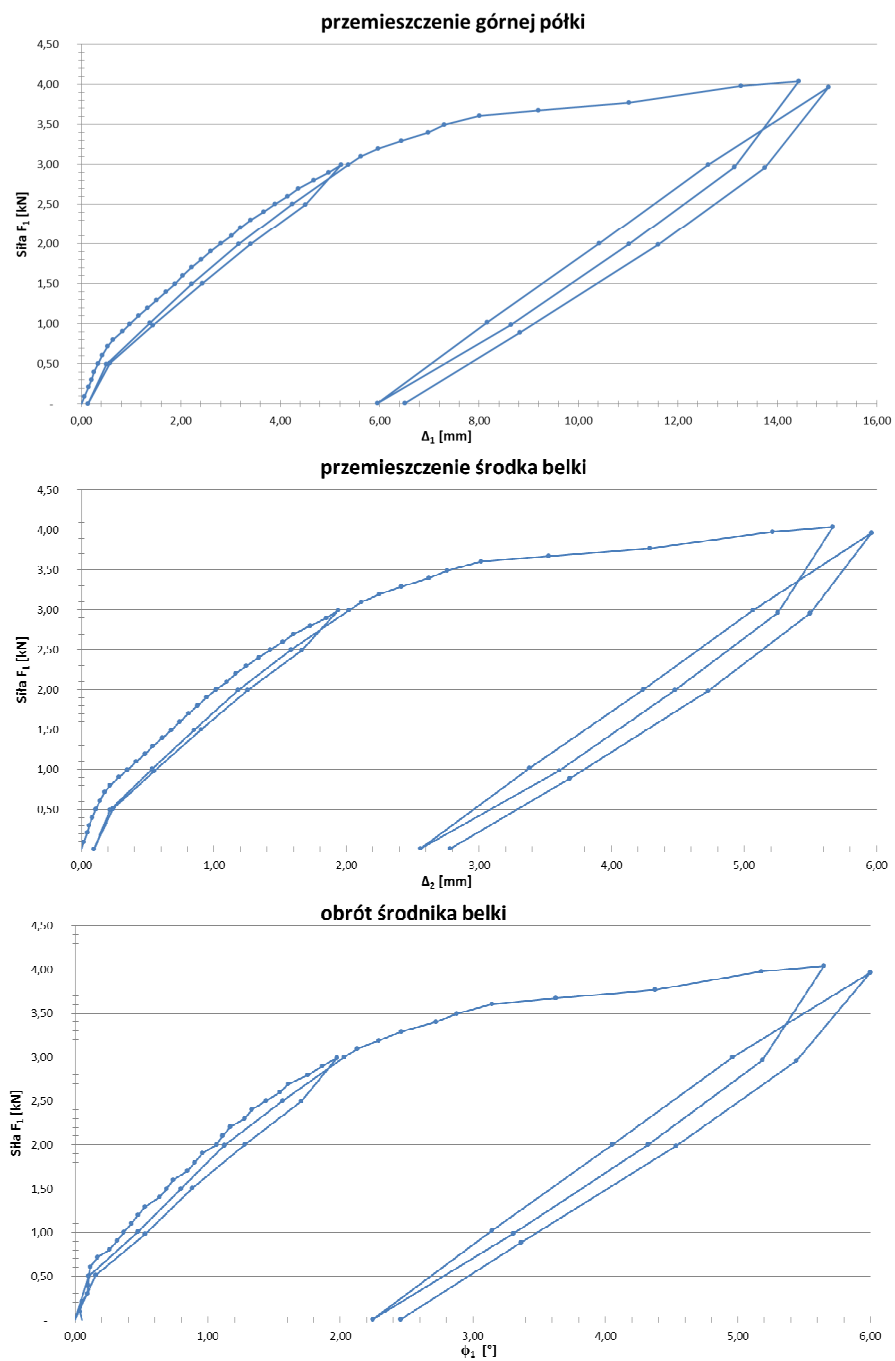
Rys. 6. Rozmieszczenie czujników badających przemieszczenia (opis w tekście).

Fig. 6. Arrangement of displacement sensors (see text).



Rys. 7. Widok połączeń P-2 oraz P-3 przed badaniem.

Fig. 7. View of the P-2 and P-3 connections before the test.



