

dr hab. inż. Arkadiusz Madaj, prof. PP^{1)*}

ORCID: 0000-0002-6617-6290

dr hab. inż. Wojciech Siekierski¹⁾

ORCID: 0000-0002-1363-3574

Identyfikacja przyczyn zarysowania belek zespolonych typu beton-beton na przykładzie dźwigarów głównych mostu extradosed

Identification of causes of cracking of concrete-concrete composite beams by the means of the example of extradosed bridge main girders

DOI: 10.15199/33.2022.10.24

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ czasu realizacji poszczególnych elementów dźwigarów na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji i wartość momentu rysującego, na przykładzie analizy przyczyn zarysowania dźwigarów zespolonych typu beton-beton mostu drogowego extradosed. Wskazano na konieczność uwzględnienia w obliczeniach momentu rysującego takich czynników, jak zmienność w czasie siły sprężającej i zróżnicowanych zmian parametrów fizycznych betonu elementów składowych przekroju zespolonego (wytrzymałości, modułu sprężystości). Podkreślono wpływ podatności zespolenia żebra z płytą nadbetonu na wartość momentu rysującego.

Słowa kluczowe: konstrukcja zespolona beton-beton; moment rysujący; most extradosed.

Abstract. The influence of the execution time of individual elements of main girders on the distribution of internal forces in the structure and the value of the cracking moment was analysed, by the means of the example of an analysis of cracking causes for the concrete-concrete composite girders of an extradosed road bridge. The necessity of taking into account such factors as variability of prestressing force in time and varied changes of concrete physical parameters of the cross-section components (strength, modulus of elasticity) in cracking moment calculations was pointed out. The influence of the flexibility of the connection of a rib-beam and a deck slab on the cracking moment magnitude was emphasized.

Keywords: concrete-concrete composite structure; cracking moment; extradosed bridge.

Jednym ze stanów granicznych użyteczności (SGU), jaki należy uwzględnić w projektowaniu konstrukcji sprężonych, jest stan graniczny zarysowania [1, 2, 3, 4, 5]. W przeważającej liczbie obiektów mostowych, z uwagi na zagrożenia korozją w obecności chlorków, rysy praktycznie nie są dopuszczalne, a dodatkowo obowiązuje tzw. **warunek dekompresji**, tzn. że w przypadku częstej kombinacji obciążeń ciągną sprężające, łącznie z osłoną, muszą znajdować się w strefie ściskanej betonu o wysokości min. 100 mm [5]. Spełnienie tego warunku w przypadku konstrukcji zespolonych typu beton-beton wymaga dokładnej analizy rozkładu naprężeń, w tym zmian schematu statycznego konstrukcji w różnych fazach montażu, a także wpływu efektów reologicznych [3, 6] i zmian w czasie parametrów mechanicznych oraz fizycznych betonu (wy-

trzymałość, moduł sprężystości) poszczególnych składowych przekroju zespolonego. Zagadnienie komplikuje się jeszcze bardziej, jeśli dodatkowo sprężony zostaje przekrój zespolony. O wartości momentu rysującego w omawianym typie konstrukcji decydują również interwały czasowe pomiędzy wykonaniem poszczególnych składowych dźwigara, których wpływ pomiędzy poszczególnymi etapami wykonywania konstrukcji wynika z tego, że cechy fizyczne betonu zmieniają się w czasie. W konsekwencji zmienia się wartość momentu rysującego, nie tylko w zależności od chwili, w której przyłożona została siła sprężająca, ale również od tego, po jakim czasie od wykonania żebra (części pionowej teowego dźwigara) dodano płytę z nim zespoloną (element poziomy).

W betonowych przęsłach sprężonych typu extradosed występuje ponadto przypadek sprężenia zewnętrznego [7, 8, 9], wywołanego przez składową poziomą pochodzącą od cięgien podwieszenia. Wpływ na rozkład naprężeń

ma nie tylko wartość sił w ciągnach podwieszenia, ale także, w istotnym zakresie, czas jaki upływa od chwili wykonania konstrukcji przeszła jako całości do chwili podwieszenia.

W artykule omówiono wpływ wybranych czynników technologii montażu konstrukcji zespolonej beton-beton w przęsłach typu extradosed na stan graniczny zarysowania dźwigarów głównych. Analizę zilustrowano przykładem stanu granicznego zarysowania trójprzęsłowego mostu drogowego.

