



Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew KOWAL
Mgr inż. Łukasz TKACZYK, lutka@tu.kielce.pl
Politechnika Świętokrzyska

USZKODZENIA DOCZOŁOWO - STYCZNYCH POŁĄCZEŃ DŹWIGARÓW Z FALISTYM ŚRODNIKIEM

A FAILURE ANALYSIS OF BOLTED CONNECTIONS FOR CORRUGATED WEB GIRDERS

Streszczenie W pracy przedstawiono przypadek uszkodzenia połączeń doczołowo-stycznych w ramach o ryglach z falistym środnikiem stanowiących zasadniczą konstrukcję nośną istniejącej hali o powierzchni około 14000m². Uszkodzenia wystąpiły po zimie i polegały na zerwaniu maksymalnie wyężonych śrub łączących blachy czołowe w strefie rozciąganej. Zerwaniu śrub towarzyszyło rozwarcie styków na około 6mm. Zwrócono uwagę na to, że nastąpiło zmniejszenie nośności granicznej systemu konstrukcyjnego wskutek zmniejszenia sztywności obrotowej połączeń doczołowo-stycznych, a do odtworzenia nośności granicznej systemu nie wystarczy wymiana śrub. Wskazano przyczyny uszkodzeń i przedstawiono wnioski dotyczące właściwego wzmocnienia i wykonywania połączeń tego typu.

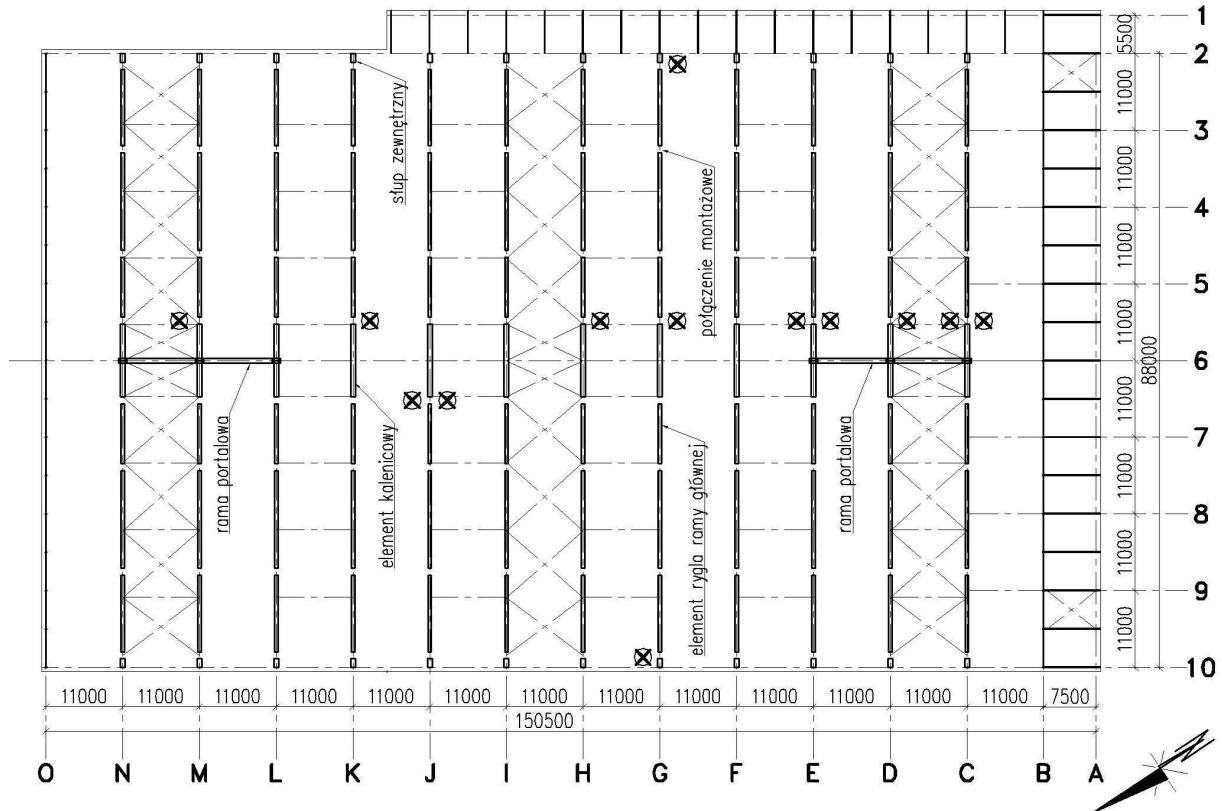
Abstract The analysis concerned the failure of field bolted connections of SIN profiles constituting the main load-bearing system of a commercial and institutional building with an area of 14,000 m². The rupture of bolts subjected to a maximum tensile stress caused that the spacing between the girders increased to 6 mm. A decrease in the boundary load bearing capacity of the structure was attributable to a decrease in the rotational stiffness of the field bolted joints. The replacement of bolts was not sufficient to restore the system load bearing capacity. By studying the causes of this failure, it was possible to draw conclusions concerning the corrugated web girders. The final suggestions included placing the reinforcement and improving the connection system.

