

Ocena porównawcza różnych sposobów zespolenia płyty betonowej z dźwigarami stalowymi kratownicowymi

Comparative assessment of various methods of joining a concrete slab with steel truss girders

mgr inż. Kazimierz Piwowarczyk, prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak (ORCID: 0000-0002-7083-7530), Politechnika Krakowska

DOI 10.5604/01.3001.0053.6988

Streszczenie: W pracy podano wyniki analizy statycznej belek zespolonych z dźwigarami stalowymi kratownicowymi. Uwzględniono różne rozpiętości przęseł, dostosowując odpowiednio parametry geometryczne prętów kratownic. Rozpatrzono dwa sposoby zespolenia płyty żelbetonowej z dźwigarami; zespolenie na całej długości pasów górnych i zespolenie tylko w węzłach. Rozpatrywano pracę konstrukcji zespolonej pod obciążeniami stałymi od wyposażenia oraz obciążeniami ruchomymi. Nie analizowano innych oddziaływań.

Słowa kluczowe: most kratownicowy, zespolony, zespolenie w węzłach, zespolenie ciągłe.

Abstract: The paper presents the results of static analysis of composite beams with steel truss girders. Various structure spans were taken into account, accordingly adjusting the geometrical parameters of the truss bars. Two methods of joining the reinforced concrete slab with truss girders were considered; joining along the entire length of the upper chords and joining only at the nodes. The work of the composite structure under overlay loads and moving loads was considered. Other effects have not been analysed.

Keywords: rurs bridge, composite, connection in nodes, continuous connection.

1. Wprowadzenie

Czasy, gdy w dokładnej analizie statycznej kratownicy obliczano przy założeniu przegubowych połączeń w węzłach, już dawno minęły. Uproszczenie takie jeszcze stosuje się sporadycznie w obliczeniach przybliżonych i to przy prostych schematach konstrukcyjnych. W dobie łatwego dostępu do różnych programów komputerowych kratownice oblicza się najczęściej jako ramownice wewnątrznie wielokrotnie statycznie niewyznaczalne.

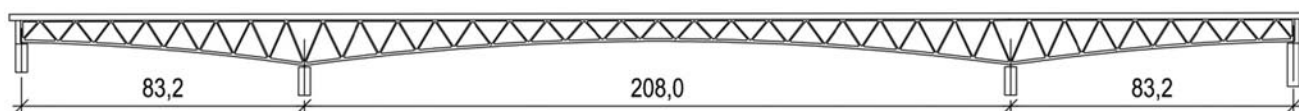
Konsekwencją różnych sztywności węzłów są zróżnicowane wartości sił wewnętrznych w prętach kratownic. Różnice te są tym większe, im większe są sztywności węzłów. W przypadku skrajnym – przy założeniu przegubowych połączeń – momenty zginające są równe zero. Wówczas siły podłużne przyjmują większe wartości.

W przypadku konstrukcji zespolonych z dźwigarami kratownicowymi można rozróżnić dwa podstawowe sposoby połączenia płyty betonowej (żelbetonowej) z częścią stalową. Zespolenie można zrealizować na całej długości pasów kratownicy lub „punktowo” tylko w węzłach. W pierwszym

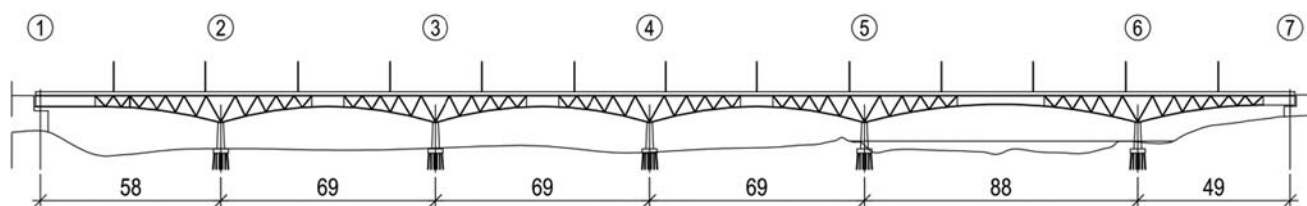
przypadku pasy kratownicy wraz z płytą są zginane na całej długości, a w drugim wartości momentów zginających w prętach kratownicy i w płycie wynikają ze sztywności węzłów. Nie bez znaczenia są parametry geometryczne kratownic i ich elementów składowych, a także wartości i rodzaj obciążenia.