Etapy obciążenia konstrukcji zespolonych typu beton-beton

Analizie poddano konstrukcję zespoloną, w której do żebra sprężonego dobudowano i zespolono z nim płytę betonową. Przekrój zespolony został dodatkowo sprężony kablami wewnętrznymi oraz zewnętrznymi, tj. kablami podwieszenia przeszł do pylonów (składowe poziome siły od kabli podwieszenia). Nie jest to więc „klasyczna” konstrukcja zespolona typu beton-beton, w której sprężone żebro (często prefabrykowane) zespolone

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

* Adres do korespondencji: arkadiusz.madaj@put.poznan.pl

jest z dodaną płytą, lecz dodatkowo sprężony jest cały dźwigar zespolony.

W mostach zespolonych beton-beton można wyróżnić następujące etapy obciążenia:

- **początkowy** – żebro obciążone jest ciężarem własnym oraz siłą sprężającą o początkowej wartości $P_{m,0}$;

- **prześciowy „1”** – przed zespoleniem żebra z płytą; żebro jest obciążone ciężarem własnym, ciężarem desekowań, ciężarem mieszanki betonowej i oraz siłą sprężającą $P_{m,t1} < P_{m,0}$;

- **prześciowy „2”** – po zespoleniu żebra z płytą pomostu; przekrój zespolony jest obciążony ciężarem własnym oraz siłą sprężającą ($P_{m,t2} < P_{m,t1}$) + $\Delta P_{m,t2}$, gdzie $\Delta P_{m,t2}$, to siła sprężająca przekrój zespolony kablami wewnętrznymi;

- **prześciowy „3”** – po sprężeniu przekroju zespolonego kablami wewnętrznymi; przekrój zespolony jest obciążony ciężarem własnym oraz siłą sprężającą [$(P_{m,t3} < P_{m,t2}) + \Delta P_{m,t2}$] + $\Delta P_{m,t3}$, gdzie $\Delta P_{m,t3}$, to siła sprężająca przekrój zespolony kablami wewnętrznymi – składowe poziome siły w kablach podwieszenia konstrukcji.

W każdym z omawianych etapów zmieniają się: charakterystyka geometryczna przekroju; parametry sprężenia; parametry fizyczne składowych elementów betonowych przekroju oraz obciążenie przekroju. Na rozkład naprężeń, w zakresie sprężystym, w dźwigarze zespolonym w przęsłach mostu extradosed ma również wpływ sposób montażu przęseł, interwały czasowe realizacji poszczególnych etapów sprężania oraz sposób podwieszenia (wartości sił w linach podwieszenia).

Moment rysujący w konstrukcjach zespolonych typu beton-beton

Wartość momentu rysującego w elementcie zespolonym typu beton-beton można obliczyć wg wzoru [1, 3]:

$$M_{cr} = M_{gc} + M_{gn} + [(\sigma_{dc}^p - \Delta\sigma_{dc}) + \lambda f_{ctm}] W_c^I \quad (1)$$

lub

$$M_{cr} = (\sigma_{dc}^p + \lambda f_{ctm}) W_0^I - (M_{gc} + M_{gn}) [(W_0^I / W_c^I) - 1] \quad (2)$$

gdzie:
 M_{cr} – moment rysujący; σ_{dc}^p – naprężenia na krawędzi rozciąganej prefabrykatu od sprężenia; σ_{dc} – naprężenia na krawędzi rozciąganej od obciążenia ciężarem własnym żebra i płyty; M_{gc} – moment od ciężaru żebra; M_{gn} – moment od ciężaru płyty; W_c^I – wskaźnik wytrzymałości przekroju zespolonego, w odniesieniu do analizowanej

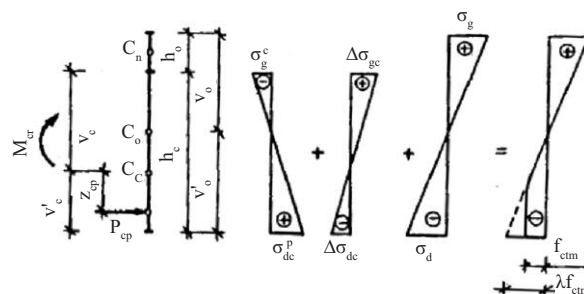
krawędzi rozciąganej przekroju; W_0^I – wskaźnik wytrzymałości żebra, w odniesieniu do analizowanej krawędzi rozciąganej przekroju; f_{ctm} – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie; λ – współczynnik uplastycznienia (przyjmowany z przedziału 1,0 ÷ 2,0; przyjęcie współczynnika $\lambda = 1,0$ [4, 5] oznacza założenie o sprężystej pracy elementu sprężonego w chwili zarysowania).