1. Przedmiot badań

Przedmiotem pracy są uszkodzenia doczołowo-stycznych połączeń stalowych dźwigarów z falistym środnikiem. Takie połączenia zastosowano w ryglach ramy zasadniczej konstrukcji nośnej hali o rzucie pokazanym na rys.1. Na rys. 1 oznaczono miejsca uszkodzeń połączeń. Uszkodzenia połączeń polegały na zerwaniu najbardziej wyężonych śrub oraz rozwarciu styków montażowych, które wystąpiły w 8 na 12 ram.

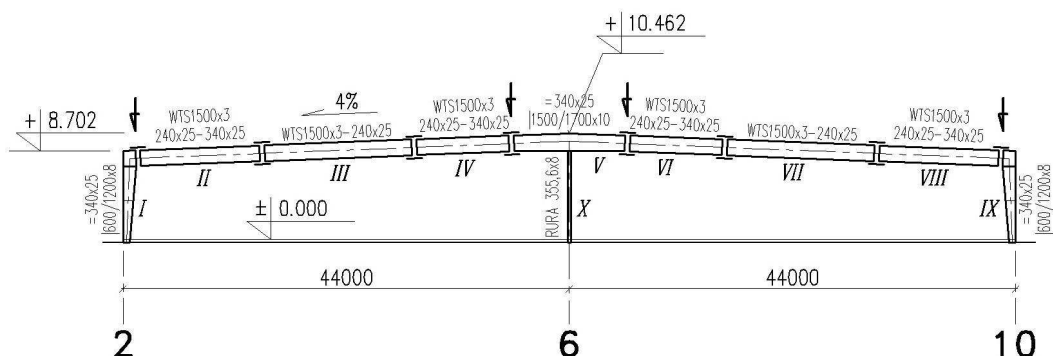
Podstawowym układem nośnym hali są dwunawowe, jednokondygnacyjne ramy stalowe, pokazana na rys. 2, o rozpiętości nawy 44.0m, rozmieszczone co 11.0m. Zewnętrzne słupy spawane o przekroju dwuteowym i zmiennej wysokości środnika przegubowo połączono z fundamentami. Wahaczowe słupy środkowe wykonano z rur. Rygle ramy o dwuteowym przekroju z falistym środnikiem grubości 3mm. Część kalenicowa rygla ma przekrój dwuteowy spawany z płaskim środnikiem grubości 10mm.

Elementy montażowe rygli ramy głównej łączono za pomocą doczołowo-stycznych połączeń [3], [9]. Połączenie pomiędzy elementem kalenicowym a elementem rygla ramy przedstawiono na rys. 6. Natomiast na rys. 7 pokazano połączenia montażowe rygla ze słupami skrajnymi. Połączenia montażowe pomiędzy poszczególnymi elementami zostały formalnie wykonane według wytycznych producenta [11].



Rys. 1. Schemat hali, wraz z oznaczeniem miejsc uszkodzeń.

Na rys. 2 pokazano schemat montażowy dwunawowej ramy, stanowiącej zasadniczy układ nośny hali. Dwuteowe słupy zewnętrzne o zmiennej wysokości średnicy, oznaczone na rys. 2 nr I, IX, wykonano ze stali 18G2, pasy o przekroju 340x25mm, środnik o przekroju od 600x6mm do 1200x8mm.