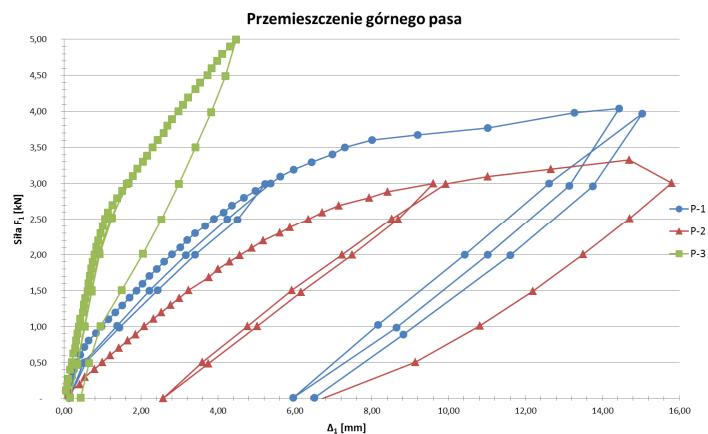
Rys. 8. Wybrane wyniki badań połączenia P-1.

Fig. 8. Selected results of the P-1 connection test.



Rys. 9. Widok odkształconych połączeń.

Fig. 9. View of the deformed connections.

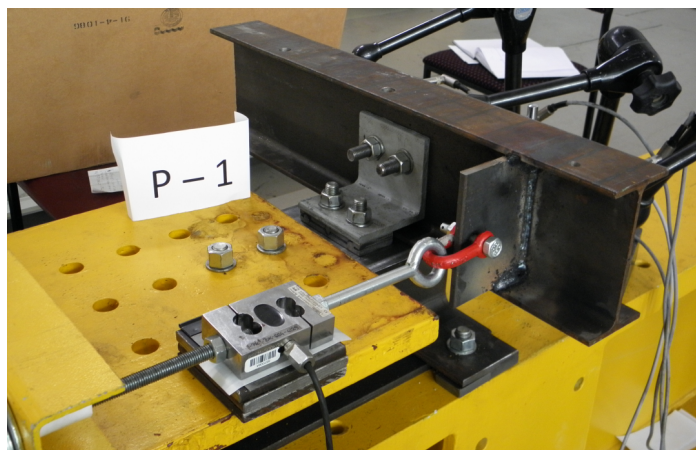


Rys. 10. Porównanie przemieszczeń górnego pasa dla rodzajów połączeń.

Fig. 10. Comparison of displacements of top flange for connections types.

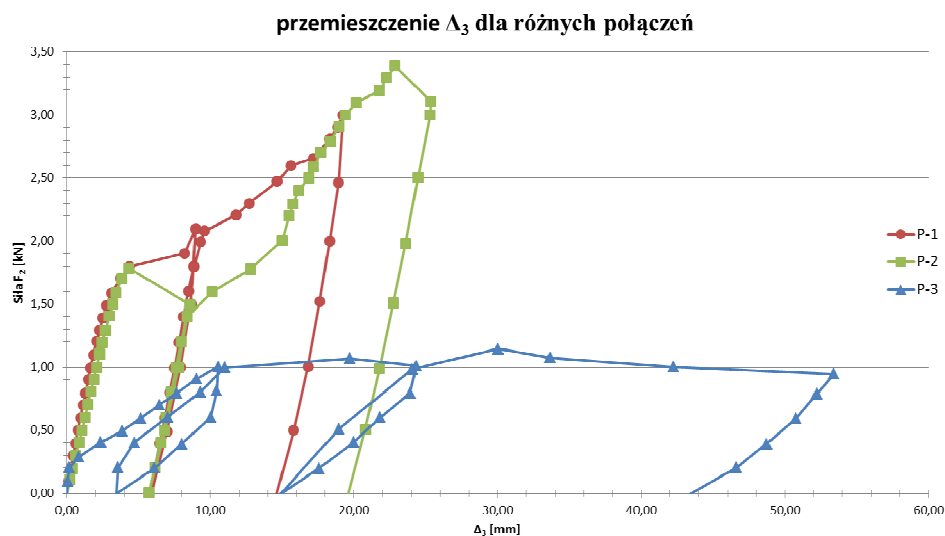
Przykładowe porównanie wyników badań poszczególnych łączników przedstawiono na rys. 10.