Z analizy wzoru (2) wynika, że jeżeli założy się, że geometria przekroju jest stała (w tym niezmienny ciężar żebra i płyty zespolonej), to o wartości momentu rysującego decyduje wielkość naprężeń od sprężenia i wytrzymałości betonu na rozciąganie w chwili obciążenia przekroju. Jeżeli przyjmie się, że niezależnie od interwałów czasowych realizacji zespolenia, wytrzymałość betonu na rozciąganie jest taka sama, to jedynym parametrem mającym wpływ na wartość momentu zginającego jest wielkość siły sprężającej w chwili wykonywania płyty zespolonej (wartość naprężeń na krawędzi rozciąganej przekroju żebra), a to zależy od czasu, po jakim od sprężenia konstrukcji nastąpiło zespolenie. Wpływ ma również wskaźnik wytrzymałości przekroju zespolonego W_c^I , który jest funkcją momentu bezwładności. Istotnym czynnikiem mającym wpływ na moment bezwładności przekroju zespolonego jest stopień podatności zespolenia.

Wartość naprężeń od sprężenia na krawędzi rozciąganej zależy w sposób istotny od czasu, jaki upłynął od chwili sprężenia żebra do chwili wykonania płyty zespolonej. Jest to skutek tzw. strat reologicznych sprężania. W skrajnym przypadku straty siły sprężającej mogą sięgać nawet 15% wartości początkowej. W związku z tym, że wartość naprężeń na krawędzi rozciąganej elementu sprężonego ma ścisły związek z wartością siły sprężającej, moment rysujący przekroju zespolonego zależy w sposób istotny od czasu, w którym po wykonaniu żebra została wykonana płyta zespolona. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład naprężeń w przekroju zespolonym.

Zmniejszenie się w czasie wartości momentu rysującego dźwigarów zespolonych typu beton-beton może być skutkiem: zmniejszenia siły sprężającej

w wyniku wystąpienia efektów reologicznych; zmian modułu sprężystości betonu składowych elementów; zmiany momentu bezwładności przekroju jako skutek zmniejszenia stopnia zespolenia (podatności zespolenia).



Oznaczenia: M_{cr} – moment rysujący; h_c – wysokość żebra; h_o – grubość płyty; z_{cp} – mimośród siły sprężającej; P_{cp} – siła sprężająca
Rys. 1. Rozkład naprężeń normalnych w przekroju zespolonym typu beton-beton
 Fig. 1. Normal stress distribution in a concrete-concrete composite section

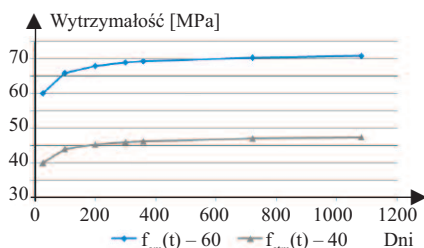
Szywność przekroju zespolonego

W analizie stanu odkształcenia oraz stanu naprężenia konstrukcji zespolonej typu beton-beton, składającej się z elementów wykonanych z materiałów o różnej odkształcalności, przekrój monolityczny jest sprowadzony do przekroju jednorodnego. W procedurze tej wykorzystuje się parametr będący stosunkiem modułów sprężystości poszczególnych materiałów. W konsekwencji, naprężenia w dobetonowanej płycie, obliczone jak w przypadku przekroju jednorodnego, należy skorygować, redukując je proporcjonalnie do stosunku modułów sprężystości E_{cm} żebra i płyty. W związku z tym, że moduł sprężystości zależy nie tylko od wytrzymałości betonu (klasy betonu), ale ulega zmianie w czasie, miara redukcji naprężeń α będzie zależeć od interwału czasowego, jaki upłynął pomiędzy wykonaniem żebra i dodanej płyty betonowej. Możemy ją określić wzorem:

$$\alpha = E_{cm1}(t) / E_{cm2}(t) \quad (3)$$

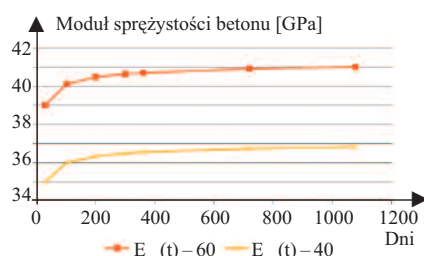
gdzie:
 $E_{cm1}(t)$ – wartość w czasie „t” modułu sprężystości betonu żebra; $E_{cm2}(t)$ – wartość w czasie „t” modułu sprężystości betonu dodanej płyty.