Rys. 2. Powtarzalna dwunawowa rama.

Pas górny i dolny rygli ram z profilu SIN ze stali 18G2 spawano z falistym środnikiem ze stali St3S. Elementy montażowe oznaczone na rys. 2 nr II, IV, VI i VIII mają pas górny o przekroju 240x25mm, pas dolny o przekroju 340x25mm i falisty środnik 1500x3mm.

Natomiast elementy montażowe oznaczone na rys. 2. nr *III* i *VII* mają pas dolny i górny o przekroju 240x25 i falisty średnik 1500x3mm.

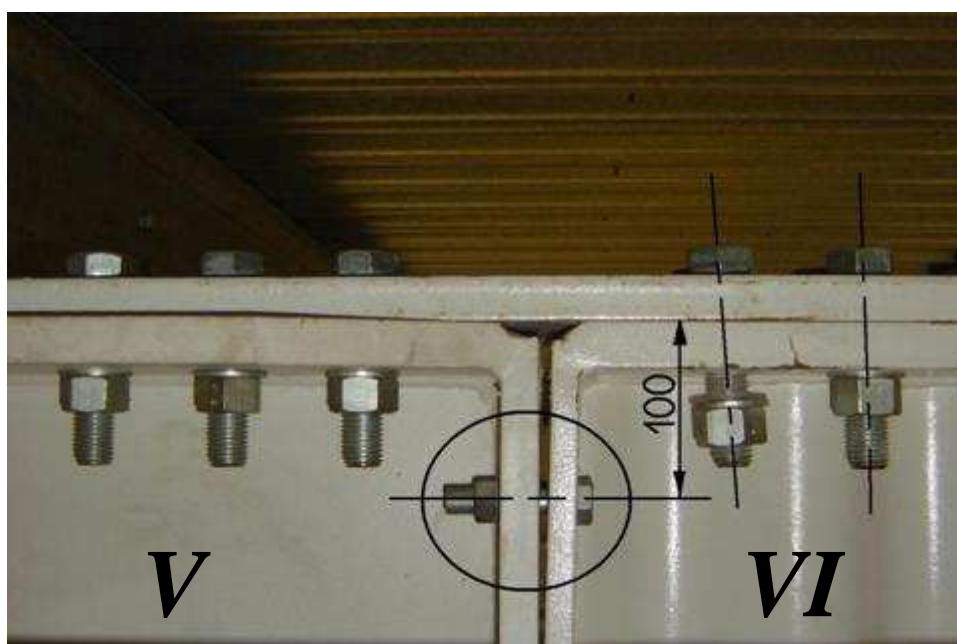
Element montażowy *V* rygla ramy (rys. 2) to blachownica o zmiennej wysokości wykonana ze stali 18G2, pas dolny i górny o przekroju 340x25mm i średniku o zmiennej wysokości od 1500x10 do 1700x10.