Konstrukcje zespolone złożone ze stalowych dźwigarów kratownicowych i zespoloną z nimi płytą betonową (żelbetonową) nie są szeroko stosowane. Niemniej jednak można wymienić jako spektakularne osiągnięcie most kolejowy w Nantenbach (Niemcy), a w Polsce most drogowy przez Bug w Broku. Schematy tych mostów pokazano na rysunkach 1 i 2. Jedną z koncepcji mostu przez Regalicę w Szczecinie również miała część stalową kratownicową (rys. 3). Tej koncepcji jednak nie zrealizowano (wykonano most zespolony z dźwigarami stalowymi blachownicowymi o zmiennej wysokości) [1].

Możliwych zastosowań zespolonych konstrukcji z dźwigarami kratownicowymi można upatrywać przy ich wzmacnianiu, gdy zachodzi konieczność zwiększenia nośności, a w istniejącej konstrukcji pomost z dźwigarami nie współpracuje.



Rys. 1. Most przez Men w Nantenbach



Rys. 2. Most przez Bug w Broku

W tym przypadku zespolenie pomostu rekompensuje z nową wiązką wzrost obciążenia stałego.

Belki zespolone z dźwigarami stalowymi kratownicowymi są stosowane najczęściej z jazdą górną. Pas górny może być nawet całkowicie lub częściowo zastąpiony płytą żelbetonową. Konstrukcje zespolone z dźwigarami kratownicowymi mogą być również z jazdą dolną. Możliwe zastosowania to mosty dla pieszych (kładki) i mosty kolejowe – rzadziej drogowe. W tym przypadku właściwe jest stosowanie obetonowanych pasów dolnych (zespolenie ciągłe) i sprężenie płyty.

2. Założenia do analizy

Do analiz przyjęto przęsła dwudźwigarowe, swobodnie podparte o konstrukcji kratownicowej z jazdą górą i zespoloną z nią betonową (żelbetonową) płytą pomostu. Założono, że kratownice mają pas górny o przekroju zapewniającym nośność w fazie wykonywania płyty pomostu bez konieczności podparć pośrednich. Parametrem zmiennym w analizie była rozpiętość przęsła, przy zachowaniu tego samego przekroju pomostu i wysokości konstrukcyjnej przęsła.

Założono pomost żelbetonowy o całkowitej szerokości 13,80 m, z jezdnią o szerokości 8,00 m. Zastosowano obciążenia ruchome zgodnie z EC 1-2 [2] ze współczynnikami $\alpha_{q1} = \alpha_{q2} = 1,0$ dla wózków tandemowych oraz $\alpha_{q1} = 1,33$, $\alpha_{q2} = 2,40$ i $\alpha_{qr} = 1,20$ dla obciążeń UDL.

W modelach obliczeniowych przyjęto kratownice płaskie. Do zestawienia obciążeń na pojedynczy dźwigar przyjęto rozdział poprzeczny obciążenia w proporcji 0,85: 0,15, co uwzględnia pewną sztywność skrętną przęsła. Wysokość kratownicy w osiach pasów stalowych wynosi 7,0 m. Taką samą wartość przyjęto jako długość przedziału pomiędzy węzłami kratownicy o schemacie Warrena. Przeanalizowano kratownice o 8, 10 i 13 przedziałach pasa dolnego, co odpowiada rozpiętościom przęseł 56, 70 i 91 m.

Usytuowanie płyty pomostu względem osi pasa górnego było takie samo dla obydwu sposobów zespolenia. Stąd oś betonowej płyty pomostu w zespoleniu w węzłach była przesunięta około 51 cm. Oś pasa zespolonego w sposób ciągły z górnym pasem stalowym kratownicy była przesunięta nie więcej niż 52 cm (zmniejszała się nieco wraz ze wzrostem przekroju stalowego pasa górnego kratownicy).

W modelu kratownic przyjęto zwiększoną realną sztywność węzłów przez zastosowanie offsetów dołączenia prętów krzyżulców do węzłów kratownicy. Przekroje pasów

górných dobierano w uproszczeniu ze względu na średnie naprężenia osiowe w prętach kratownic.

W pierwszej fazie pracy kratownic uwzględniano ciężar własny kratownic i ciężar betonu płyty pomostu. Założono brak podparć montażowych na czas betonowania płyty pomostu. Po zespoleniu rozważano wyłącznie wpływ obciążeń stałych od wyposażenia i obciążeń ruchomych z uwzględnieniem ich niekorzystnego ustawienia.