W drugim etapie połączenia obciążano mimośrodowo siłą F_2 poprzez żebro przyspawanego do belki w odległości 20 cm od środka połączenia (rys. 11) Sposób przekazywania i regulowania siły pozostał taki sam, jak w pierwszym etapie. Przesunięcia badano na wysokości środka przekroju w miejscu przyłożenia siły, na środku belki oraz po przeciwnej stronie, również w odległości 20 cm od środka belki. Dodatkowo mierzono przemieszczenie pasa górnego dźwigara. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 12.



Rys. 11. Widok stanowiska badawczego w drugim etapie badań.

Fig. 11. View of the test stand in second stage of research.



Rys. 12. Porównanie przemieszczeń Δ_3 różnych typów połączeń.

Fig. 12. Comparison of displacements Δ_3 for different types of connections.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono podatności podpór R_v , R_θ oraz $R_{v'}$ korzystając ze wzorów (2) - (4).

Zestawienie podatności badanych połączeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości podatności połączeń otrzymane w badaniach doświadczalnych

Table 1. Values of connections' flexibility received from experimental tests.

połączenie	R_v [kN/m]	R_θ [kNm/rad]	$R_{v'}$ [kNm/rad]
P - 1	1521	6,9	31,8
P - 2	1032	4,9	26,3
P - 3	12488	34,4	3,9

Z powyższej tabeli wynika, że połączenie za pomocą kątownika (P-1) oraz za pomocą giętej blachy (P-2) wykazują podobne właściwości podatnościowe, przy czym około 20 – 50% sztywniejsze okazuje się połączenie P-1. Zdecydowanie najsztwniejszym połączeniem na kierunkach v oraz θ jest połączenie P-3, posiada jednak bardzo niewielką sztywność w kierunku v' . Tym samym w największym stopniu odpowiada ono warunkom podparcia widelkowego.

3.3. Analiza metodą elementów skończonych

Analizę MES podatności połączeń wykonano programem Autodesk Simulation Multiphysics, dla wycinka belki o długości 40cm.

Połączenia zamodelowano z elementów przestrzennych, na które składały się: fragment płatwi, element łączący, śruby oraz pas górny dźwigara. Wszystkie części połączenia utworzono z 8-węzłowych sześciennych oraz oktaedrycznych elementów skończonych wielkości 3 mm. Oddziaływania pomiędzy płatwią, dźwigarem oraz elementem łączącym przyjęto jako powierzchniowe z uwzględnieniem tarcia spoczynkowego, ze współczynnikiem 0,2. Elementy miały zatem swobodę odrywania się od siebie, ale nie mogły przez siebie przenikać. W warunkach brzegowych przyjęto pełne utwierdzenie pasa górnego dźwigara. Obciążenie w pierwszym etapie zamodelowano w postaci poziomej siły skupionej F_1 przyłożonej do środka pasa górnego dźwigara, a w drugim jako dwie siły poziome o wartości $\frac{1}{2} F_2$ każda, przyłożone do skrajnych krawędzi pasów płatwi, na mimośrodku $e = 20$ cm od środka połączenia (rys. 13).

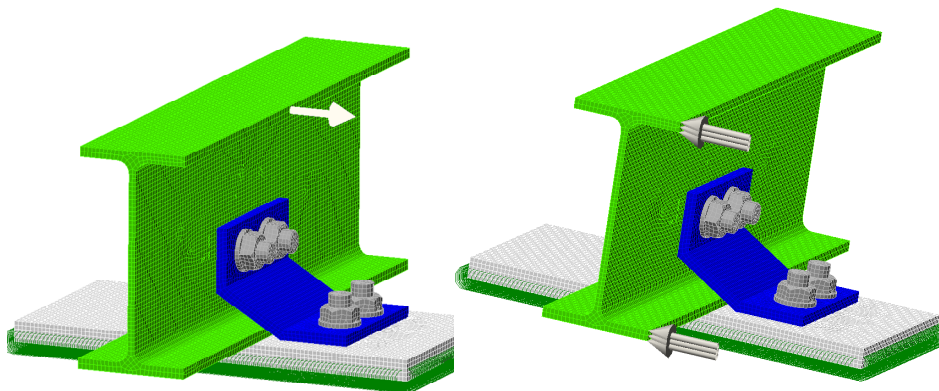
Każdy typ połączenia, pokazanego na rys. 1 posiadał dodatkowo 3 wersje, różniące się wysokością zamocowania łącznika do płatwi d:

Wersja A: oś śrub w środku ciężkości płatwi ($d = 80$ mm) – ta wersja została również przebadana doświadczalnie

Wersja B: oś śrub powyżej środka ciężkości płatwi ($d = 120$ mm),

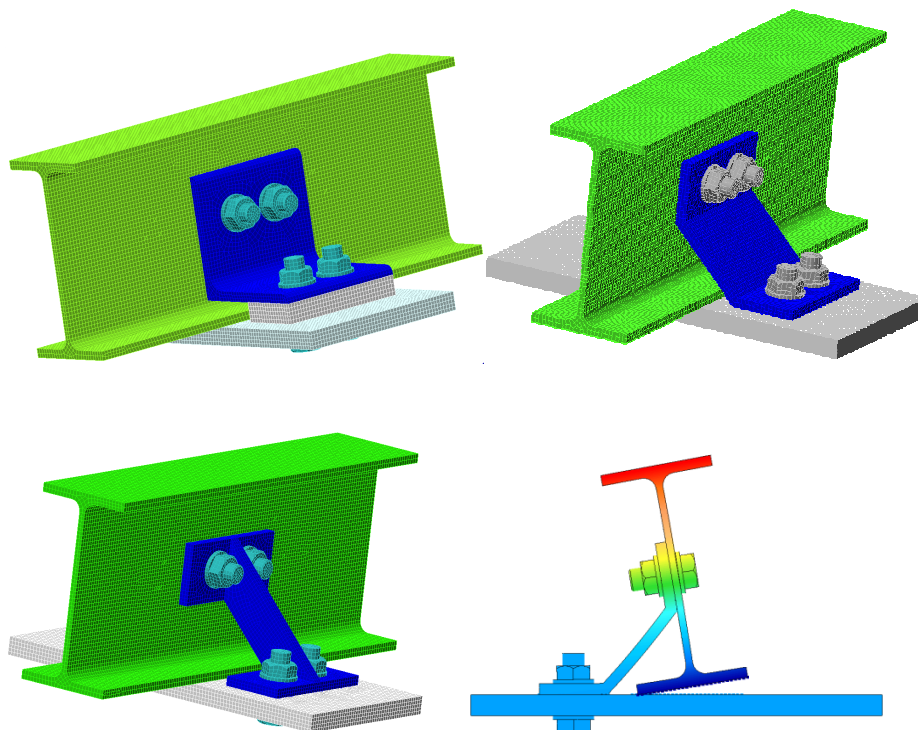
Wersja C: oś śrub poniżej środka ciężkości płatwi ($d = 55$ mm).

Widok przykładowych modeli przedstawia rys. 14.



Rys. 13. Sposoby przyłożenia obciążenia do modelu połączenia (typ P-2, wersja C).

Fig. 13. The ways of application of the load to the connection's model (type P-2, version C)



Rys. 14. Modele MES połączeń w wersji A oraz odkształcenie połączenia P-2.

Fig. 14. FEM models of connections in version A and displacement of P-2 connection.

Tabela 2. Wartości podatności połączeń otrzymane za pomocą MES ze wzorów (2) – (4)

Table 2. Values of connections' flexibility received by FEM from formulas (2) – (4)

połączenie	R_v [kN/m]	R_θ [kNm/rad]	$R_{v'}$ [kNm/rad]
P – 1 (A)	2410	8,3	32,5
P – 1 (B)	2353	7,5	33,6
P – 1 (C)	2000	7,0	33,8
P - 2 (A)	1493	6,2	25,4
P – 2 (B)	1527	5,4	26,0
P – 2 (C)	1198	5,6	22,9
P – 3 (A)	13333	37,7	3,9
P – 3 (B)	9524	86,5	3,3
P – 3 (C)	5882	26,1	4,01

Otrzymane wyniki pozwalają określić wpływ wysokości zamocowania płatwi na podatność połączenia. Łatwo zauważyć, że generalnie wraz ze wzrostem miejsca zamocowania sztywność połączenia rośnie.