2. Opis uszkodzeń

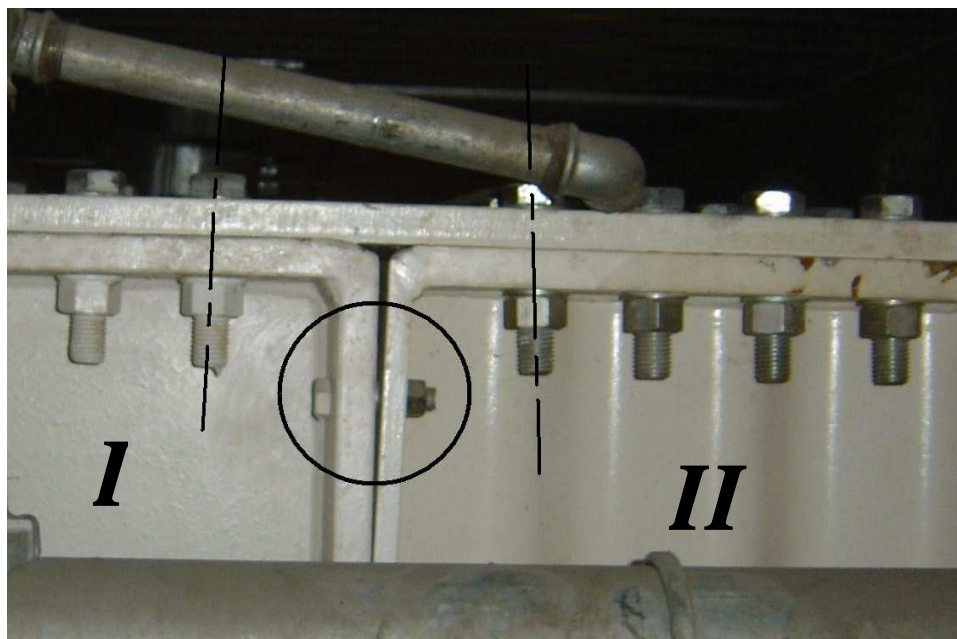
Po okresie zimowym dokonano przeglądu technicznego obiektu. Maksymalna grubość śniegu jaka zalegała w poprzedzającym sezonie zimowym na dachu hali wynosiła ok. 50cm. Zauważono uszkodzenia poszczególnych styków w postaci zerwanych śrub w stykach montażowych poszczególnych ram głównych hali w miejscach pokazanych na rys. 1, oznaczonych kółkiem z krzyżykiem. Umieszczony symbol ☒ na rys. 1 oznacza stronę po której nastąpiło zerwanie śruby.

Miejsca uszkodzeń połączeń na rys. 2 oznaczono strzałką. Uszkodzeniu ulegały styki montażowe odpowiednio pomiędzy skrajnym słupem a rygłem (styk pomiędzy elementem nr *I* a *II*, i między elementem *VIII* a *IX*), Najwięcej śrub pękało w stykach pomiędzy elementem nr *IV* a *V*, i *V* a *VI*)

Łącznie wystąpiło zerwanie 13 śrub. Śruby pękały wyłącznie w miejscach, w których występuje ujemny moment zginający i rozciągany jest pas górny rygla. Zerwaniu ulegały zawsze śruby w części czołowej styku w najwyższym rzędzie (rys. 3 i 4), tj. najbliższe rozciąganego pasa górnego, oznaczone nr 1 na rys. 6 oraz nr 8 na rys. 7. Odległość osi zerwanych śrub od górnej nakładki pasa rozciąganego wynosi ok. 100mm. W części czołowej styku zastosowano śruby M16 kl. 5.8. W części stycznej połączenia zastosowano śruby M24 kl. 10.9 łączące nakładkę ze stali 18G2 z pasami elementów montażowych rygla ramy. Zastosowano śruby klasy 10.9 stosowane zazwyczaj w sprężanych połączeniach ciernych oraz w doczołowych połączeniach doprężanych na montażu. Rozwarcia styków w połączeniach widoczne na rys. 3 i 4 świadczą o tym, że nie wykonano ciernych połączeń z nakładkami ciągłości. Połączenie wykonano zgrubnie i doszło do poślizgu pomiędzy nakładkami a pasami górnymi elementów montażowych rygla ramy (rys. 3 i 4).



