

Projekt konstrukcji wieloprzęsłowej płyty pomostu wiaduktu drogowego

Structural design of the multi-span deck slab of road viaduct

mgr inż. Piotr Wysocki (ORCID: 0009-0005-1597-0047), dr hab. inż. Jolanta Anna Prusiel, prof. PB – promotor (ORCID: 0000-0001-6827-1059), Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka

DOI: 10.5604/01.3001.0054.7228

Streszczenie: W artykule przedstawiono wymiarowanie wieloprzęsłowej płyty pomostu wiaduktu drogowego zgodnie z normami dla stanów granicznych nośności oraz użyteczności. Po wymiarowaniu wybranych elementów konstrukcyjnych obiektu dokonano analizy wykresów sił wewnętrznych przed i po redystrybucji spowodowanej zarysowaniem przekroju podporowego.

Słowa kluczowe: wiadukt drogowy, analiza statyczna, model numeryczny, wieloprzęsłowa płyta pomostu, belki sprężone.

Abstract: The article presents the dimensioning of a multi-span bridge deck slab of a road viaduct according to standards for ultimate and serviceability limit states. After dimensioning selected structural elements of the object, the analysis of the diagrams of internal forces before and after their redistribution caused by scratching of the support section, was carried out.

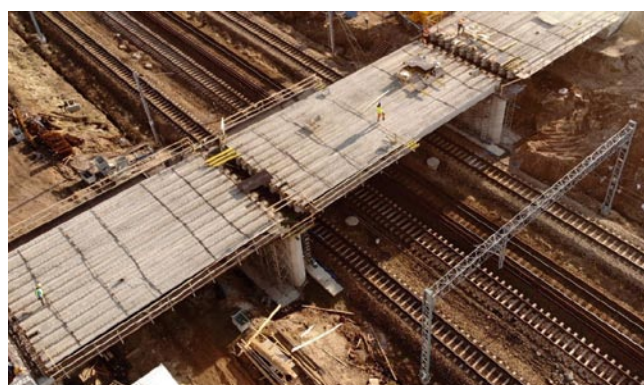
Keywords: road viaduct, static analysis, numerical model, multi-span deck slab, prestressed beams.

1. Wprowadzenie

Obiekty inżynierskie pozwalają pokonać wszelkiego rodzaju przeszkody. Długość okresu użytkowania, rodzaj użytego materiału, dostosowanie do warunków komunikacyjnych, czy schemat statyczny sprawia, że dobranie odpowiedniego rodzaju obiektu ze względów ekonomicznych i możliwości wykonawstwa może być skomplikowane. Według statystyk Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Polsce [1] na drogach krajowych najczęściej wyróżnia się obiektów wykonanych z betonu zbrojonego. Z każdym rokiem ich procentowy udział spada, głównie na rzecz obiektów z betonu sprężonego. Znaczną część z nich stanowią obiekty z prefabrykowanych belek sprężonych zespolonych z płytą pomostu. Możliwość prefabrykacji oraz wykorzystanie belek jako deskowanie zespolonej płyty pomostu wymiennie skraca czas budowy obiektów. Opracowanie katalogów belek mostowych typu T [2] oraz KUJAN NG [3] przyczyniło się do spopularyzowania tego rozwiązania, a aktualna trwałość obiektów z betonu sprężonego świadczy o poprawności ich założeń projektowych.

Analiza konstrukcji zespolonych ze sprężonych belek prefabrykowanych wymaga uwzględniania etapowania budowy, efektów reologicznych oraz wpływu zarysowania węzła uciążlającego na przyrost sił wewnętrznych w belce prefabrykowanej. Wartości sił wewnętrznych w elementach konstrukcji mogą się znacząco różnić w zależności od przyjętego czasu poszczególnych etapów budowy, dlatego na etapie projektowania należy uwzględnić najbardziej niekorzystne

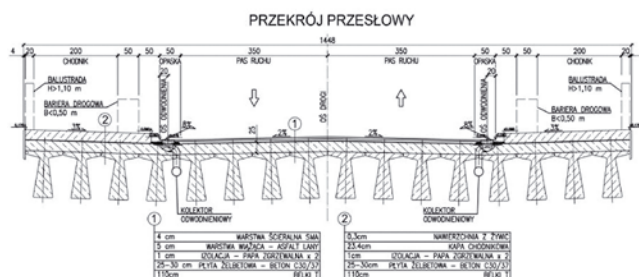
warunki wykonawstwa. Przykładem jest podana wartość maksymalnego składowania belek w katalogu belek T[2], która wynosi 180 dni od momentu sprężenia do wbudowania (zalecana wartość wynosi maksymalnie 120 dni). W przypadku dłuższego składowania belek może wystąpić niekorzystny wpływ pełzania betonu. Jeden z etapów budowy, jakim jest ułożenie sprężonych belek przed betonowaniem układu, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Etap ułożenia prefabrykowanych belek sprężonych [4]

2. Charakterystyka wiaduktu drogowego

Wiadukt drogowy zaprojektowano jako trójprzęsłową płytę pomostu wykonaną z prefabrykowanych strunobetonowych belek typu T wraz z zespoloną żelbetową płytą pomostu oraz węzłami uciążlającymi. Płytę podparto na trzech łożyskach na każdej z podpór. Rozpiętości teoretyczne przęseł



Rys. 2. Przekrój przęsłowy wiaduktu drogowego

wynoszą 24,00+27,80+24,00 [m], a długość całkowita płyty wynosi 76,60 m. Szerokość całkowita obiektu wynosi 14,48 m, co pozwala na przeprowadzenie drogi 1x2 (droga jednojezdniowa o dwóch przeciwnych pasach ruchu) oraz chodnikach dla pieszych z obu stron obiektu (rys. 2). Poprzecznice skrajne oraz pośrednie o wysokości 1,90 m powiązane z płytą pomostu. Założono wykonanie poprzecznic w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykonano podwalinę, na której możliwe będzie ułożenie belek oraz późniejsze uciążlenie ustroju w drugim etapie. Odwodnienie obiektu zaprojektowano zgodnie z obowiązującymi warunkami technicznymi. Uwzględniono zmienność wysokości płyty pomostu spowodowaną wypiętrzeniem belek przez sprężenie, co pozwoliło na ukształtowanie założonego spadku podłużnego płyty.

3. Wymiarowanie

3.1. Dane materiałowe

Strunobetonowe belki typu T zaprojektowano z betonu klasy C50/60 z cementu klasy R, natomiast płytę pomostu, podwalinę oraz węzły uciążlające z betonu klasy C30/37 z cementu klasy N. Zastosowano stal zbrojeniową o charakterystycznej granicy plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa oraz stal sprężającą o charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie $f_{pk} = 1860$ MPa i umownej 0,1% granicy plastyczności $f_{p0,1k} = 1600$ MPa.

3.2. Założenia projektowe i analiza statyczna

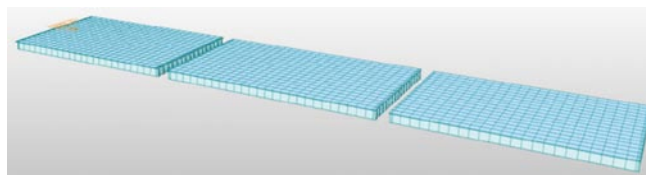
Model płyty pomostu i obliczenia statyczne wykonano w programie Midas Civil [5] opartym na metodzie elementów skończonych z uwzględnieniem etapowania robót (rys. 3–5). W każdym z etapów (tab. 1) uwzględniono odpowiednie oddziaływania stałe i zmienne (w tym oddziaływania reologiczne) oraz przyjęto odpowiednie dla etapu warunki brzegowe. Uzyskano obwiednie sił wewnętrznych (rys. 6-12) oraz opracowano w programie MathCad Prime [6] algorytmy do wymiarowania elementów płyty pomostu w SGN i SGU.

Spełniono następujące warunki obowiązujących norm dla stanów granicznych nośności i użyteczności (większość założeń projektowych zaczerpnięto z „Wzorców i standardów rekomendowanych przez ministra właściwego ds. transportu WR-M” [7]):

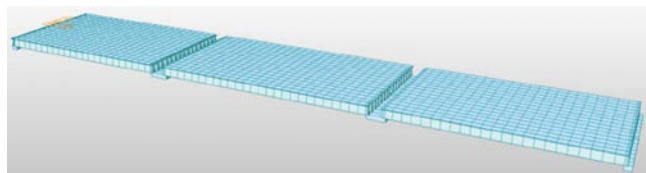
Tabela 1. Etapowanie oraz wiek betonu w poszczególnych etapach realizacji obiektu

Etap	Wiek betonu belek	Wiek betonu płyty oraz węzłów uciążlających	Wiek betonu podwaliny
Sprężenie belek	1 dzień	-	-
Wykonanie podwalin	46 dni	-	1 dzień
Betonowanie płyty oraz węzłów uciążlających	60 dni	1 dzień	14 dni
Montaż elementów wyposażenia	120 dni	60 dni	74 dni
Oddanie do użytkowania	240 dni	120 dni	134 dni
Koniec okresu eksploatacji	100 lat	100 lat	100 lat

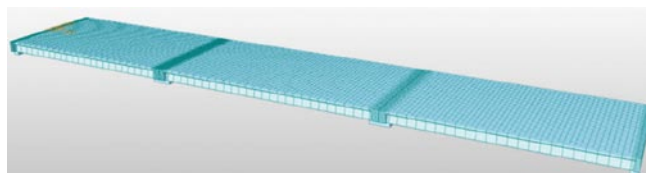
- obliczeniową nośność przekroju belki w zależności od etapu prac oraz przekrój zespolony belki z nadbetonem,
- nośność żelbetowego przekroju podporowego, w tym dodanie prętów uciążlających w dolnej strefie przekroju belek pracujących na momenty dodatnie (rozciągające włókna dolne podpór) spowodowane m.in. różnicą osiadań podpór, oddziaływaniem termicznym oraz oddziaływaniami reologicznymi,
- warunek minimalnego zbrojenia ze względu na kruche zniszczenie elementu na skutek zerwania cięgien sprężających,
- sprawdzono warunek ograniczenia naprężeń, dokonano sprawdzenia rys oraz warunku dekompresji.



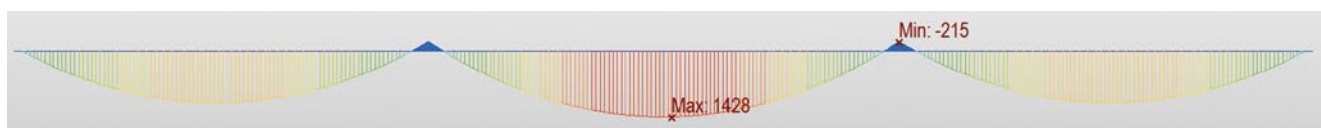
Rys. 3. Model numeryczny płyty pomostu – etap 1 (sprężenie belek)



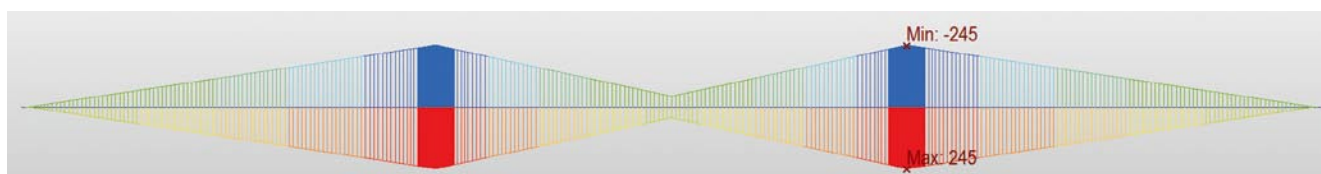
Rys. 4. Model numeryczny płyty pomostu – etap 2 oraz 3 (ułożenie belek oraz betonowanie)



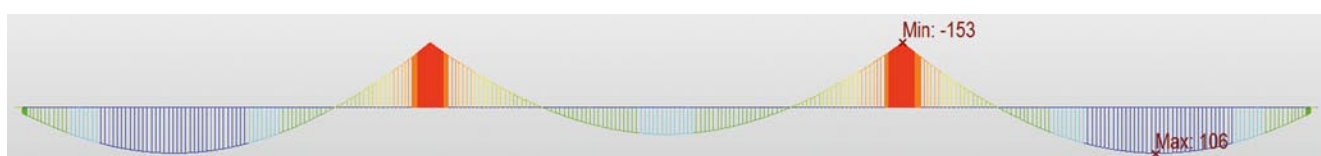
Rys. 5. Model numeryczny płyty pomostu – etap 4, 5 oraz 6 (wykonanie podwaliny, ułożenie belek oraz betonowanie układu)



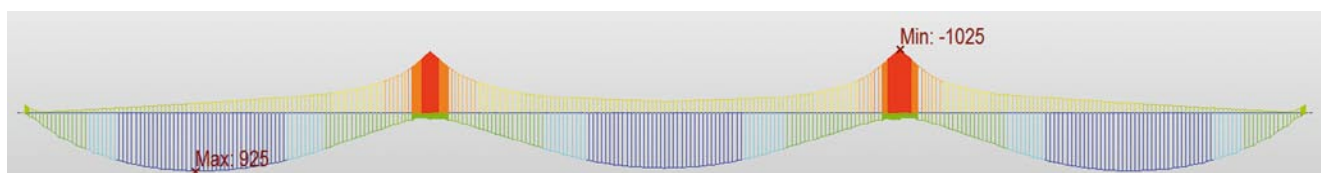
Rys. 6. Obwiednia momentów zginających od oddziaływań w fazie budowy po zespoleniu przekroju [kNm]



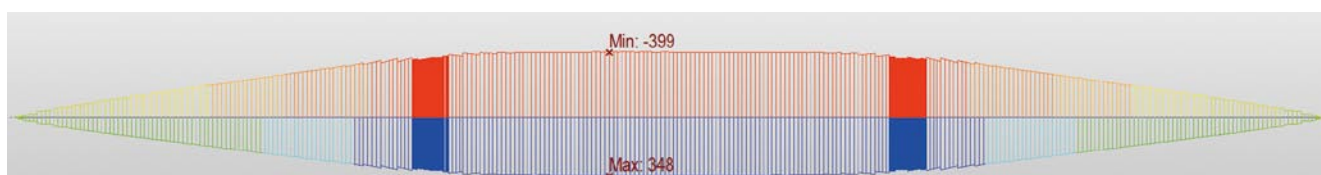
Rys. 7. Obwiednia momentów zginających od nierównomiernego osiadania podpór – wartość momentu w środkowym przęśle $M=42$ kNm



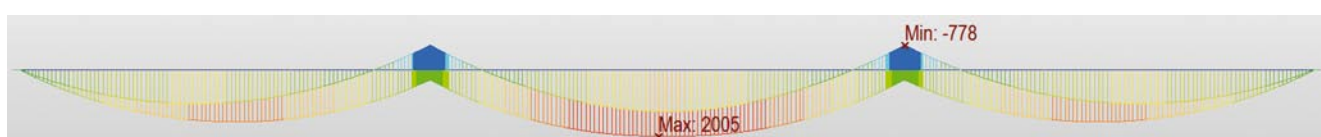
Rys. 8. Obwiednia momentów zginających od ciężaru elementów wyposażenia – wartość momentu w środkowym przęśle $M = 62$ kNm



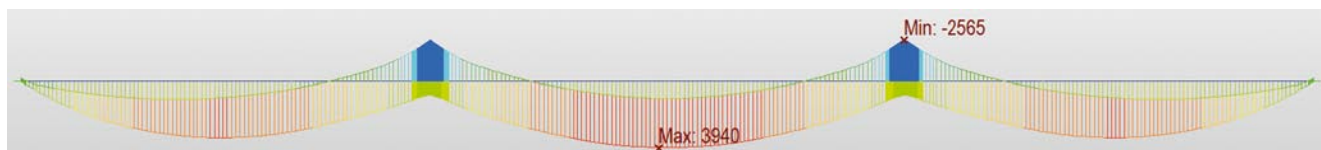
Rys. 9. Obwiednia momentów zginających od obciążenia ruchomego w kombinacji charakterystycznej (działających na przekrój zespolony) – wartość momentu w środkowym przęśle $M=880$ kNm



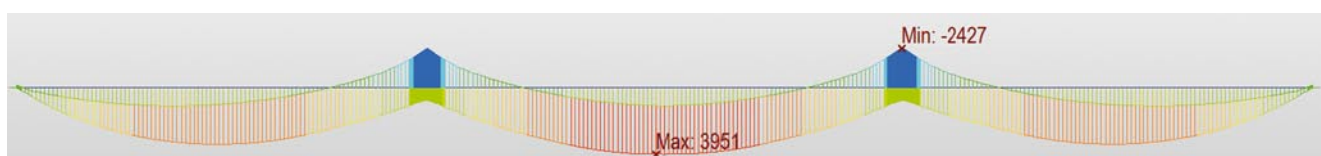
Rys. 10. Obwiednia momentów zginających od oddziaływań termicznych (współczynnik 0,6) w kombinacji charakterystycznej (działających na przekrój zespolony) – wartość momentu w przekroju podporowym $M=368$ kNm



Rys. 11. Obwiednia momentów zginających od kombinacji prawie stałej (suma z fazy budowy i użytkowej) dla obiektu oddanego do użytkowania po 100 latach [kNm]



Rys. 12. Obwiednia momentów zginających od kombinacji obliczeniowej (suma z fazy budowy i użytkowej) dla obiektu oddanego do użytkowania po 100 latach [kNm]



Rys. 13. Obwiednia momentów zginających od kombinacji obliczeniowej (suma z fazy budowy i użytkowej) po redystrybucji sił [kNm]

Tabela 2. Porównanie obwiedni momentów zginających w płycie pomostu

Wartości momentów zginających	Przekrój przęsłowy (przęsło środkowe)			Przekrój podporowy przedskrajny		
	Przed redystrybucją	Po redystrybucji	Różnica	Przed redystrybucją	Po redystrybucji	Różnica
	[kNm]	[kNm]	[%]	[kNm]	[kNm]	[%]
Nierównomierne osiadanie podpór	42	41	-2,38	245	230	-6,12
Ciążar wyposażenia	62	70	+12,90	153	149	-2,61
Obciążenie ruchome – wartości charakterystyczne	880	894	+1,59	1025	958	-6,54
Oddziaływanie termiczne – wartości charakterystyczne	348	335	-3,74	368	357	-2,99
Kombinacja obliczeniowa – suma z fazy budowy i użytkowej	3940	3951	+0,28	2565	2427	-5,38

4. Redystrybucja sił wewnętrznych dla zarysowanego przekroju podporowego

W układzie wieloprzęślowym zespolonym dopuszcza się możliwość wystąpienia rysy w przekroju podporowym. Przeciwnie w przekroju przęsłowym, gdzie należy spełnić warunek dekompresji w pobliżu cięgien sprężających. Zarysowanie przekroju powoduje zmniejszenie sztywności przekroju podporowego, a co za tym idzie redystrybucję sił wewnętrznych i zwiększenie ich wartości w przęśle.

Na podstawie wartości momentu podporowego dla kombinacji prawie stałej – zgodnie z Tab. 7.10N w [8] – obliczono sztywność zbrojonego przekroju podporowego zgodnie z algorytmami zawartymi w [9, 10]. Sztywność węzła po zarysowaniu wyniosła 55%. Zredukowaną sztywność uwzględniono za pomocą odpowiedniego modułu dostępnego w programie Midas Civil [5].

Na rysunku 13 przedstawiono obwiednię momentów zginających w płycie pomostu od kombinacji obliczeniowej po redystrybucji sił wewnętrznych.

W tabeli 2 porównano wartości momentów zginających przed i po redystrybucji.

5. Podsumowanie

Wartość momentu podporowego w płycie pomostu w kombinacji obliczeniowej spadła o 5,38%, a przęsłowego wzrosła o 0,28%. Doszło do redystrybucji wartości sił od obciążeń zewnętrznych działających na uciążlony układ płyty pomostu, takich jak ciężar wyposażenia oraz obciążenie ruchome. Oddziaływania takie jak nierównomierne osiadanie konstrukcji i termiczne, ze względu na zmianę sztywności przekroju podporowego zmniejszyły globalnie swoje wartości

w przekroju przęsłowym jak i podporowym. W przypadku założenia technologii wykonania belek na podporach tymczasowych, wartość momentów podporowych w płycie po uciążeniu oraz zwolnieniu podpór byłaby większa i skutkowała większymi różnicami redystrybucji. Należy pamiętać, że współczynniki zawarte w normach umożliwiają bezpieczne zaprojektowanie konstrukcji i w przypadku tak małych różnic nie zagrazi to bezpieczeństwu wiaduktu. Dla obiektów, w którym stosuje się rozsunięte belki T lub w obiektach zespolonych stalowo-betonowych, różnica między sztywnością płyty pomostu, a węzłów uciążających może być większa niż w założonym przypadku i wówczas mogą wystąpić większe różnice.

Praca dyplomowa magisterska została nagrodzona w Konkursie PZITB „Najlepsze Prace Dyplomowe Absolwentów Studiów Wyższego kierunku Budownictwo” w 2023 roku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.gov.pl/web/gddkia/dane-statystyczne>, 10.08.2022
- [2] Przedsiębiorstwo Robót Mostowych Mosty Łódź S.A. (2021), Prefabrykowane belki strunobetonowe typu T
- [3] Biuro projektowo-badawcze dróg i mostów Transprojekt Warszawa Sp. z o.o., Zespolone mosty płytowe z belek strunobetonowych, 2014
- [4] <https://nowak-mosty.pl/portfolio-item/myszkow-nierada/>, 10.08.2022
- [5] MIDAS IT Midas Civil
- [6] Mathsoft PTC Mathcad Prime 8.0 – wersja studencka
- [7] Praca zbiorowa pod kierunkiem Tomasza Siwowskiego, Podręcznik projektowania drogowych obiektów mostowych według Eurokodów w praktyce. Wzorce i standardy rekomendowane przez ministra właściwego ds. transportu WR-M-22, 2021
- [8] PN-EN 1992-2:2010: Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczenia i reguły konstrukcyjne
- [9] Łapko A., Jensen B. Ch., Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetonowych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2005
- [10] Łapko A., Zeszyt 2: Projektowanie konstrukcji żelbetonowych. Zeszyty edukacyjne Buildera, 2011