Analiza zmiany modułu sprężystości w czasie wskazuje, że w przypadku „współczesnych” betonów przyrost wytrzymałości betonu wynosi 10 ÷ 15% (rysunek 2), a modułu sprężystości betonu 5 ÷ 6%. (rysunek 3). Zmiany oma-



Rys. 2. Przyrost wytrzymałości betonu w czasie (np. betonu C40/50 i C60/75 – obliczenia wg [4, 5])

Fig. 2. Increase of concrete strength in time (for example concrete C40/50 and C60/75 – calculations according to [4, 5])



Rys. 3. Przyrost modułu sprężystości betonu w czasie (np. betonu C40/50 i C60/75 – obliczenia wg [4, 5])

Fig. 3. Increase of modulus of elasticity of concrete in time (for example concrete C40/50 and C60/75 – calculations according to [4, 5])

wianych parametrów zachodzą w okresie 200 dni od wykonania elementu, a po tym czasie są już niewielkie. W związku z tym można wówczas zaniedbać wpływ zmiany omawianych parametrów na zmianę charakterystyki przekroju zespolonego oraz redystrybucję sił i w konsekwencji wpływ na obliczeniową wartość momentu rysującego.

Wpływ podatności zespolenia na sztywność przekroju

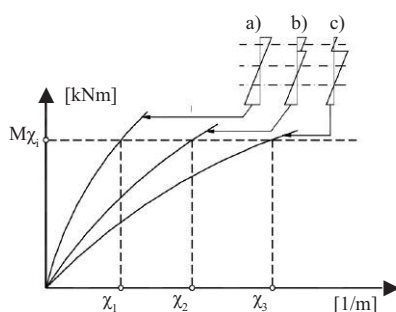
Na wartość momentu rysującego przekroju zespolonego wpływa m.in. podatność zespolenia. Wartość momentu rysującego zależy od sztywności przekroju, na którą ma istotny wpływ podatność zespolenia. Sztywność przekroju zespolonego, z uwzględnieniem podatności zespolenia, można opisać wzorem:

$$B = f(B_p, B_B, \beta) \quad (4)$$

gdzie:

B_p – sztywność żebra („prefabrykat”); B_B – sztywność dobetonowanej płyty; β – parametr (wyrażenie) opisujący stopień współpracy przekroju żebra i płyty nadbetonu, którego miarą może być współodkształcalność.

Wpływ podatności zespolenia na sztywność przekroju pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Zmniejszanie się sztywności przekroju na skutek podatności zespolenia; a) zespolenie niepodatne; b) zespolenie podatne; c) brak zespolenia (χ – krzywizna, M – moment zginający)

Fig. 4 Stiffness decrease of cross-section due to yielding of the shear connectors; a) non-flexible connection; b) flexible connection; c) lack of connection (χ – curvature, M – bending moment)

Parametr β jest wyrażeniem uwzględniającym m.in: stosunek modułu sprężystości betonu żebra i dobetonowanej płyty, geometrię żebra i dobetonowanej płyty oraz proporcje żebra i płyty, a także podatność zespolenia. W przypadku przekroju zespolonego typu beton-beton podatność zespolenia jest funkcją [4] szorstkości stykających się powierzchni (współczynnika tarcia pomiędzy zespolonymi powierzchniami), adhezji oraz sposobu połączenia zespolonych części (przekroju zbrojenia na jednostkę długości w styku zespolenia). W związku z tym, że z czasem zanika wpływ efektów zespolenia wynikających z adhezji i tarcia, sztywność przekroju zmniejsza się i w efekcie mogą pojawić się rysy.