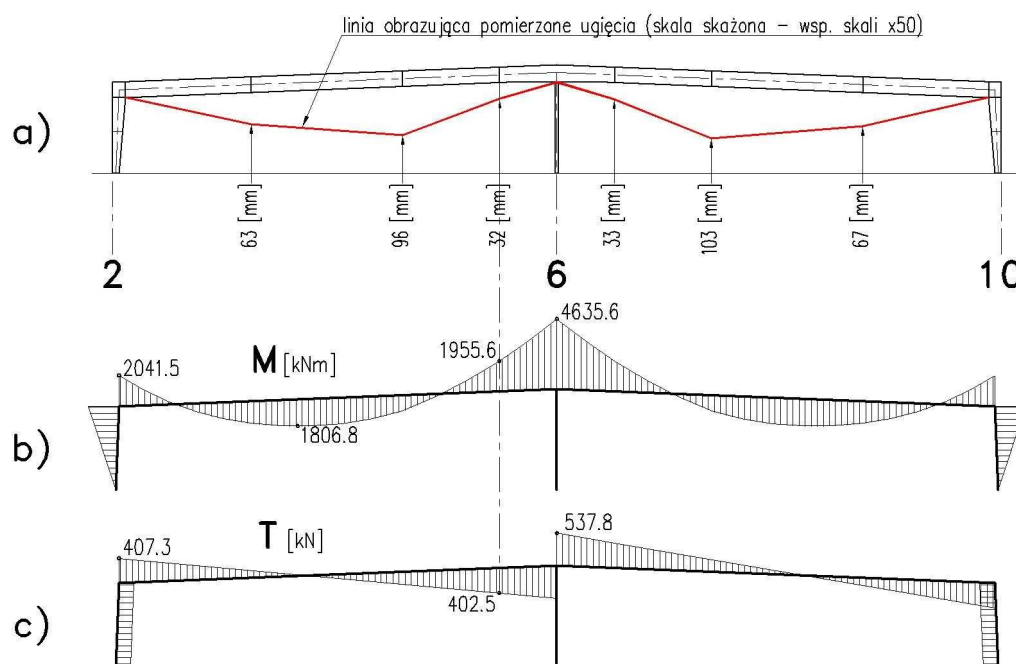
Rys. 3. Rozwiązanie styku pomiędzy elementami montażowymi *V* i *VI*



Rys. 4. Widok styku skrajnego pomiędzy słupem a ryglem ramy z falistym środkiem. Rozwarcie 10mm

Doczołową część połączenia skonstruowano bez uwzględnienia rzeczywistych warunków pracy połączenia. Nieuwzględnienie występujących tolerancji wykonania [10] doprowadziło do przeciążenia śrub skrajnego rzędu, a dalej do ich zrywania.

Wyzwolone obroty połączeń montażowych wywołały zmianę sił przekrojowych i przemieszczeń rygli ram. W związku z powyższym pomierzono przemieszczenia geometryczne pasów dolnych. Odchyłki (ugięcia), rygla ramy zlokalizowanej w osi J, pokazano na rys. 5a.