W celu lepszego rozpoznania pracy betonowej płyty pomostu wykonano dodatkowe analizy na przestrzennym modelu kratownicy. Płytę pomostu zamodelowano panelami modelującymi obszary węzłowe, obszary nad pasami stalowymi, poprzecznicę i pola płyty pomiędzy dźwigarami, stosując uśrednione grubości odpowiadające obszarom płyty. Analizy wykonano pod kątem rozkładów sił podłużnych i momentów zginających w aspekcie obydwóch rozpatrywanych sposobów zespolenia. Zostały przeprowadzone tylko na modelu kratownicy o rozpiętości 70 m.

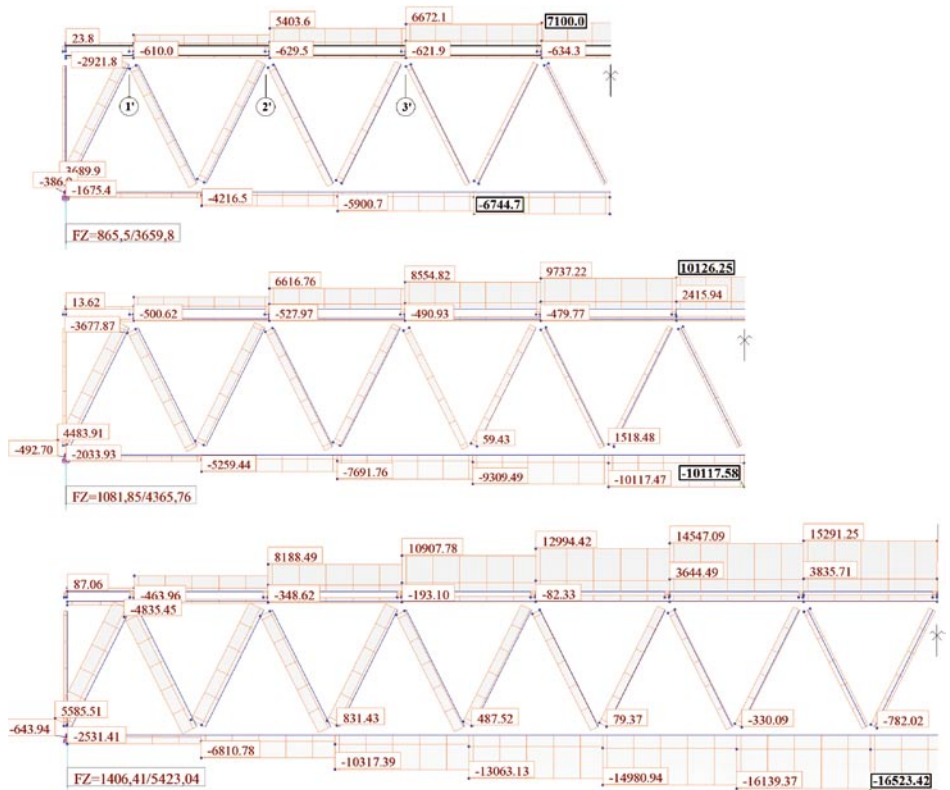
3. Wyniki analizy

Wyniki analiz na modelach 2D pokazano na rysunkach 3–7 w formie obwiedni sił. Podane wartości uwzględniają współczynniki częściowe SGN/STR. Porównanie wartości sił podłużnych w pasach kratownic dla zespolenia tylko w węzłach przedstawia rysunek 3, a analogiczne wartości sił podłużnych przy zespoleniu ciągłym (na całej długości pasów górnych) – rysunek 4. W obu przypadkach – dla założonych trzech rozpiętości przęseł.