Wpływ montażu na zarysowanie dźwigarów głównych

Kluczowym czynnikiem, który wpływa na rozkład sił wewnętrznych, jest sposób montażu konstrukcji [10]. Dotyczy to kolejności wykonywania poszczególnych składowych części przęseł oraz interwałów czasowych ich realizacji, a także kolejności i stopnia napina-

nia poszczególnych kabli służących do podwieszenia przęseł. Z doświadczenia wynika, że z reguły napinanie cięgien jest dwufazowe: w pierwszej fazie napina się cięgna siłą mniejszą od nominalnej, a w drugiej dokonuje korekty naciągu, by uzyskać projektowany kształt niwelety.

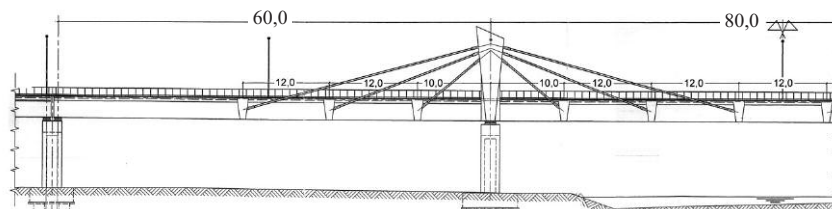
Wpływ sposobu realizacji konstrukcji na rozkład sił wewnętrznych

Dokonano analizy statyczno-wytrzymałościowej trójprzęsełowego mostu extradosed, belkowo-płytkowego, o trzech dźwigarach kablobetonowych, zespolonych typu beton-beton, o rozpiętości teoretycznej przęseł: 60,0 + 80,0 + 60,0 m (rysunki 5 i 6). Przeprowadzono analizę dwóch skrajnych możliwych wariantów montażu, uwzględniając jako kryterium parametr czasu: dobetonowanie płyty po 28 dniach od zabetonowania żebra i po nieskończenie długim czasie od zabetonowania żebra. Żebra (części przekroju poniżej dolnej powierzchni płyty pomostu) wykonano jako prefabrykaty kablobetonowe, a płytę pomostu betonowano „na mokro”, po czym sprężono kablami dźwigary zespolone.

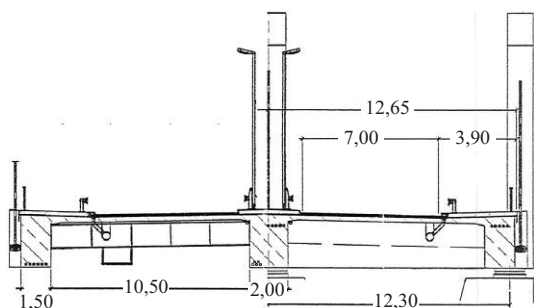
Etapy montażu mostu:

- odcinkowe betonowanie, sprężanie i nasuwanie kolejno trzech żebier, z zastosowaniem podpór montażowych (po jednej w przęsłach skrajnych i dwóch w przęśle środkowym);
- wykonanie poprzecznicy;
- betonowanie płyty pomostu;
- „dopięcie” dźwigarów zespolonych (po zespoleniu);
- naciąg lin extradosed i usunięcie podpór montażowych;
- wykonanie elementów wyposażenia.

Od zakończenia nasuwania analizowanego żebra do wykonania płyty pomostu minęło ok. 250 dni. Przeprowadzono wariantową analizę dźwigara środkowego:



Rys 5. Widok analizowanej konstrukcji mostu (połowa długości)
Fig. 5. Elevation of the analysed bridge structure (half of the length)



Rys. 6. Schemat przekroju poprzecznego analizowanego mostu: w przęśle (po lewej) i nad podporą (po prawej)
 Fig. 6. Scheme of the cross-section of the analysed bridge: in the mid-span (left) and at pier (right)

■ z pominięciem upływu czasu między realizacją żebra i płyty pomostu (wariant A);

■ z uwzględnieniem upływu czasu między realizacją żebra i płyty pomostu (wariant B) – założenie, że pełzanie betonu żebra zakończyło się, przy czym w tym przypadku przeanalizowano:

– stan „krótko” po zakończeniu realizacji elementów wyposażenia, przyjmując, że beton płyty nie podlegał pełzaniu (stan Ba);

– stan „długo” po zakończeniu realizacji elementów wyposażenia, przyjmując, że w betonie płyty pełzanie się zakończyło – pełzanie betonu żebra i be-

tonu płyty zrównało się (stan Bb).
 W analizie statyczno-wytrzymałościowej rozważano oddziaływania zestawione w tabeli. W obliczeniach przyjęto:

- straty siły sprężającej, wywołane efektami reologicznymi w żebrze równe 10%;
- straty siły sprężającej i siły naciągu lin, wywołane pełzaniem betonu płyty, równe 2%;
- odkształcenie od skurczu betonu płyty równe 0,03%.

