



WITOLD BASIŃSKI, *witold.basinski@polsl.pl*
Politechnika Śląska

WPLYW BŁĘDÓW PROJEKTOWYCH I WYKONAWCZYCH NA STAN WYTEŻENIA PRZEKRYCIA ŁUKOWEGO

THE INFLUENCE OF ERRORS PROJECT – AND EXECUTIVE ON THE STATE OF THE STRAIN OF THE ARCHED ROOF

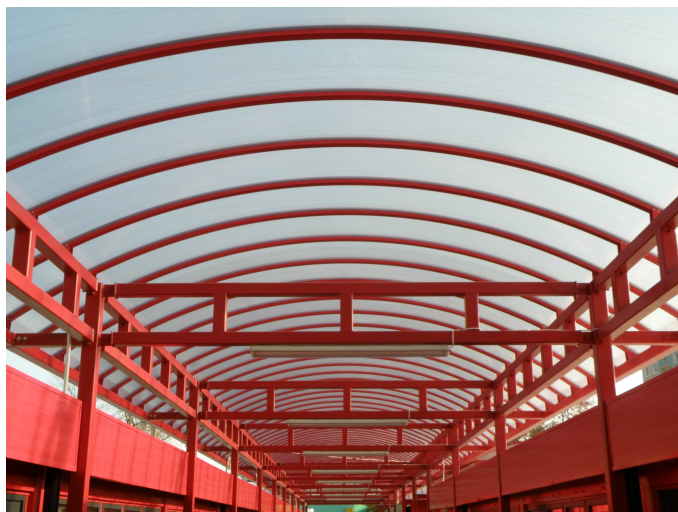
Streszczenie W referacie przedstawiono analizę zmiany stanu wyteżenia konstrukcji przekrycia łukowego pokrytego poliwęglanem wybudowanego jako zadaszenie targowiska w jednym z miast województwa śląskiego. Przeanalizowano wyteżenie konstrukcji łuków po zmianie schematu statycznego (na etapie projektu wykonawczego) oraz zamianie materiału łuków ze stali na aluminium. Analiza dotyczyła łuków pojedynczych oraz grupy pięciu łuków. Ustalono możliwe skutki i wpływ zmiany schematu na poszczególne elementy zadaszenia a w szczególności konstrukcję łuków, belek podpierających Vierendella oraz ich połączeń ze słupami.

Abstract In the paper was introduced the analysis of the change of the state of the strain of the construction of the arched roof covered with the polycarbonate of built on the market in one of cities of Silesian voivodship. The strain was analysed of the construction of arcs after the change of the static (on the stage of the executive project) scheme and to the exchange of material of arcs steel on aluminium. The analysis concerned single arcs and groups of three arcs. Possible results was fixed and the influence of the change of the scheme on individual elements of the roof and particularly the construction arcs, beams supporting Vierendell and their connections with columns.

1. Wprowadzenie

Charakterystyczną cechą przekryć łukowych jest ich niewielki ciężar w stosunku do przenoszonych przez nie obciążeń. Elementem wyróżniającym konstrukcje łuków dwuprzegubowych jest występowanie sił rozporu w przypadku braku stosowania ściągów oraz znaczący wpływ temperatury występujący przy zastosowaniu dodatkowych podpór nieprzesuwnych dla podparcia pojedynczego łuku dwuprzegubowego. Ponadto występujące w elementach łukowych specyficzne trójkątne obciążenie śniegiem [1] powoduje powstawanie znaczących momentów zginających często pomijanych przy obliczaniu konstrukcji łuków [2]. Przytoczone obciążenie trójkątne oraz prostokątne powodują również odmienny kształt wybożenia łuków. Błędy projektowe związane z nieznaną pracą statyczną łuków mogą prowadzić do awarii w momencie wystąpienia pełnej normowej kombinacji obciążeń.

W artykule opisano konstrukcję przekrycia łukowego zadaszenia targowiska w jednym z miast województwa śląskiego. Przeanalizowano stan wyteżenia konstrukcji łuków pojedynczych oraz grupy pięciu łuków związany ze zmianą schematu statycznego (na etapie wykonania rysunków warsztatowych – rys. 1) oraz zamianą materiału łuków ze stali na aluminium. Przeprowadzona analiza wykazała możliwość wystąpienia awarii poszczególnych elementów nośnych zadaszenia w okresie zimowym na skutek błędnej zmiany schematu statycznego z układu dwuprzegubowego na czteroprzegubowy powielonej na etapie wykonawczym.



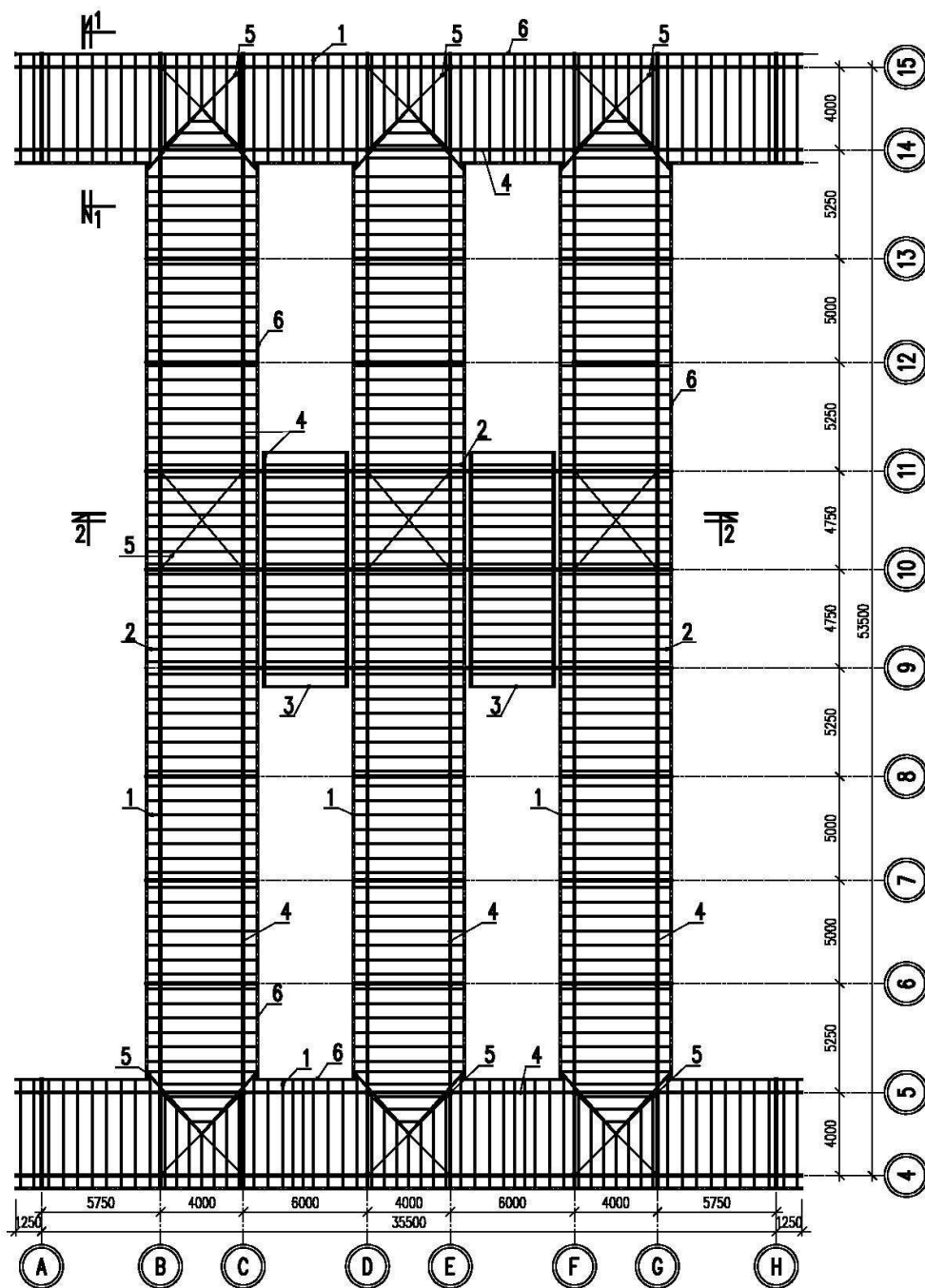
Rys. 1. Widok na konstrukcję przekrycia łukowego – łuk pojedynczy

2. Opis konstrukcji obiektu

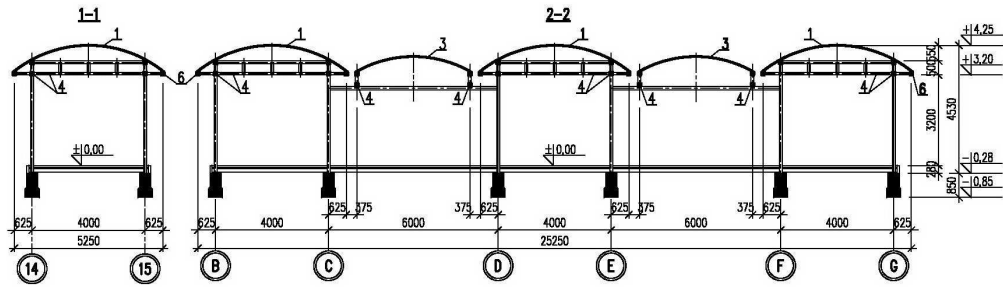
Konstrukcję nośną zadaszenia targowiska o wymiarach w rzucie $35,5 \times 53,5$ m wzniesiono w połowie 2008 roku. Tworzy ją pięć naw podłużnych rozłożonych pomiędzy osiami B i G oraz zamykające nawy poręczne zaprojektowane w osiach 4 i 5 oraz 14 i 15 (rys. 2). Układ konstrukcyjny stanowią ramy parterowe o sztywno zamocowanych słupach w fundamencie w obu kierunkach i przegubowo opartych na nich ryglach wykonanych jako belki Vierendella (4) (rys. 3). Układy poprzeczne połączono wzajemnie ryglami podłużnymi. W nawach podłużnych do słupów ram głównych w osiach C i D oraz E i F dołączono rygle poprzeczne w celu oparcia na nich dodatkowych rygli podłużnych (4). Słupy wykonano z rur kwadratowych Rk $120 \times 120 \times 5$. Pasy i słupki belek Vierendeela również zaprojektowano z rur kwadratowych Rk $100 \times 100 \times 4$ oraz powiązano ze słupami za pomocą zakładkowych połączeń śrubowych na pojedyncze śruby. Geometryczną niezmienną układu zapewniono stosując stężenia prętowe (5).

Jako przekrycie zastosowano elementy łukowe. Wyróżniono dwa układy konstrukcyjne: 1) łuk pojedynczy (przekrój 1-1 rys. 3) oraz 2) układ pięciu łuków (przekrój 2-2 rys. 3). Zaprojektowane łuki pojedyncze miały schemat statyczny łuków trójprzęsłowych z czterema podporami przegubowo nieprzesuwnymi. Rozpiętość przęsła środkowego wynosiła 4 m a przęsła skrajnych 0,675 m. przy wysokości łuku oraz promieniu gięcia odpowiednio 0,9 m i 4,421 m. Układ ten zastosowano w rozstawie 0,7 m pomiędzy osiami 5 i 9, 11 i 14 oraz A i H. Drugi układ konstrukcyjny wykonano jako szereg pięciu łuków pojedynczych ułożonych naprzemiennie. Pierwszy, trzeci i piąty łuk w szeregu zaprojektowano jako odpowiednik łuku pojedynczego z układu I. Drugi i czwarty stanowiły łuki dwuprzegubowe o rozpiętości 4 m oraz wysokości 0,569 m i promieniu gięcia 3,80 m. Układ ten zastosowano w rozstawie 0,6 m pomiędzy osiami 9 i 11. Pokrycie rygli łukowych wykonano z poliwęglanu grubości 16 mm.

Konstrukcję wsporczą łuków pojedynczych czteroprzegubowych stanowią belki krawędziowe (6) (podpory skrajne – rura kwadratowa Rk $100 \times 100 \times 5$) oraz podciąg w postaci belek Vierendeela (podpory środkowe). Łuki dwuprzegubowe z drugiego układu konstrukcyjnego oparto również na belkach Vierendeela.



Rys. 2. Rzut konstrukcji zadaszania łukowego



Rys. 3. Przekroje 1-1 i 2-2

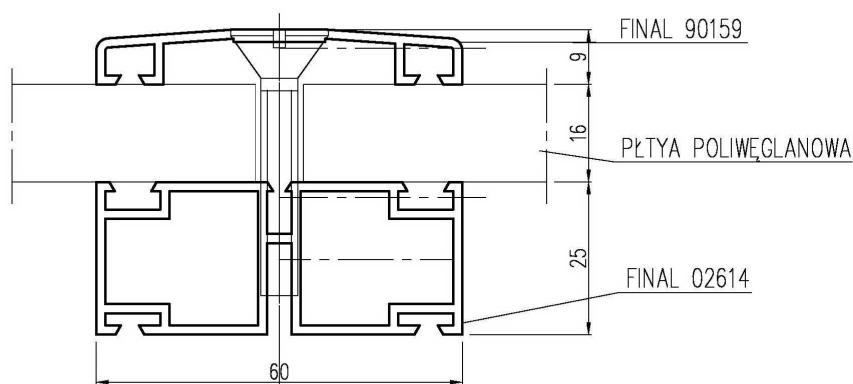


Rys. 4. Widok z góry przekrycia łukowego

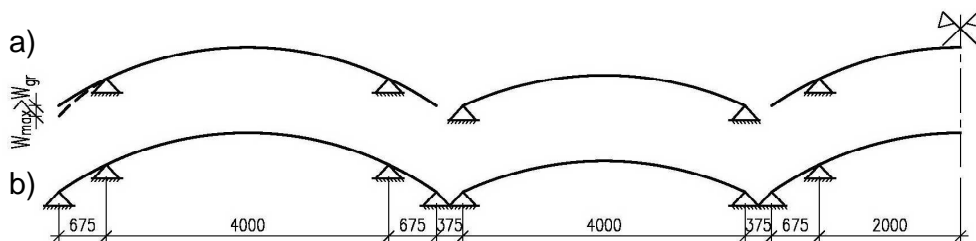
3. Błędy projektowe i wykonawcze konstrukcji przekrycia

Wszystkie łuki stanowiące elementy nośne przekrycia ((1) i (3) rys. 3) zaprojektowano jako przekroje stalowe z rur prostokątnych Rk 60×40×3.2 ze stali R35. W trakcie wznoszenia obiektu wykonawca przekrycia nie informując projektantów konstrukcji zamienił kształtowniki stalowe na używane przez siebie przekroje aluminiowe złożone z profili FINAL 02614 i FINAL 90159 (rys. 5). Wykonawca wykonał zamianę w oparciu o posiadaną przez siebie aprobatę techniczną umożliwiającą stosowanie przy tego typu rozpiętościach i promieniach gięcia ww. profili aluminiowych. Jako schemat statyczny przyjęto łuki cztero oraz dwuprzegubowe. Po wykonaniu konstrukcji łuków projektanci zarzucili wykonawcy, iż przyjęte przez niego przekroje aluminiowe nie spełniają warunków SGU ($w_{max} > w_{gr}$) przy założonym w obliczeniach schemacie statycznym (rys. 6a). Jednocześnie zażądano ich wymiany na pierwotnie założone kształtowniki stalowe. Analiza projektu wykazała jednak, że biuro projektowe na etapie wykonywania rysunków wykonawczych zmieniło schemat podparcia łuków z dwuprzegubowego ze wspornikami (rys. 6a) na czteroprzegubowy (rys. 6b). Sposób mocowania belki krawędziowej (6) do konstrukcji słupów oraz jej przekrój poprzeczny ewidentnie wskazywały na wykorzystanie jej jako podpory (rys. 7a i 7b), a nie

jak sugerowali pierwotnie projektanci jako elementu podwieszonego do łuków. Wprowadzona omyłkowo zmiana skutkowała zupełnie innym rozkładem sił wewnętrznych w łukach niż zakładano i mogła mieć katastrofalne skutki na pozostałą część konstrukcji wsporczej (p. 4).

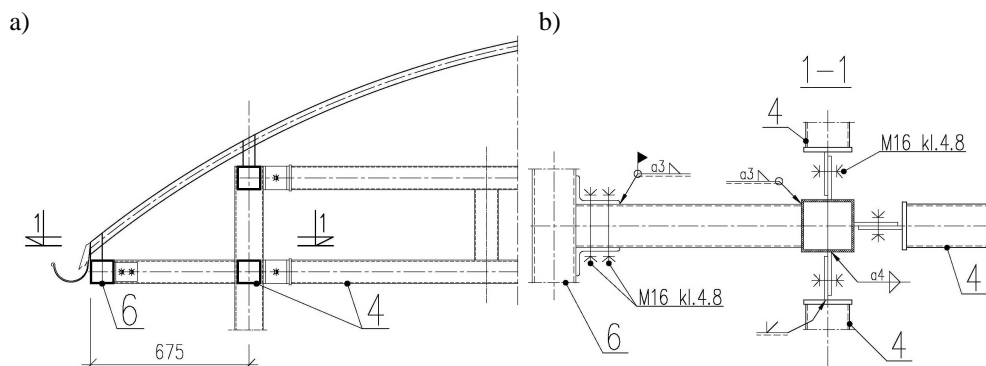


Rys. 5. Przekrój aluminiowy złożony z profili FINAL 02614 i FINAL 90159



Rys. 6. a) Schemat statyczny założony pierwotnie do obliczeń b) schemat zmieniony na etapie rysunków wykonawczych – zastosowany przez wykonawcę przekrycia

Ponadto połączenia belek Vierandeela ze słupami wykonstruowano jedynie poprzez blachy pionowe połączone ze słupem na spoiny pachwinowe (rys. 7b) oraz śruby M16 kl. 4.8.



Rys. 7. Połączenie belki krawędziowej (6) oraz belek Vierendeela (4) z konstrukcją wsporczą

4. Analiza stanu wyężenia przekrycia łukowego

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wykonano dla dwóch założonych układów konstrukcyjnych: łuku pojedynczego oraz grupy pięciu łuków. Założono istniejący schemat statyczny łuków (rys. 6 b) oraz przyjęto do obliczeń ich aluminiowy przekrój. W celu porównania wyężenia przeanalizowano również łuki o przekroju stalowym. W przeprowadzonej analizie założono obciążenie ciężarem pokrycia, śniegiem (II strefa obciążenia) oraz spadkiem temperatury. Różnica pomiędzy łukami czteroprzegubowymi z układu I i II wynikała z występowania w układzie II worka śnieżnego.

Obliczeniową nośność łuków składających się z przekrojów aluminiowych określono na podstawie warunku (1) [2]:

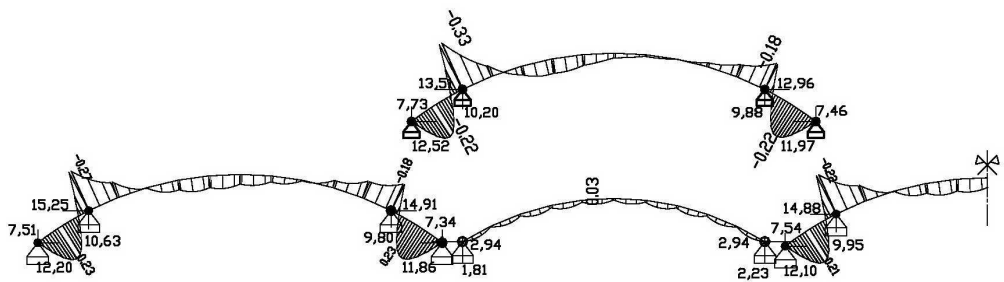
$$\frac{N}{\phi \cdot N_{Rc}} + \frac{M_{\max}}{\phi_L \cdot M_{Rx}} < 1, \quad (1)$$

gdy moment maksymalny w środku rozpiętości nie przekraczał 0,5 momentu maksymalnego w przęcie oraz (2) [2]

$$\frac{N}{\phi \cdot N_{Rc}} + \frac{M_{\max}}{\left(1 - \frac{N}{A \cdot \sigma_E}\right) \cdot \phi_L \cdot M_{Rx}} < 1, \quad (2)$$

gdy moment maksymalny w środku rozpiętości przekraczał 0,9 momentu maksymalnego w przęcie, gdzie σ_E oznacza naprężenia zastępcze. Uwzględniono dwie kombinacje obciążenia śniegiem: obciążenie równomierne oraz obciążenie trójkątne wg [5]. Długości wybocheniowe łuków wyznaczono z Normy [7].

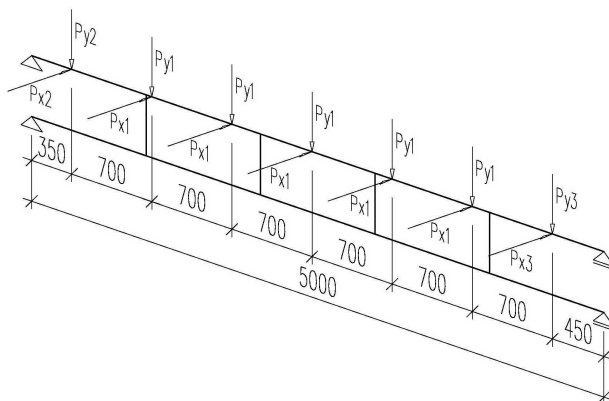
W wyniku obliczeń stwierdzono, że zastosowane przez wykonawcę zadaszienia profile aluminiowe spełniają wymogi SGN. Wyężenie łuku czteroprzegubowego w układzie I wynosiło 51% na odcinku środkowym oraz 77% na odcinku skrajnym. W układzie II wyężenie łuku czteroprzegubowego wynosiło 61% na odcinku środkowym oraz 67% na odcinku skrajnym. Wyężenie łuk środkowego nie przekraczało 45%.



Rys. 8. Reakcje oraz momenty zginające w I (obciążenie trójkątne śniegiem) i II (obciążenie trójkątne śniegiem + worka śnieżny) układzie konstrukcyjnym dla schematu z nieprzesuwnymi podporami

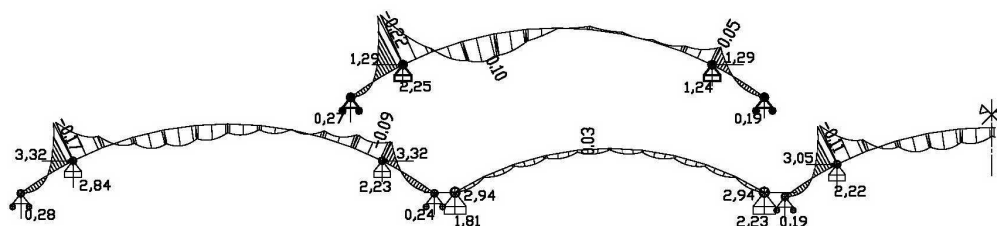
Zatem wyężenie łuków wykonanych z profili aluminiowych nie stanowiło podstawy do ich wymiany przy założonym przez wykonawcę oraz projekt wykonawczy schemacie statycznym. Należy również dodać, że wyężenie łuków zaprojektowanych z prostokątnych rur stalowych nie przekraczało 21%. Pozostawał jednak problem znaczących reakcji poziomych i pionowych przekazywanych na konstrukcję wsporczą a mianowicie na belki Vierendella

oraz połączenia spawane blach węzłowych. Wytyżenie spoin pachwinowych łączących blachę węzłową ze słupem (rys. 7b) o wymiarach $8 \times 100 \times 100$ mm przy zastosowanym schemacie statycznym łuków czteroprzegubowych zostało przekroczone aż o 370%. Z kolei wytyżenie belek Vierendeela o rozpiętości 5 m (rys. 9) wynosiło 117%, a o rozpiętości 6 m 128%.



Rys. 9. Obciążenie belki Vierendeella reakcjami z łuków

W zaistniałej sytuacji możliwej awarii zadaszenia w zbliżającym się okresie zimowym konieczna stała się zmiana schematu statycznego łuków czteroprzegubowych celem eliminacji nadmiernych reakcji poziomych. W łukach czteroprzegubowych wprowadzono więc na podporach skrajnych możliwość przesuwu (rys. 10). Efekt ten uzyskano poprzez zastosowanie otworów owalnych w kątownikach łączących belkę krawędziową z łukiem. Zapewniono możliwość przesuwu w każdą ze stron po 7,5 mm (możliwy przesuw od wpływów termicznych wynosił 1 mm). Kątowniki połączono z belką krawędziową za pomocą śrub poprzez dwie podkładki EPDM zapewniające możliwość poślizgu.



Rys. 10. Reakcje oraz momenty zginające w I (obciążenie trójkątne śniegiem) i II (obciążenie trójkątne śniegiem+worek śnieżny) układzie konstrukcyjnym dla schematu z przesuwymi podporami skrajnymi

Po wprowadzeniu podpór przesuwnych w łukach czteroprzegubowych stwierdzono, że wytyżenie łuków czteroprzegubowych w układzie I w przęśle między podporami wynosiło 41%, a w układzie II 51%. Ponadto znacząca redukcja reakcji poziomych przekazywanych na belki Vierendeella spowodowała, że ich wytyżenie spadło do 40%, czyli w granicach zakładanych przez projektantów. Dodatkowo przeliczono belkę krawędziową stanowiącą podporę skrajną. Jej wytyżenie po zmianie schematu statycznego wynosiło 31%, a ugięcie nie przekraczało wartości dopuszczalnej przyjętej jak dla podciągów ($L/350$). Z kolei różnica ugięć pomiędzy belką krawędziową oraz podciągami umożliwiała prawidłową pracę podpory skrajnej.

W dalszym jednak ciągu, pomimo znaczącej redukcji sił poziomych występowało kilkunastoprocentowe przekroczenie nośności spoin pachwinowych łączących blachy węzłowe ze słupami. W celu wzmocnienia połączenia i całkowitej redukcji sił poziomych obciążających spoiny poziome zaprojektowano obejmy łączące połączenia zakładkowe z głowicą słupa. Wyężenie obejm nie przekraczało 16%.

5. Wnioski i podsumowanie

Główną przyczyną zmiany stanu wyężenia konstrukcji przekrycia łukowego oraz elementów konstrukcji wsporczej była zmiana schematu podparcia łuków z dwuprzegubowego ze wspornikami na czteroprzegubowy bez możliwości przesuwu podpór skrajnych. Zmianę wprowadzono na etapie projektu podczas wykonywania rysunków wykonawczych. Zaistniała zamiana nosiła znamiona braku jakiegokolwiek korespondencji pomiędzy projektantem wykonującym obliczenia a osobami wykonującymi rysunki warsztatowe (należy dodać, że poza biurem projektowym w ramach pracy zleconej). Ujawniała ponadto zupełną nieznaną pracę konstrukcji łukowych. Powielone na etapie wznoszenia obiektu błędne rozwiązanie mogło doprowadzić do awarii konstrukcji w okresie zimowym.

Należy również zwrócić uwagę na samowolną zmianę przekrojów elementów konstrukcyjnych łuków dokonaną przez wykonawcę zadania. Wykonawca jakiegokolwiek obiektu pod żadnym pozorem nie powinien dokonywać zmiany przekrojów i materiałów zastosowanych w projekcie bez uzgodnienia z projektantem. Każda zmiana zaistniała w czasie budowy powinna być wyjaśniona w trakcie nadzoru autorskiego przy wyraźnej pisemnej akceptacji projektanta z adnotacją w dzienniku budowy.

Literatura

1. Runkiewicz L.: O awariach i katastrofach budowlanych w Polsce w latach 1962÷2004. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 4/2006, s. 193,195.
2. Łubiński M. Żółtowski W.: „Konstrukcje metalowe”, t II Arkady, Warszawa 2004
3. Bogucki W., Żybertowicz M.: Tablice do projektowania konstrukcji stalowych, Arkady, Warszawa, 1966.
4. Projekt budowlano – wykonawczy zadania targowiska autorstwa biura architektoniczno – budowlanego „Franta&Franta” sp. z o. o.
5. PN-80/B-02010/Az1 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.
6. PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
7. PN-82/S-10052 Obiekty mostowe stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
8. PN-EN 515:1996 Aluminium i stopy aluminium. Wyroby przerobione plastycznie. Oznaczenia stanów.