3.4. Porównanie wyników badań doświadczalnych z metodą MES

Porównanie wyników przedstawiono w tabeli 3

Tabela 3. Porównanie wyników badań doświadczalnych z analizą MES

Table 3. Comparison of results from experimental studies and FEM analysis

Połączenie	Metoda analizy	Podatność		
		R_v [kN/m]	R_θ [kNm/rad]	$R_{v'}$ [kNm/rad]
P – 1 (A)	badania dośw.	1521	6,9	31,8
	analiza MES	2410	8,3	32,5
P – 2 (A)	badania dośw.	1032	4,9	26,3
	analiza MES	1493	6,2	25,4
P – 3 (A)	badania dośw.	12488	34,4	3,9
	analiza MES	13333	37,7	3,9

Powyższe wyniki pokazują, że analiza połączenia w programie Autodesk Simulation Multiphysics nieco zawyża wartości podatności połączeń w stosunku do badań doświadczalnych, przy czym największa różnica sięga 35%. Jednocześnie oba sposoby analizy wykazują zbliżone zależności pomiędzy poszczególnymi typami połączeń.

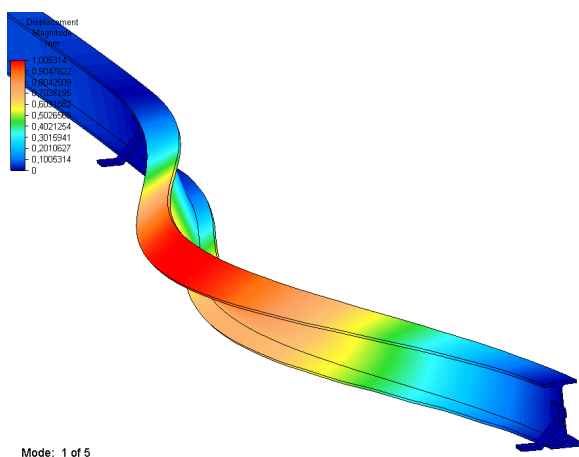
4. Moment krytyczny płatwi o realnych warunkach brzegowych podparcia

4.1. Analiza programem LTBeam

Moment krytyczny obliczono uwzględniając podatności połączeń (rys. 2) otrzymane z badań doświadczalnych oraz z analizy MES w programie Autodesk Simulation Multiphysics. W programie uwzględniono rzeczywisty rozkład momentów zginających oraz miejsca przyłożenia obciążeń grawitacyjnych.

4.2. Analiza programem Autodesk Simulation Multiphysics (Algor)

Moment krytyczny wyznaczono modelując zarówno całą płatek, jak również elementy połączenia za pomocą przestrzennych elementów skończonych i przeprowadzając analizę wyoboczeniową konstrukcji (rys. 15).



Rys. 15. Postać zwirzenia płatwi wraz z połączeniem P-1 otrzymana w programie Algor.

Fig. 15. Form of purlin's buckling of P-1 connection received from Algor.

4.3. Porównanie wyników

Wyniki momentu krytycznego dla 9-metrowej płatwi o przekroju IPE 160, obciążonej kombinacją grawitacyjną przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Obliczone wartości momentu krytycznego dla obciążeń grawitacyjnych (ciężar własny + śnieg)

Table 4. The calculated values of critical moment for gravity loads (dead load + snow)

M_{cr} [kNm]		Połączenie			widelkowe
		P-1	P-2	P-3	
LTBeam	badania doświadczalne	10,75	9,97	10,91	11,07
	A	10,81	10,60	10,95	
	B	11,31	10,43	11,31	
	C	10,30	10,26	10,75	
Algor	A	11,54	11,04	11,96	11,55
	B	12,91	11,42	12,30	
	C	10,89	10,64	11,24	
klasyczny wzór (1)		7,31			

Na podstawie powyższej tabeli można zauważyć, że różnice wartości momentu krytycznego M_{cr} pomiędzy rzeczywistymi warunkami podparcia, a teoretycznym podparciem widelkowym sięgają 10%. Jednocześnie obliczenia według wzoru (1) zaniżają wartość momentu krytycznego o 25 - 40%.

Zwiększenie wysokości zamocowania płatwi do elementu łączącego skutkuje wzrostem momentu krytycznego, dając sztywność połączenia większą niż podparcie widelkowe. Usytuowanie osi śrub poniżej środka ścinania płatwi nie pozwala traktować tego połączenia jako podparcie widelkowe.

Najsłabszym połączeniem okazuje się połączenie za pomocą giętej lub spawanej blachy (P-2), natomiast najmocniejszym połączenie z żeblem (P-3).

Analiza programem Autodesk Simulation Multiphysics daje o kilka procent wyższe wartości niż programem LTBeam, analogicznie jak to miało miejsce przy wyznaczaniu podatności.