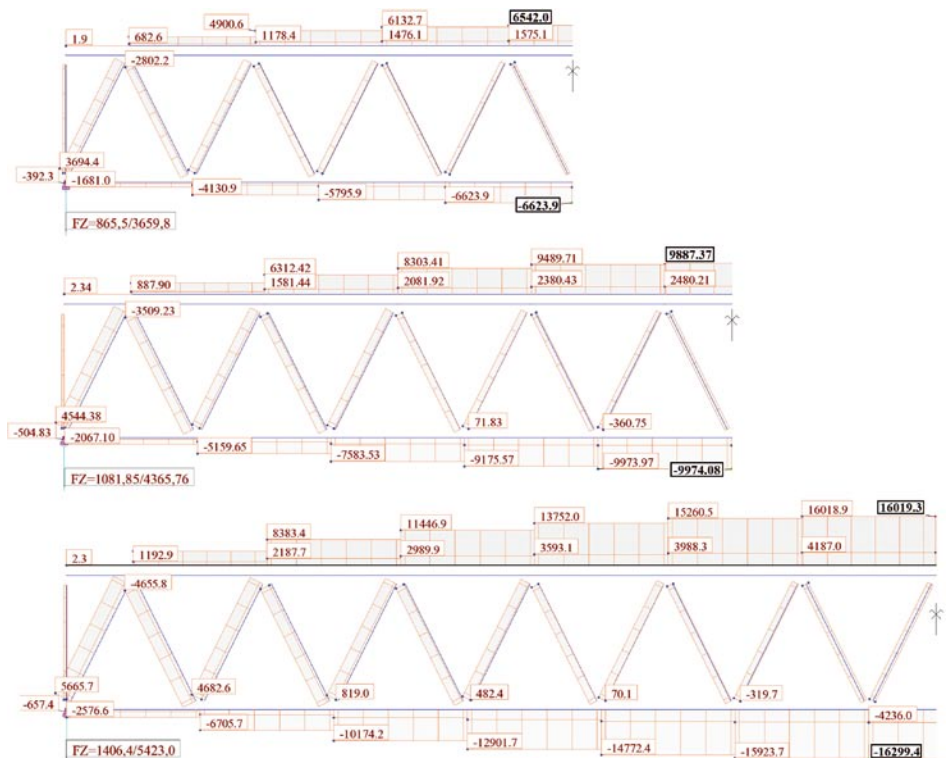
Z porównania sił rozciągających w pasach dolnych wynika, że dla obu rozwiązań wartości te są praktycznie takie same (różnice są rzędu 1,5%). Na mniejszą wartość siły w pasie dolnym dla przypadku zespolenia ciągłego wpływ ma większa sztywność giętna pasa górnego, przenoszącego częściowo zginanie globalne. Podobne różnice występują w przypadku wartości sił podłużnych w krzyżulcach kratownic.

Momenty zginające w pasach górnych są trudne do bezpośredniego porównywania. Wynika to z faktu wyraźnego rozdzielania momentów zginających na płytę i stalowy pas górny w przypadku zespolenia punktowego, podczas gdy w drugim przypadku mamy do czynienia z działaniem obciążeń na przekrój zespolony. Pomimo tego w porównaniach można poczynić następujące spostrzeżenia. Momenty zginające generowane w węzłach pasa górnego zależą od wielkości obrotu węzła kratownicy. Te są większe w przypadku

Rys. 3. Wartości sił podłużnych w pasach kratownic przy zespoleniu w węzłach



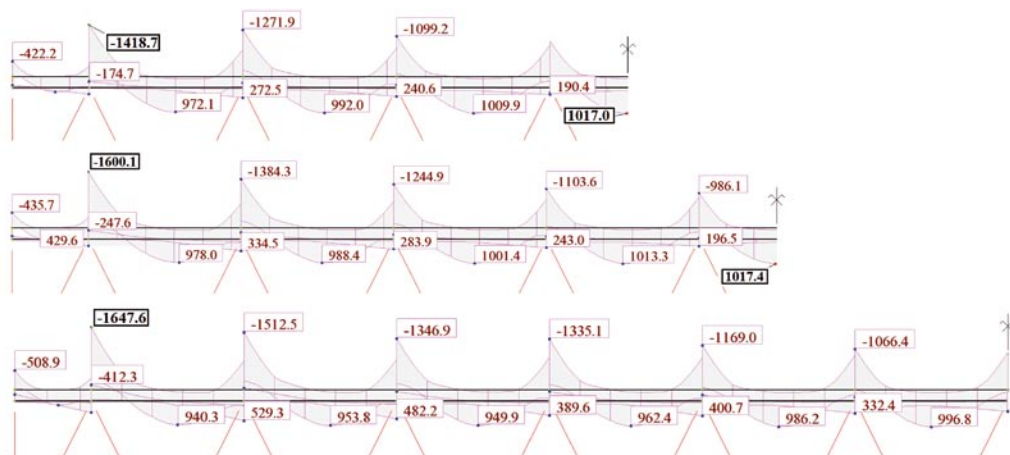
Rys. 4. Wartości sił podłużnych w pasach kratownic przy zespoleniu ciągłym