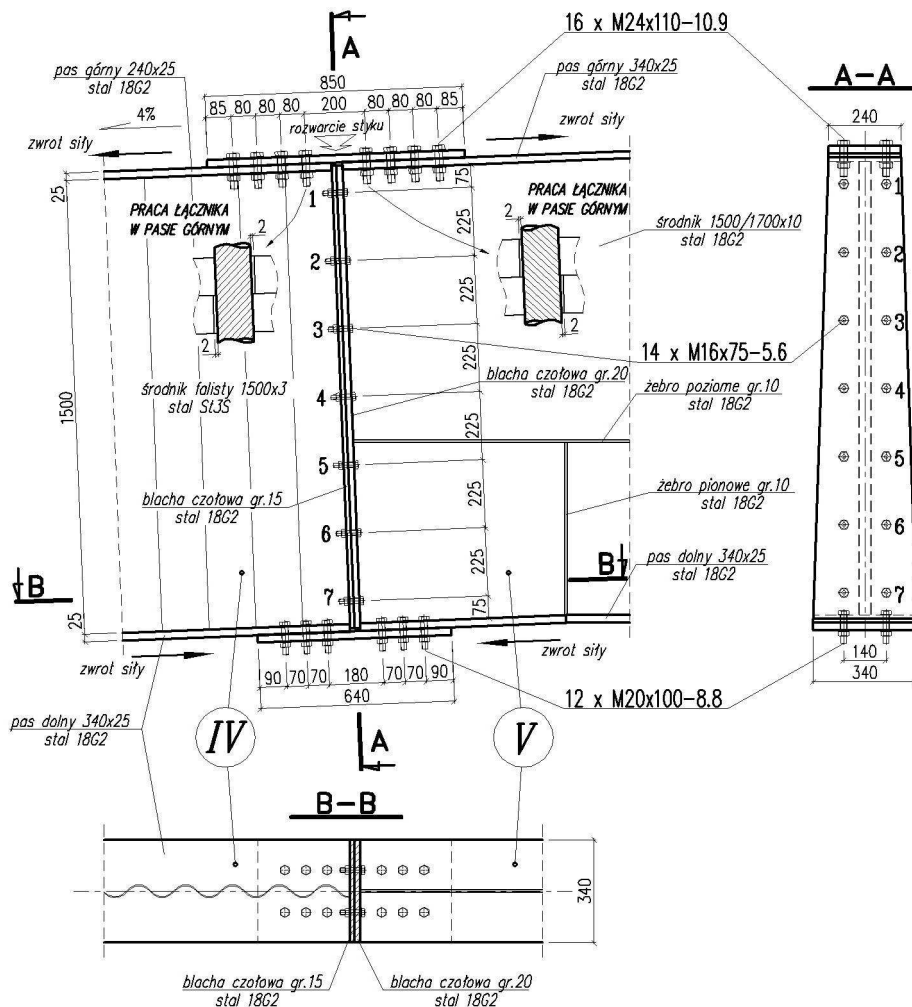
Rys. 5. Pomiar sprawdzający ugięcie

Pomiar ugięć prowadzony był w okresie letnim (w sierpniu) przy bezwietrznej pogodzie, jedynymi obciążeniami działającymi na konstrukcje były obciążenia stałe i eksploatacyjne, a zerwane śruby były już wymienione.

3. Analiza przyczyny uszkodzeń

W omawianym przypadku, w doczołowo-stycznych połączeniach dźwigarów SIN rozciągnięto ideę wymiarowania przekroju dźwigarów [2], [5], na połączenia doczołowo styczne. Jak wiadomo idea ta pozwala na wymiarowanie przekroju pasów na siły $S=M/h$ wynikające z obciążenia dźwigara momentem zginającym, gdyż falisty środnik w zasadzie nie przenosi naprężeń normalnych. Natomiast środnik wymiaruje się na obciążenia poprzeczne Q . **Idea ta przeniesiona z wymiarowania dźwigarów SIN do wymiarowania połączeń doczołowo-stycznych może być realizowana pod warunkiem dotrzymania zgodności odkształceń doczołowej i stycznej części połączenia.** Połączenia doczołowo-styczne na śruby nie są w pełni sztywne i w związku z tym ustroje statycznie niewyznaczalne wymagają uwzględnienia sztywności obrotowej połączeń w obliczeniach statycznych, gdyż sztywność obrotowa połączeń wpływa na rozkład sił przekrojowych w ustroju i w połączeniach.

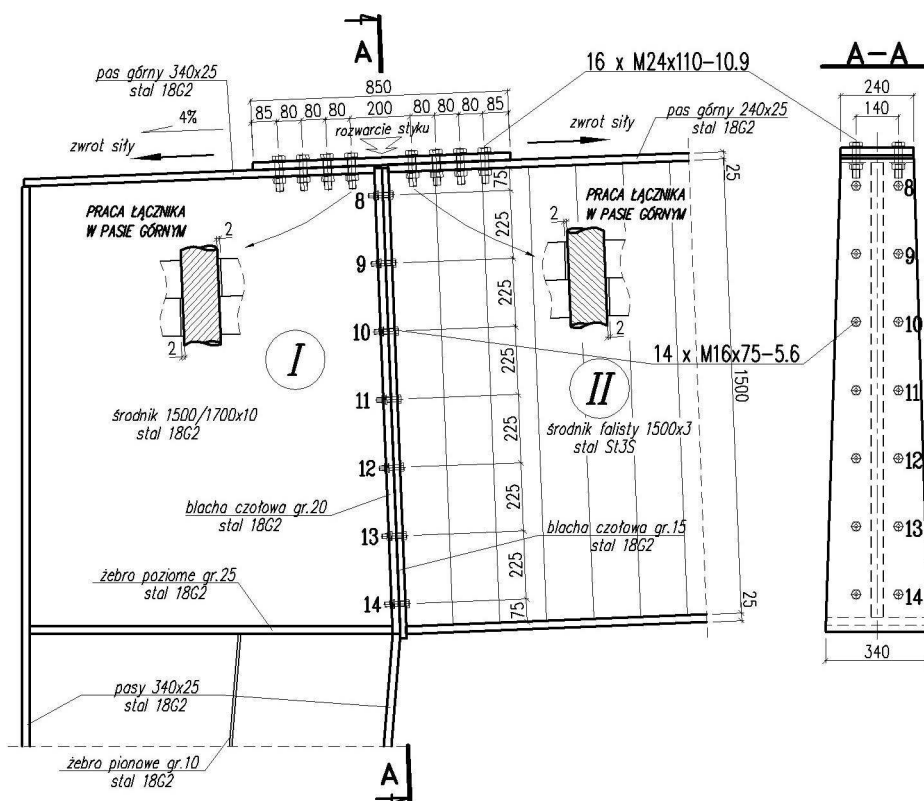
Poniżej pokazano czołowo-styczne połączenie pomiędzy montażowym elementem kalenicowym V a elementem montażowym IV rygła ramy (rys. 6).