5. Wnioski

Założenie podparcia widelkowego przy obliczaniu momentu krytycznego płatwi programami LTBeam i Algor daje podobne wyniki jak w przypadku rzeczywistych połączeń z dźwigarem. Istotna jest tutaj wysokość zamocowania płatwi do elementu łączącego – im bliżej pasa górnego się ono znajduje, tym większa odporność płatwi na zwichrzenie.

Obliczanie momentu krytycznego przy pomocy wzoru (1) daje mocno zaniżone wartości momentu krytycznego i powoduje znaczne zmniejszenie nośności obliczeniowej płatwi.

Połączeniem pozwalającym uzyskać najwyższe wartości M_{cr} jest połączenie z żeblem (P-3), które jednocześnie najbardziej odpowiada warunkom podparcia widelkowego, gdyż w przeciwieństwie do połączeń P-1 oraz P-2 wykazuje znacznie mniejszą sztywność na obrót belki wzdłuż osi podłużnej v^7 . Warto jednak zauważyć, że duża sztywność na tym kierunku pozwala znacząco zwiększyć odporność na zwichrzenie płatwi.

Najmniejszą wartość momentu krytycznego płatew wykazuje przy połączeniu poprzez giętą lub spawaną blachę (P-2).

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-3 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [2] PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [3] ENV 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures. General rules and rules for buildings, Annex F.
- [4] Timoshenko S. P. Teoria stateczności sprężystej. Arkady, Warszawa, 1963.
- [5] Trahair, NS (1993). Flexural-Torsional Buckling of Structures, E & FN SPON, London.
- [6] Rules for Member Stability in EN 1993-1-1. Background documentation and design guidelines. ECCS Technical Committee 8 - Stability. 2006.

- [7] Silva L.S., Simoes R., Gervasio H. Design of Steel Structures. ECCS Technical Committee. 2010.
- [8] Pałkowski Sz. Konstrukcje stalowe. PWN, Warszawa, 2010.
- [9] Żmuda J. Problemy niestateczności w projektowaniu dźwigarów stalowych. Politechnika Opolska, Opole, 2004.
- [10] Bijak R. Wyznaczanie momentu krytycznego zwichrzenia bisymetrycznych belek dwuteowych podpartych widełkowo. 56 konferencja naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica-Kielce, 2010.
- [11] LTBeam v.1.0.10. Centre Technique Industriel de la Construction Métallique 2011. www.cticm.com.
- [12] <http://www.autodesk.com/products/autodesk-simulation-family/features/simulation-mechanical>.
- [13] Goczek J., Gajdzicki M., Supel Ł.: Wyznaczanie sprężystego momentu krytycznego zwichrzenia belki bocznie stężonej jednostronnym poszyciem, Inżynieria i budownictwo, nr 10, 2012, s. 552-554.

FLEXIBILITY OF THE PURLIN SUPPORT VERSUS CRITICAL MOMENT

S u m m a r y

Analysis of the support flexibility of the three most frequently used in practice types of connections purlins with the girder and their influence on the critical moment of the purlins has been presented. The study focused on I-beam purlins with static scheme of continuous beam. Each connection was analyzed in three options, differing in height of purlin connector attachment to the girder. The results were compared with the theoretical assumption of the fork support which is used in design calculation. Connections flexibility was obtained in two ways: by experimental research and by analysis of connection model using finite element method. The values of critical moment were also determined in several ways. A basic formula derived from the theory of elasticity and programs LTBeam and Autodesk Simulation Multiphysics were used. These programs differed in advancement and the modeling process and also in the way of including the connections' flexibility in calculation of a critical moment. The analysis leads to the observation how the value of a critical moment is changing according to adopted type of connection. Studies show an increase in resistance to lateral-torsional buckling with increasing of height of purlin connector attachment to the girder. Simultaneously the differences in the values of a critical moment for various types of connections do not exceed 10%. Moreover the analysis shows that analytical formula significantly underestimated the actual value of a critical moment for multi-span purlins which may result in unnecessary oversizing of the construction.

Keywords: purlin, lateral torsional buckling, fork support, connections, finite element method

DOI: 10.7862/rb.2013.20

Przesłano do redakcji: w czerwcu 2013 r.

Przyjęto do druku: w lipcu 2013 r.