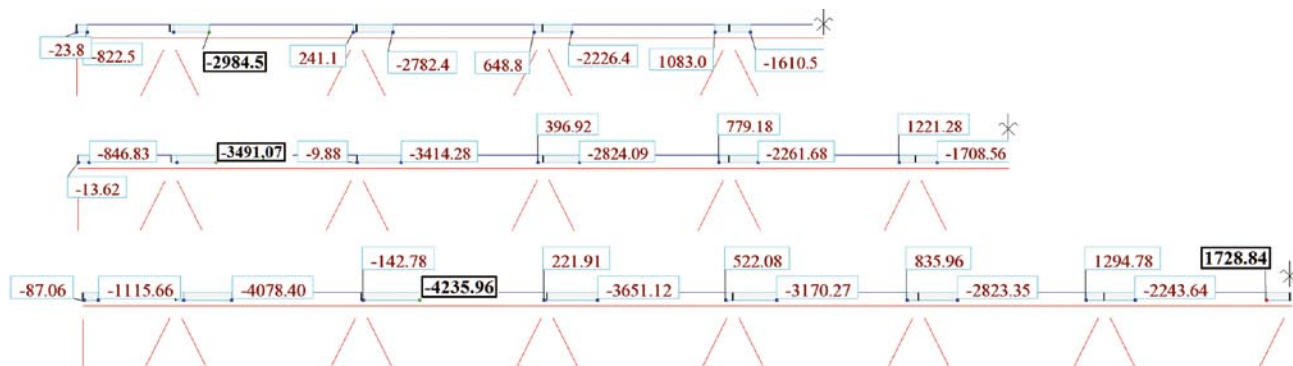
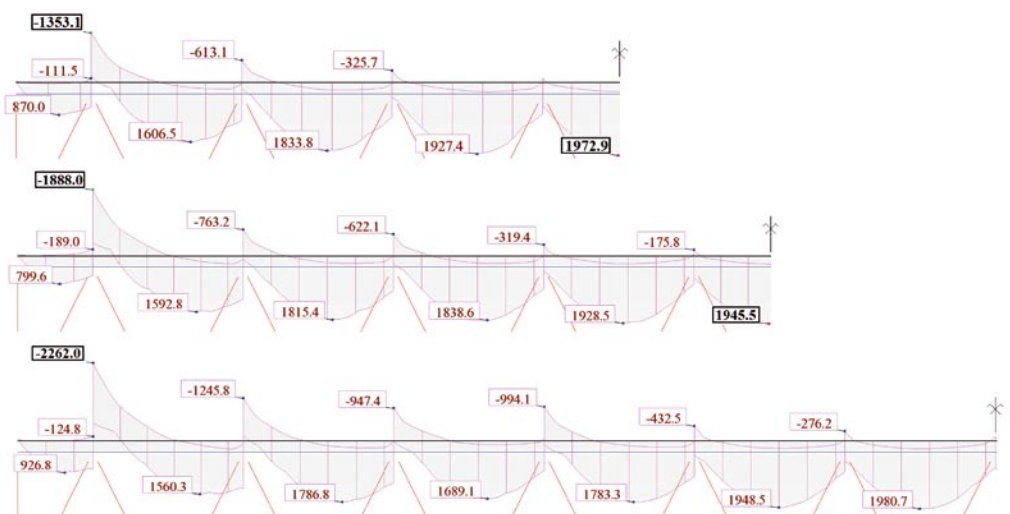
zespolenia punktowego, stąd też wartości momentów przywęzłowych w płycie betonowej są znaczące. Dla rozpiętości 91 m, gdzie sztywność pasa górnego musiała być wyraźnie większa, widać, że momenty przywęzłowe w pasach stalowych są największe przy najmniejszych wartościach momentów przęsłowych w płycie (rys. 5). Zmniejszające się wartości ujemnych momentów zginających w płycie (w węzłach)

wraz ze zbliżaniem się do środka rozpiętości przęsła (spadek wynosi około 1,5 raza niezależnie od rozpiętości przęsła), są wynikiem zmniejszającej się sztywności węzła, proporcjonalnie do zmian smukłości krzyżulców. W przypadku zespolenia ciągłego wartości momentów podporowych, w miarę oddalania od podpory, zmniejszają się w dużo większym stopniu. Praca zespolonego pasa górnego

Rys. 5. Wartości momentów zginających przęsłowych w pasach kratownic przy zespoleniu w węzłach



Rys. 6. Wartości momentów zginających przęsłowych w pasach kratownic przy zespoleniu ciągłym



Rys. 7. Wartości sił poprzecznych w betonowych „słupkach” łączących płytę pomostu z pasem stalowym