Wyniki obliczeń zestawiono na rysunkach 7 ÷ 10, na których pokazano zmianę naprężeń normalnych na górnej (sG) i dolnej (sD) krawędzi żebra wzdłuż belki. Na podstawie ich analizy stwierdzono, że:

a) naprężenia obliczone pod warunkiem, że płytę pomostu wykonano w chwili, kiedy w żebrze zakończyły się procesy reologiczne (stan Ba), różnią się od wyników w chwili „ $t = \infty$ ” (stan Bb, pełzanie betonu żebra i płyty zakończone) oraz wyników w wariantcie A (efekty zjawisk reologicznych pominięte);

b) różnice naprężeń normalnych w skrajnych włóknach żebra, w analizo-

wanych wariantach i ich stanach, mogą osiągać znaczne wartości — w przypadku analizowanej konstrukcji nawet ponad 10 MPa;

c) zmiana stopnia zespolenia (zmniejszenie o 20%) powoduje zmianę naprężeń normalnych w betonie żebra, m.in. zmniejszenie naprężeń wywołanych sprężeniem;

d) deformacja wywołana sprężeniem i naciągiem lin extradosed zwiększa się wraz z wyrównywaniem się efektów zjawisk reologicznych w betonie płyty i żebra.

Wnioski z analizy:

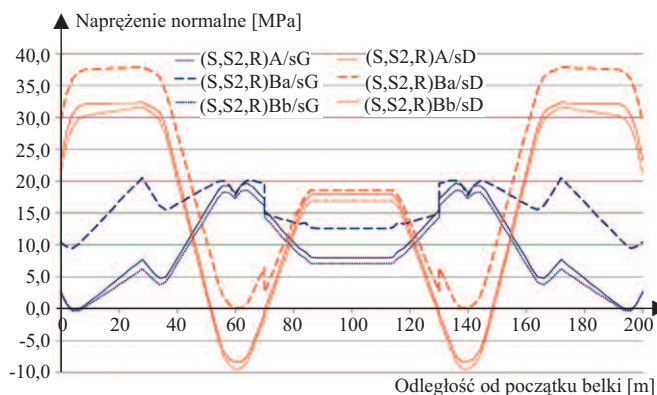
• jeśli przewiduje się etapowanie montażu mostu betonowego, należy przyjąć, że kolejne etapy mogą się opóźnić, co spowoduje nierównomierne pełzanie i skurcz poszczególnych części;

• konsekwencją zróżnicowanego przebiegu zjawisk reologicznych może być okresowa zmiana obliczeniowych charakterystyk geometrycznych przekroju elementów nośnych;

• okresowa zmiana obliczeniowych charakterystyk geometrycznych przekroju elementów nośnych może powodować m.in. zmianę wartości momentu rysującego i deformacji konstrukcji.

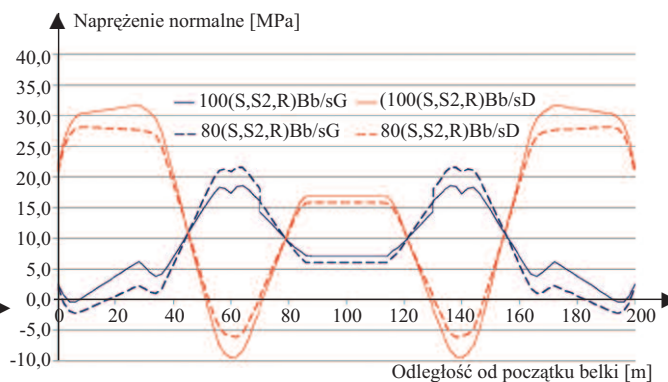
Parametry analizy statyczno-wytrzymałościowej
 The parameters of static-strength analysis

Oddziaływania	Przekrój „czynny”	Uwagi	
Wariant A: po wykonaniu żebier „natychmiastowe” betonowanie płyty, sprężenie i naciąg lin extradosed (zaniedbanie zjawisk reologicznych w betonie)			
A-1: Sprężenie żebra	żebro	siła sprężająca bez strat z tytułu pełzania betonu żebra	
A-2: Obciążenie żebra ciężarem konstrukcji (żebro, poprzecznice stalowe, płyta)		–	
A-3: „Doprężenie” dźwigara zespolonego		dźwigar zespolony, jednorodny (reologia betonu nieuwzględniona, jednakowe obliczeniowe moduły sprężystości żebra i płyty)	siła sprężająca bez strat z tytułu pełzania betonu żebra
A-4: Naciąg lin extradosed, siła bez strat z tytułu pełzania		siła naciągu lin bez strat z tytułu pełzania betonu żebra	
A-5: Usunięcie podpór montażowych (siły reakcji z A-1, A-2 i A-3)		–	
A-6: Ciężar wyposażenia		–	
Wariant B: „Opóźnione” betonowanie płyty (interwał między wykonaniem żebier i płyty – uwzględnienie reologii betonu żebra); bezpośrednio po betonowaniu płyty „doprężenie” ustroju i naciąg lin extradosed			
B-1: Sprężenie żebra	żebro	siła sprężająca ze stratą z tytułu pełzania betonu żebra	
B-2: Obciążenie żebra ciężarem konstrukcji (żebro, poprzecznice stalowe, płyta)		–	
Stan Ba – bezpośrednio po zakończeniu robót (reologia betonu płyty nie wystąpiła)			
Ba-3: „Doprężenie” dźwigara zespolonego	dźwigar zespolony, niejednorodny (zmiana obliczeniowego modułu sprężystości żebra wskutek pełzania)	siła sprężająca bez straty z tytułu pełzania betonu płyty	
Ba-4: Naciąg lin extradosed		siła naciągu lin bez straty z tytułu pełzania betonu płyty	
Ba-5: Usunięcie podpór montażowych (siły reakcji z B-1, B-2 i Ba-3)		–	
Ba-6: Ciężar wyposażenia		–	
Stan Bb – po „kilku” latach od zakończenia robót (reologia betonu żebra i płyty „zrównały się” – obliczeniowo reologia betonu zakończona w obu przypadkach)			
Bb-3: „Doprężenie” dźwigara zespolonego	dźwigar zespolony, jednorodny (zakończony pełzanie betonu płyty i żebra – jednakowe obliczeniowe moduły sprężystości)	siła sprężająca ze stratą z tytułu pełzania betonu płyty	
Bb-4: Naciąg lin extradosed		siła naciągu lin ze stratą z tytułu pełzania betonu płyty	
Bb-5: Usunięcie podpór montażowych (siły reakcji z B-1, B-2 i Bb-3)		–	
Bb-6: Wyposażenie		–	
Bb-7: Skurcz betonu płyty		–	



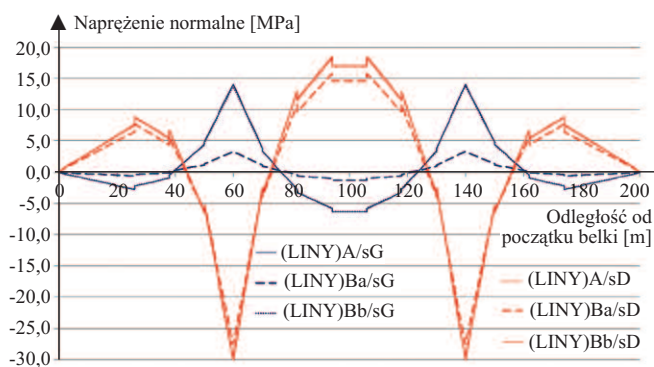
Rys. 7. Naprężenia normalne (dodatnie – ściskające) w skrajnych włókach żebra spowodowane sprężeniem żebra, „doprężeniem” dźwigara zespolonego oraz usunięciem podpór montażowych (opis w tekście)

Fig. 7. Normal stress (positive – compressive) at the rib-beam edge fibres due to initial prestressing of the rib-beam, additional prestressing of the concrete-concrete composite girder and removal of the temporary supports (detailed description in the paper text)



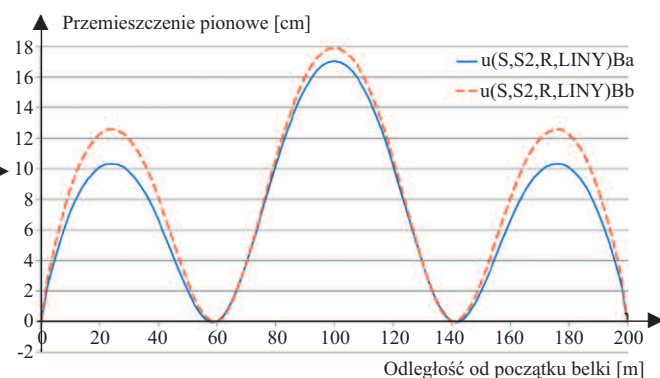
Rys. 9. Naprężenia normalne (dodatnie – ściskające) w skrajnych włókach żebra spowodowane sprężeniem żebra, „doprężeniem” dźwigara zespolonego oraz usunięciem podpór montażowych z uwzględnieniem pełnego (100%) i częściowego (80%) zespolenia żebra i płyty

Fig. 9. Normal stresses (positive – compressive) at the rib-beam edge fibres due to initial prestressing of the rib-beam, additional prestressing of the concrete-concrete composite girder and removal of the temporary supports, taking into account the full (100%) and partial (80%) connection of the rib-beam and deck slab



Rys. 8. Naprężenia normalne (dodatnie – ściskające) w skrajnych włókach żebra spowodowane naciągnięciem lin extradosed (opis w tekście)

Fig. 8. Normal stress (positive – compressive) in extreme rib fibres due to prestressing of extradosed cables (detailed description in the paper text)



Rys. 10. Przemieszczenie pionowe analizowanego dźwigara spowodowane sprężeniem (dodatnie – w górę)

Fig. 10. Vertical displacement of the analysed girder due to prestressing (positive – upwards)

Podsumowanie

Nasze doświadczenia wskazują, że pojawia się problem ze spełnieniem wymagań stanu granicznego zarysowania przeseł mostów po kilku latach eksploatacji. Zagroza to trwałości konstrukcji. Przedstawiona analiza wskazuje na złożoność zagadnienia obliczenia momentu rysującego w dźwigarach sprężonych. Wskazano podstawowe czynniki, jakie należy uwzględnić przy analizie stanu zarysowania konstrukcji zespolonych typu beton-beton. W obliczeniach konieczne jest uwzględnienie interwałów czasowych wykonywania poszczególnych elementów konstrukcji. Należy również zwrócić uwagę na redystrybucję sił wewnętrznych nie tylko w przekroju, ale również na całej długości przeseł. W przypadku, gdy obiekt nie jest realizowany w interwałach

czasowych przewidzianych w projekcie, to konieczna jest weryfikacja obliczeń. Naszym zdaniem jedną z przyczyn zarysowania wskazanej konstrukcji było nieuwzględnienie zmiany interwałów czasowych realizacji poszczególnych fragmentów przeseł, w tym kolejności napięcia kabli podwieszenia (want).

Zarysowania przekrojów zespolonych typu beton-beton, realizowanych w technologii betonu sprężonego, mogą ujawnić się dopiero po kilku latach eksploatacji.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A, Mames J. Betonowe konstrukcje sprężone. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej; 2001.
- [2] Ajdukiewicz A, Mames J. Konstrukcje sprężone. Warszawa: Arkady; 1984.
- [3] Madaj A, Wołowicki W. Projektowanie mostów betonowych. Warszawa: WKŁ; 2010.

[4] PN-EN 1992-1-1:2004. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[5] PN-EN 1992-2:2005. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczenia i reguły konstrukcyjne.

[6] Madaj A, Siekierni W. Analysis of effects of shrinkage of concrete added to widen RC girder bridge. Computers and Concrete. 2019; <https://doi.org/10.12989/cac.2019.23.5.329>

[7] Biliczek J. Mosty podwieszane. Warszawa: Arkady; 2005.

[8] Trochymiak W. Mosty sprężano-podwieszane. Inżynieria i Budownictwo. 2004; 60: 485-492.

[9] Trochymiak W. Mosty betonowe z naprężonymi cięganiami – ewolucja form konstrukcyjnych i zasad obliczania. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2012.

[10] Praca zbiorowa. Podstawy projektowania konstrukcji żelbetonowych według Eurokodu 2. Sekcja konstrukcji betonowych KILiW PAN. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne; 2006.

Przyjęto do druku: 13.06.2022 r.