Rys. 6. Połączenie doczołowo-styczne między elementami IV i V

Na rys. 3 i 4 widoczne jest znaczne rozwarście (6mm) blach czołowych połączenia jak również przekoszenie śrub w górnym pasie po stronie rygła ramy z falistym średnikiem. W czasie oględzin zerwana śruba nr 1 była już wymieniona (rys. 3 i 4).

Analogiczne rozwiązanie styku miało miejsce przy słupach zewnętrznych między elementami I i II oraz VIII i IX (rys. 1). Poniżej przedstawiono konstrukcję połączenia pomiędzy skrajnym słupem I a elementem II rygła ramy (rys. 7).



Rys. 7. Połączenie doczołowo-styczne pomiędzy słupem skrajnym I a rygłem ramy II

W wyniku obciążenia połączy dachowej znacznymi opadami śniegu wystąpiły w konstrukcji znaczne siły przekrojowe zbliżone do nośności obliczeniowej konstrukcji. W zgrubnie wykonanych połączeniach w pierwszej kolejności wystąpiło obciążenie rozciąganiem śrub nr 1 (rys. 6) oraz nr 8 (rys. 7) M16 klasy 5.6, łączących blachy czołowe. Obciążenie ścinanych śrub M24 klasy 10.9 łączących nakładki ciągłości z pasami rozciągany nastąpiło z opóźnieniem wskutek luzów pomiędzy średnicą śrub a średnicą otworów w łączonych nakładkach z pasami, gdyż styczna część połączenia została wykonana w technologii zgrubnej. W rezultacie zostały zerwane śruby nr 1 i 8 w doczołowej części połączenia i rozwarście styków. Rozwieranie styków zostało zahamowane włączeniem się ścinanych śrub M24 klasy 10.9, po skasowaniu luzów pomiędzy trzpieniami i otworami na śruby.

Do zerwania śrub 1 i 8 (rys. 6 i 7) by nie doszło, gdyby połączenie nakładek z pasami zostało sprężone zgodnie z klasą zastosowanych śrub. W rachubę wchodziłyby też połączenia na śruby pasowane do otworów rozwieranych na montażu.

Stan faktyczny poszczególnych połączeń montażowych wskazuje, że połączenia pasów za pomocą jednostronnych nakładek wykonano jako zgrubne. Norma [12] dopuszcza wykonywanie otworów na śruby w połączeniach tego typu z tolerancją +2mm. Oznacza to, że włączenie się śrub ścinanych wystąpiło po skasowaniu luzów w styku.

Nośność połączenia blach czołowych na siły poprzeczne, z wykorzystaniem śrub M16 kl. 5.6, wynosiła około $\sim 633kN$. Siła poprzeczna w miejscu połączenia (rys. 5c) wynosi $Q \cong 402,5kN$.

Nie uwzględniono możliwości rozciągania śrub w części czołowej połączenia wywołanego poślizgiem części styecznej połączenia. Śruby zostały dodatkowo obciążone rozciąganiem wywołanym momentem zginającym skutkującym zerwaniem łączników.

Z powyższej analizy wynika, że w przypadku prawidłowego skonstruowania części styecznej połączenia nie doszłoby do uszkodzenia połączeń.