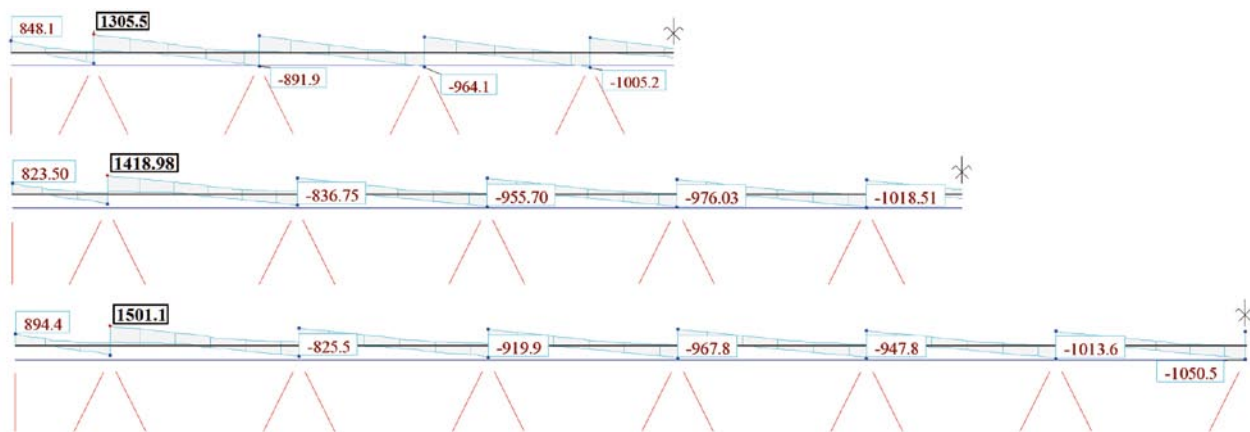
przypomina pracę belki na sprężystych podporach, których sztywność wynika z globalnej sztywności dźwigara.

Warto zauważyć, że w przypadku zespolenia ciągłego prostsze i przez to łatwiejsze jest ułożenie zbrojenia w płycie pomostu. W pobliżu węzłów występuje wyraźnie zginanie płyty momentami o przeciwnych znakach każdej strony węzła. Problem ten narasta wraz z odległością węzła od środka przęsła. Jest to szczególnie niekorzystne dla przekroju płyty w zespoleniu punktowym.

Zespolenie pomiędzy płytą betonową a dźwigarem kratownicowym należy zapewnić poprzez łączniki zespalające.

W przypadku zespolenia w węzłach trzeba przewidzieć dużą nośność połączenia zlokalizowaną na stosunkowo małym obszarze wokół teoretycznego węzła kratownicy. W takim przypadku łączniki muszą przenieść zarówno siłę poprzeczną, jak i moment zginający występujące w węzle połączenia. Wartości sił poprzecznych w betonowych „sztywnych słupkach” połączenia płyty betonowej z pasem stalowym, które wpływają na wielkość siły rozwarstwiającej zespolenia punktowego, przedstawiono na rysunku 7.

W przypadku zespolenia ciągłego bezpośredni wpływ na wymiarowanie łączników zespalających mają siły porzeczne



Rys. 8. Wartości sił poprzecznych na długości pasa górnego kratownicy przy zespoleniu ciągłym

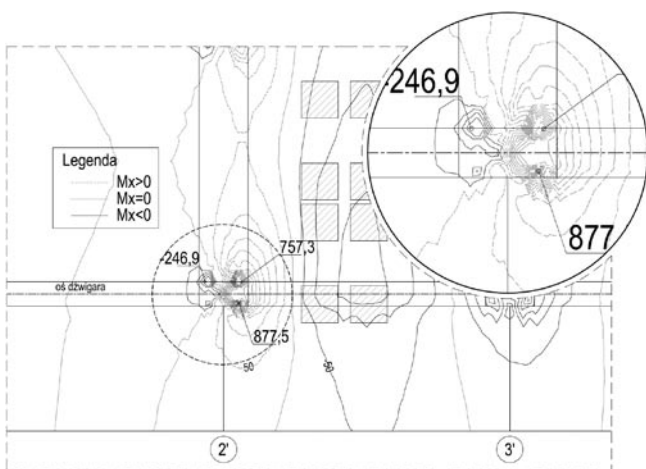
na długości poszczególnych przedziałów pasa górnego kratownicy. Obwiednie tych sił pokazano na rysunku 8. Można powiedzieć, że o ile największa siła poprzeczna występująca w miejscu połączenia krzyżulca podporowego z pasem górnym zależy liniowo od rozpiętości, o tyle w środku rozpiętości jest od niej prawie niezależna. W pozostałych węzłach wartości maksymalnych sił poprzecznych maleją w kierunku podparcia o ok. 20% względem wartości przyśrodkowej. Jest to związane z tym, że obrót węzła od obciążeń ruchomych jest przeciwny do obrotu od ciężaru wyposażenia. Same wartości sił ścinających prowadzą do niezbyt wygórowanych wymagań odnośnie nośności łączników zespalających.

W kontekście pracy zespolenia należy zwrócić uwagę na dużą asymetrię cykli obciążenia. Jest to spowodowane stosunkowo małym wpływem ciężaru wyposażenia i bardzo dużym wpływem obciążeń ruchomych. Przy wymiarowaniu połączeń zespalających należy więc dokładnie rozważyć wpływ zmęczenia na nośność połączenia.

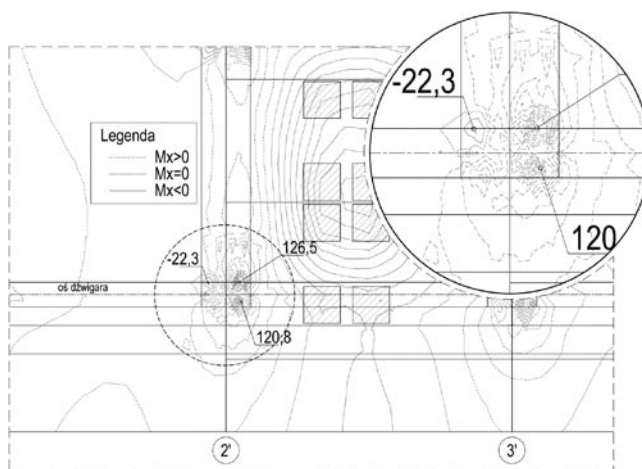
Obliczenia na modelu płaskim mogą dać w miarę poprawne wyniki w prętach stalowych kratownicy na etapie projektowania wstępnego. Określają również szacunkową

liczbę łączników potrzebnych do zespolenia ze względu na siły rozwarstwiająca między betonową płytą a stalowym dźwigarem kratownicowym. Model ten nie daje jednak podstaw do poprawnego określenia sposobu zbrojenia betonowej płyty pomostu. Dodatkowe analizy wykonane na modelu przestrzennym (dla rozpiętości 70 m) dają pogląd na występujące problemy. Przedstawione poniżej wyniki (wartości bez współczynników częściowych SGN) obejmują zmiany sił podłużnych i momentów zginających w kierunku „x” – równoległym do osi podłużnej mostu – co wybrano z uwagi na dominujący efekt ściskania płyty na tym kierunku.

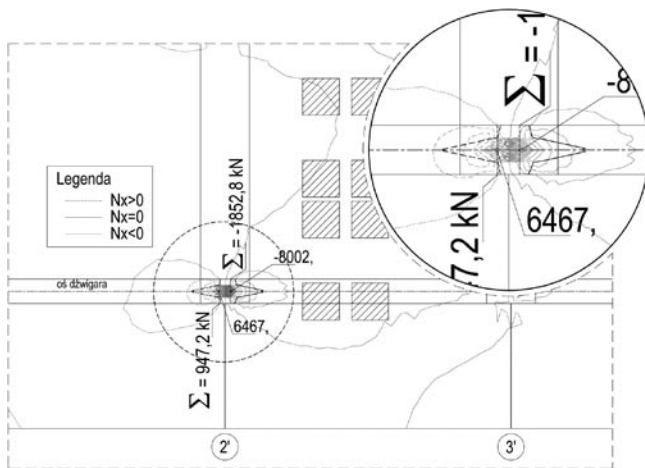
Porównując momenty zginające przedstawione na rysunkach 9 i 10 można stwierdzić, że dla zespolenia punktowego wpływ zginania w płycie jest znacząco większy niż przy zespoleniu ciągłym, co jest związane z możliwością zginania płyty „niezależnego” od pasa kratownicy. Widać tutaj dużą zmianę wartości momentu zginającego od rozciągającego włókna górne (na prawo od węzła) do znaczącego ich ściskania z drugiej strony. W przypadku zespolenia ciągłego (rys. 10) ten wpływ jest znacząco mniejszy.



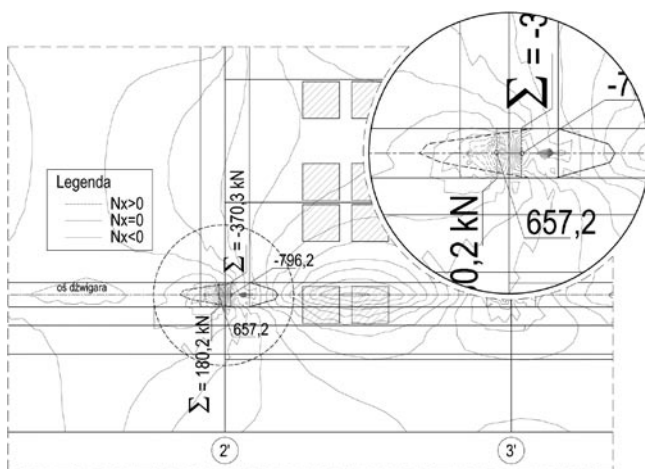
Rys. 9. Momenty zginające m_x w płycie w przypadku zespolenia w węzłach



Rys. 10. Momenty zginające m_x w płycie w przypadku zespolenia ciągłego



Rys. 11. Siły podłużne n_x w płycie w przypadku zespolenia punktowego



Rys. 12. Siły podłużne n_x w płycie w przypadku zespolenia ciągłego

Jeszcze większe zmiany zachodzą w rozkładach sił podłużnych, co widać na rysunkach 11 i 12. Przy zespoleniu punktowym „za węzłem” dochodzi do znaczącego rozciągania płyty na przylegającym obszarze (z rozwiązania płaskiego otrzymujemy płytę w całości jako ściszaną). Zmiana wartości siły na szerokości pasa kratownicy wyrażona sumą w oznaczonym przekroju zmienia się o 2800 kN, co po uwzględnieniu współczynników częściowych SGN daje wartość 3780 kN. Jest to wartość zbliżona do wyliczonej na modelu płaskim (3491 kN), a różnice wynikają m.in. z założonego rozdziału obciążenia w obliczeniach „płaskich”. W przypadku zespolenia ciągłego obszary rozciągania płyty za węzłem mieszczą się w bezpośrednio przyległym obszarze węzła, a zmiana sił z obu stron punktu węzłowego wynosi tylko 550 kN, czyli jest pięciokrotnie mniejsza.

Można również nadmienić, że na wielkość siły ścisniającej w płycie pomostu przy zespoleniu ciągłym duży wpływ ma lokalne obciążenie pomostu, co przy zespoleniu punktowym objawiło się w bardzo małym stopniu. Jest to efekt współpracy lokalnego ściskania płyty współpracującej ze stalowym pasem dźwigara w przekroju zespolonym.

Przedstawione rozkłady sił podłużnych i momentów zginających w płycie uwiadcniają konieczność stosowania w analizach modeli powłokowych dla płyty pomostu, gdyż uproszczone obliczenia oparte na szerokościach współpracujących płyty nie dają wystarczających podstaw do poprawnego zbrojenia tego elementu.

4. Podsumowanie

Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że sposób zespolenia płyty betonowej z dźwigarem stalowym kratownicowym ma niewielki wpływ na wartości sił podłużnych w pasach dolnych i krzyżulcach kratownicy (w rozpatrywanych przykładach różnica ta wynosi tylko około 1,5%).

W przypadku zespolenia ciągłego otrzymuje się dużo korzystniejszy rozkład wartości momentów zginających w pasie górnym – znaczące ich zmniejszanie w miarę zbliżania się do środka rozpiętości. W przypadku zespolenia punktowego wartości momentów podporowych w płycie są uzależnione przede wszystkim od lokalnego oddziaływania obciążeń ruchomych.

Wpływ rozpiętości dźwigara na sposób pracy objawia się jedynie w przypadku rozpatrywania pracy betonowej płyty, a tutaj największe znaczenie ma sposób zespolenia – reszta jest „efektem skali”. Podkreślenia wymaga korzystny wpływ zespolenia na pracę płyty betonowej.

Analiza wpływów lokalnych w betonowej płycie pomostu ujawnia znaczącą przewagę zespolenia ciągłego w stosunku do zespolenia punktowego – redukuje wielkość obszarów, gdzie należy zastosować zbrojenie nietypowe z uwagi na lokalne rozciągania płyty.

Należy podkreślić, by w analizie zespolenia zwracać szczególną uwagę na wpływ zmęczenia na jego nośność. Jest to spowodowane stosunkowo małym udziałem obciążeń stałych po zespoleniu w całkowitych wartościach sił rozwarstwiających.

Zespolenie ciągłe – w porównaniu z zespoleniem w węzłach – jest korzystniejsze aniżeli zespolenie punktowe. Zmniejsza efekty lokalne oddziaływań od obciążenia ruchem i upraszcza konstrukcję płyty pomostu oraz nie wymaga dużej koncentracji łączników zespalających na małej długości pasa. Rozwiązane to jest również korzystniejsze ze względu na łatwość deskowania i prostotę zbrojenia płyty. Zalety te okazują się szczególnie ważne w przypadku mostów kolejowych z korytem balastowym, gdyż w porównaniu z obciążeniami drogowymi (obecnie już bardzo wygórowanymi) obciążenia użytkowe kolejowe są jeszcze większe.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Furtak K., Mosty zespolone, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa-Kraków, 1999
- [2] PN-EN 1991-2: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów