

prof. dr hab. Mykhaylo Delyavskyy *
dr hab. inż. Jerzy Gołaś, prof. UTP*
dr inż. Maria Olejniczak*

Analiza wzmocnienia płyty mostowej połączonej z kratownicą przestrzenną

Analysis of reinforcement of a bridge plate connected with a space truss

Streszczenie. Badano konstrukcję mostową złożoną z płyty pomostu i kratownicy przestrzennej. Analizowano wpływ typu wzmocnienia płyty mostowej na nośność graniczną konstrukcji. Rozpatrywano różne typy wzmocnienia. Konstrukcję obciążono ciężarem własnym oraz ciężarem użytkowym w postaci ruchomego układu sześciu sił skupionych modelujących obciążenie pochodzące od kół pojazdu. Korzystając z linii wpływu ugięcia płyty, ustalono położenie przekroju „ekstremalnego”, w którym ugięcie przyjmuje największą wartość.

Słowa kluczowe: wzmocnienie płyty mostowej, nośność konstrukcji.

Abstract. A certain type of bridge structure is taken into consideration which consists with plate of platform and a space truss. The effect of reinforcement of the bridge plate on the boundary carrying capacity of the structure is analyzed. The various of reinforcement types are considered. The structure is loaded with the deadweight and the useful load in the form of a moving system of six concentrated forces modeling the load deriving from the wheels of the vehicle. Using the line of effect of the plate deflection, the location of the „extreme” intersection was determined, where deflection assumes the highest value.

Keywords: reinforcement of a bridge plate, carrying capacity of a structure.

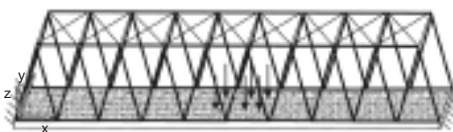
Wiele konstrukcji mostowych wymaga naprawy lub wzmocnienia, gdyż podlegają ciągłym procesom degradacji na skutek uszkodzeń zmęczeniowych, mechanicznych lub korozji materiału. Również wzrost intensywności ruchu wpływa na konieczność podwyższenia nośności istniejących konstrukcji mostowych.

W celu zachowania bezpieczeństwa pracy konstrukcji płytę mostową wzmacnia się w strefach rozciąganych zbrojeniem w postaci np. rusztów, prętów, płaskowników. Ten sposób zwiększa jednak ciężar konstrukcji, a zbrojenie może ulegać korozji. Do nowoczesnych metod wzmacniania konstrukcji mostowych należy podklejanie taśm i mat z materiałów kompozytowych FRP (Fiber Reinforced Polymer) [1-4]. Są one lekkie i cienkie, odporne na korozję i temperaturę oraz mają dużą wytrzymałość na rozciąganie i zmęczenie. Wzmocnienie konstrukcji materiałami FRP pozwala jednocześnie zmniejszyć ciężar własny konstrukcji przez zmniejszenie grubości płyty nośnej. Najczęściej jako zbrojenie stosowane są włókna węglowe, które charakteryzują się

mniejszym ciężarem w porównaniu z włóknami szklanymi (a tym bardziej z elementami stalowymi) oraz dużą wytrzymałością na rozciąganie.

Program badań

Analizowano konstrukcję mostową złożoną z płyty pomostu oraz stalowej kratownicy przestrzennej. Schemat statyczny konstrukcji przedstawiono na rysunku 1. Przyjęto sprężyste połączenie obu części konstrukcji w węzłach pasa dolnego kratownicy. Podłużne krańce płyty zamocowane są w sposób sztywny do przyczółków mostu.



Rys. 1. Schemat statyczny konstrukcji mostowej

Płyta o wymiarach $30\text{ m} \times 6,0\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ wykonana jest z betonu klasy C25/30 (B30) o module Younga $E_b = 2,7 \cdot 10^7\text{ kPa}$ i współczynniku Poissona $\nu_b = 0,167$. Kratownicę przestrzenną stanowią dwie kratownice z profili HEB-300, które połączone są na poziomie pasów górnych za pomocą kształtowników IPE-300 (pręty poprzeczne) i IPE-100 (krzyżulce). Przyjęto moduł Younga stali: $E_s = 2,05 \cdot 10^8\text{ kPa}$, $\nu_s = 0,3$.

Konstrukcja obciążona jest ciężarem własnym oraz ciężarem użytkowym, zadany w postaci układu sześciu sił skupionych, ustawionych w najbardziej niekorzystnym miejscu płyty określonym za pomocą funkcji wpływu. Siły modelują nacisk kół pojazdu na jezdnię. Przyjęto rozstaw kół $1,75\text{ m}$, odległość między tylną i środkową osią $3,5\text{ m}$, a między środkową i przednią $1,5\text{ m}$. Każda siła zewnętrzna ma wartość 60 kN , natomiast siły środkowe po 30 kN .

Wyniki opracowano na podstawie badań numerycznych [5]. Obliczenia przeprowadzono MES, stosując system COSMOS 2003 [6] dla różnych przypadków wzmocnienia płyty. Dokonano dyskretyzacji płyty, stosując prostokątne powłokowe elementy skończone, natomiast w przypadku kratownicy przyjęto elementy prętowe.

Analiza wzmocnienia płyty

Analizie poddano płytę pomostu wzmocnioną dwiema rodzinami prętów stalowych średnicy $d = 0,012\text{ m}$ ułożonych krzyżowo w jednakowej odległości od górnej i dolnej powierzchni płyty. W modelu obliczeniowym żelbet potraktowano jako materiał jednorodny ortotropowy. W obliczeniach wprowadzono zastępczą sztywność żelbetu na rozciąganie wg wzoru:

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

$$E = E_b + E_s \frac{12}{h^2} \frac{\mu}{1 + n\mu} e^2 \quad (1)$$

gdzie:

E_b, E_s – moduły Younga odpowiednio betonu i stali;

μ – objętościowy udział prętów;

e – odległość płaszczyzny rozmieszczenia prętów od płaszczyzny środkowej płyty;

$n = E_s/E_b$.

Przyjęto: $\mu = 0,025$, $e = 0,07$ m i $E = 3,967 \cdot 10^7$ kPa.

Rozważano również płytę betonową ($E_s = 0$).

W celu oceny wpływu zagęszczenia siatki podziału na wyniki, obliczenia przeprowadzono dla trzech różnych podziałów płyty na elementy skończone (tabela 1).

Tabela 1. Porównanie maksymalnych ugięć w_{max} płyty betonowej i żelbetowej

Rodzaj płyty	Maksymalne ugięcie płyty w_{max} [m] podzielonej na elementy skończone		
	I	II	III
Betonowa	-0,01439	-0,01492	-0,01571
Żelbetowa	-0,01263	-0,01294	-0,01233

Zagęszczenie siatki podziału spowodowało, że ugięcie płyty mostowej wzrastało i zbliżało się do kresu górnego, który przyjmuje się jako ugięcie rzeczywiste.

Nośność graniczną rozważanej płyty żelbetowej oceniono wg kryterium statycznego Tsai-Wu:

$$FI = F_{i1}\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j \leq 1 \quad (2)$$

gdzie:

$j = 1, 2, \dots, 6$

σ_i, σ_j – składowe tensora naprężeń;

F_{ij}, F_j – tensory wytrzymałości materiału.

Osiągnięcie równości w zależności (2) oznacza wystąpienie stanu granicznego konstrukcji. W rozważanym przykładzie wskaźnik FI na górnej powierzchni płyty żelbetowej wynosi 0,7179, a na dolnej $FI = -0,6256$. Oznacza to, że konstrukcja mostowa z pomostem żelbetowym może pracować bezpiecznie przy danym obciążeniu.

Analizowano również wzmocnienie płyty betonowej taśmami węglowo-epoksydowymi (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer) grubości 0,0014 m. Moduł sprężystości kompozytu wzdłuż włókien $E_f = 2,8 \cdot 10^8$ kPa, w kierunku poprzecznym $1,08 \cdot 10^7$ kPa, sztywność na ścinanie $7,1 \cdot 10^6$ kPa, natomiast ciężar własny 18 kN/m³. Modelem obliczeniowym była płyta betonowa wzmocniona dołem czterema warstwami węglowo-epoksydowymi. Do obliczeń zastosowano pięciowarstwowe elementy skończone.

Maksymalne wartości ugięcia w_{max} [m] płyty betonowej wzmocnionej krzyżowo

dwiema warstwami kompozytowymi dla trzech sposobów podziału płyty na elementy skończone wynoszą:

- I – -0,01387;
- II – -0,01437;
- III – -0,01509.

Różnica między drugim a trzecim przybliżeniem nie przekracza 5%.

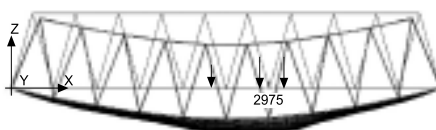
Przeanalizowano następujące warianty podklejenia płyty betonowej czterema warstwami kompozytowymi: cztery warstwy ułożone w kierunku poprzecznym; warstwy ułożone krzyżowo (dwie po dwie) w osiach symetrii geometrycznej; warstwy ułożone naprzemiennie oraz wszystkie warstwy ułożone podłużnie. W tabeli 2 zamieszczono wartości maksymalnych ugięć dla rozpatrywanych przypadków. Najbardziej efektywna okazała się podłużna orientacja warstw, przy której ugięcie płyty zmniejsza się o 25% w porównaniu z płytą betonową niepodklejoną, natomiast naj-

Tabela 2. Maksymalne wartości ugięcia w_{max} dla różnych orientacji wzmocnienia [m]

Maksymalna wartość ugięcia w zależności od orientacji wzmocnienia			
(90°/90°/90°/90°)	(0°/0°/90°/90°)	(0°/90°/0°/90°)	(0°/0°/0°/0°)
-0,0146	-0,01401	-0,01400	-0,01283

mniej korzystna jest orientacja poprzeczna. Wskaźniki Tsai-Wu na powierzchni dolnej ($FI = 3,1948$) oraz na powierzchni górnej ($FI = 8,34035$) warstwy betonowej znacznie przekraczają jeden. Stąd wynika, że rozważana konstrukcja ulegnie zniszczeniu. Maksymalna wartość naprężenia rozciągającego w prętach pasa górnego kratownicy wynosi $\sigma_{max} = -49,286$ MPa i nie przekracza wartości dopuszczalnej $\sigma = 215$ MPa. Maksymalna wartość ($w_{max} = -0,012835$ m) ugięcia występuje w węźle 2975 (rysunek 2) w przypadku płyty betonowej.

W przypadku płyty żelbetowej podklejonej czterema podłużnymi warstwami kompozytowymi maksymalna wartość wskaźnika Tsai-Wu na powierzchni dolnej warstwy żelbetowej wynosi $FI = 0,27195$ oraz $FI = 0,42712$ na powierzchni górnej. Oznacza to, że taka konstrukcja może pracować bezpiecznie. Z porównania naprężeń i przemieszczeń w płycie betonowej i żelbetowej,



Rys. 2. Kształt odkształconej konstrukcji mostowej z płytą warstwową (widok z boku)

jednakowo podklejonych i położonych na takim samym ruszcie złożonym z jednego pręta podłużnego i sześciu poprzecznic, wynika, że maksymalne ugięcie płyty żelbetowej ($w_{max} = -0,01142$ m) jest o 8% mniejsze niż płyty betonowej ($w_{max} = -0,012125$ m), natomiast różnica między wskaźnikami Tsai-Wu jest duża.

Wnioski

■ Podklejenie płyty betonowej poprzecznymi warstwami kompozytowymi zmniejsza wskaźnik Tsai-Wu średnio o ok. 90%, a wzmocnienie takiej płyty od dołu rusztem tylko o 30%. Oba sposoby wzmocnienia nie są efektywne, ponieważ wartość wskaźnika Tsai-Wu w obu przypadkach jest większa od jedności.

■ Wzmocnienie płyty betonowej prętami podłużnymi zmniejsza wskaźnik Tsai-Wu o 90%. Ten sposób wzmocnienia, tj. zamiana płyty betonowej na płytę żelbetową, jest bardzo skuteczny z punktu widzenia oceny nośności granicznej, ponieważ obniża wskaźnik Tsai-Wu do wartości mniejszej od jedności.

■ Podklejenie płyty żelbetowej warstwami kompozytowymi zmniejsza wskaźnik FI o ok. 50%.

■ Dodatkowe wzmocnienie poprzecznymi warstwami kompozytowymi zwiększa wskaźnik FI , ale jest on nadal istotnie mniejszy od jedynki. Przy takim wzmocnieniu warunek bezpieczeństwa jest nadal zachowany, a konstrukcja staje się sztywniejsza.

■ Na podstawie analizy stwierdzono, że najbardziej efektywnym sposobem wzmocnienia płyty żelbetowej jest zastosowanie rusztu z jednoczesnym podklejeniem od dołu podłużnymi warstwami węglowo-epoksydowymi.

Literatura

[1] Łagoda M., Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. Seria Inżynieria Łądowa, Monografia 322. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2005.

[2] Łagoda M., Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi, PAN, Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej IPPT, Warszawa, 2012.

[3] Radomski W., Wzmacnianie betonowych konstrukcji mostowych za pomocą wyrobów z polimerów zbrojonych włóknami, Materiały Budowlane, 4/2005, 76 – 78.

[4] Zobel H., Mostowe pomosty wielowarstwowe z kompozytów polimerowych, Inżynieria i Budownictwo, 11, 2005, 594 – 598.

[5] Kamiński R., Spychalska K., Delyavskyy M., Analiza wpływu wzmocnienia konstrukcji mostowej na jej stan graniczny, ACTA Scientiarum Polonorum, Architektura, 8, (3-4), 2009, 33 – 47.