Podczas przeglądu konstrukcji wszystkie doczołowo – styeczne połączenia montażowe, pomiędzy poszczególnymi elementami ram głównych były rozwarne, mimo wymiany zerwanych śrub. Rozwarcia te wystąpiły w strefach rozciąganych praktycznie wszystkich połączeń montażowych. Największe rozwarcia wystąpiły w miejscach zerwania śrub. Rozwarcia połączeń pokazanych na rys. 3 i 4 wynosiły od 6 do 10 mm.

4. Wnioski

Sposób wykonania doczołowo-styecznych połączeń nie spełniał oczekiwanej sztywności obrotowej we wszystkich połączeniach montażowych rygli ram.

W opisanym przypadku formalnie zrealizowane połączenia doczołowo-styeczne według norm nie spełniają następujących warunków:

- 1) W obliczeniach statycznych ram oraz połączeń nie wzięto pod uwagę wpływu sztywności obrotowej zastosowanych połączeń na nośność krytyczną i nośność graniczną ram.
- 2) Połączenia montażowe w prezentowanym ustroju powinny być *quasi* sztywne.
- 3) Odkształcenia i przemieszczenia śrub ścinanych, łączących nakładki z pasami, powinny być stowarzyszone z odkształceniami i przemieszczeniami śrub łączących blachy czołowe, to znaczy spełniać warunek jednoczesnej nierozdzielności odkształceń.

Jednoczesną zgodność odkształceń i przemieszczeń śrub w *quasi* sztywnych połączeniach czołowo styecznych można osiągnąć stosując w styecznej części połączenia sprężone śruby, przekazujące siły styeczne za pośrednictwem tarcia. Natomiast w połączeniu blach czołowych należy stosować również śruby doprężane. Wskazane jest stosowanie śrub nr 1 oraz 8 klasy 10.9 (w strefie rozciąganej połączenia) jak w części styecznej połączenia.

W przedstawionym ustroju o węzłach przesuwnych, należy stosować w przekrojach krytycznych połączenia *quasi* sztywne, gdyż zmniejszona sztywność obrotowa połączeń zmniejsza nośność krytyczną i nośność graniczną całego systemu [5], [8].

Wniosek generalny: Należy wykonać naprawę i wzmocnienie wszystkich doczołowo-styecznych połączeń w sposób spełniający warunki połączeń montażowych *quasi* sztywnych w celu przywrócenia oczekiwanej nośności granicznej ram.

Literatura

1. Basiński W.: Wyznaczenie sztywności obrotowej doczołowych połączeń podatnych w metalowych konstrukcjach prętowych na podstawie pomiaru drgań, Praca doktorska, Gliwice 2006;
2. Basiński W., Kowal Z.: Model sztywności obrotowej doczołowych połączeń odkształcalnych dźwigarów o falistym środniku, LII Konferencja Naukowa Gdańsk – Krynica 2006, s. 99-106;
3. Biegus A.: Połączenia śrubowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1997;
4. Kowal Z.: Dźwigary o cienkościennym środniku pracującym w stanie pozakrytycznym, Inżynieria i Budownictwo 10/1962 s. 377-382;
5. Kowal Z.: Nośność krytyczna ram szkieletowych o węzłach odkształcalnych, Międzynarodowa konferencja Węzły podatne w konstrukcjach metalowych i zespolonych, Warszawa 2000, s. 173-182;
6. Kowal Z.: Nośność graniczna słupów o falistym środniku, XLVII Konferencja Naukowa, Krynica 2001, s. 211-218;
7. Kowal Z.: Zwichrzenie dźwigarów o falistym środniku pod obciążeniem montażowym, Sympozjum Kształtowanie konstrukcji, konstrukcje ciągnowe, konstrukcje z blach fałdowych, Rzeszów 2005, s.177-186;
8. Kowal Z.: Niezawodność belek o połączeniach odkształcalnych. Konstrukcje stalowe 2003, nr 5, s. 48-49;
9. Łaguna J., Łypacewicz K.: Połączenia śrubowe i nitowe, Arkady, Warszawa 1986;
10. Urbańska-Galewska E.: Tolerancje w budowlanych konstrukcjach stalowych łączonych na śruby, Monografie 59, Politechnika Gdańska 2005;
11. Wytyczne: Profile z falistym środnikiem SIN. Dokumentacja techniczna GZP.
12. Polska Norma PN-90/B-03200, Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie;