

dr inż. Michał Betlej¹⁾

ORCID: 0000-0001-7631-0134

dr inż. Henryk Ciurej^{1)*}

ORCID: 0000-0003-4017-6185

dr inż. Piotr Gwoździwicz²⁾

ORCID: 0000-0002-8161-3612

Analiza lokalnej pracy zarysowanego naroża płyty sprężonego obiektu mostowego w dużym skosie w aspekcie wpływu obciążeń eksploatacyjnych

Local analysis of the cracked sharp corner of the prestressed bridge structure in terms of the service loads

DOI: 10.15199/33.2022.10.26

Streszczenie. Przedmiotem analizy jest nietypowy rzeczywisty obiekt mostowy płytowo-belkowy sprężony w skosie ok. 40°. Po sprężeniu dźwigarów zauważono istnienie pęknięcia w obrębie kątów ostrych na górnej i dolnej powierzchni płyty pomostu. W artykule przedstawiono wyniki analizy lokalnej pracy zarysowanych naroży w rejonie kąta ostrego płyty w aspekcie wpływu obciążeń użytkowych na istniejący stan zarysowań. Opracowano model przestrzenny MES, bazujący w całości na elementach objętościowych. Siatki zbrojenia odwzorowano w postaci płaskich membran o zastępczych właściwościach anizotropowych. Zastosowano obliczenia nieliniowe fizycznie i geometrycznie z modelem pęknięcia betonu. Odtworzono proces i sekwencję sprężania kablami oraz przykładanie pozostałych obciążeń: stałych i użytkowych w trzech ustawieniach. Na każdym etapie obserwowano stan naprężeń i pęknięcia w płycie. Sformułowano wniosek, że rysy powstałe wskutek niewłaściwego wprowadzenia sprężenia zamykają się pod wpływem obciążeń stałych i użytkowych.

Słowa kluczowe: analiza pęknięcia; mosty sprężone; most w dużym skosie; pęknięcie betonu; pomosty żelbetowe.

Abstract. The subject of the analysis is a real bridge deck composed of beams and slab with an unusual geometry, where support angle is at approx. 40°. After the girders were prestressed, the cracks within the sharp angles were noticed on the upper and lower surfaces of the deck. The aim of this article is to present the result of a local analysis of the sharp angle of the deck in the aspect of the impact of operating loads on the existing state of cracks. A FEM model was developed, based entirely on volume elements. Nonlinear analysis were used with the concrete crack model. The process and sequence of prestressing and the application of the remaining loads is considered. On each of them, a state of stress and cracking in the deck was observed. It was concluded that cracks resulting from improper introduction of prestress are closing under the influence of permanent and service loads.

Keywords: cracking analysis; prestressed bridges; large skew bridge; concrete cracking; reinforced concrete deck.

Przedmiotem analizy jest rzeczywisty obiekt mostowy płytowo-belkowy sprężony, w którym osie podpór z osią obiektu tworzą kąt ok. 40°. Podczas prac budowlanych, na etapie po sprężeniu dźwigarów, zauważono zarysowanie i pęknięcie w obrębie kątów ostrych na górnej i dolnej powierzchni płyty pomostu tego obiektu. Powstała zatem wątpliwość, czy stan ten nie powoduje istotnej utraty nośności płyty pomostu. Ze względu na duży skos obiektu należy uznać układ

nośny za nietypowy i wymagający szczególnej uwagi na etapie projektowania i wykonawstwa, a szczególnie sprężania.

W artykule zaprezentowano analizę lokalnej pracy zarysowanych naroży w rejonie kąta ostrego płyty pomostu obiektu w aspekcie wpływu obciążeń eksploatacyjnych (użytkowych) na istniejący stan zarysowań. Pęknięcia i rysy w obrębie elementów żelbetowych (płyt pomostowych, wsporników chodnikowych) na etapie sprężenia dźwigarów nośnych są zjawiskiem znanym w przypadku mostów sprężonych o dużym skosie. Pojawienie się tego rodzaju uszkodzeń w części żelbetowej konstrukcji wymaga naprawy, po której

przywraca się ciągłość zarysowanych elementów. W takich przypadkach elementy sprężone, czyli dźwigary główne, nie wykazują na ogół uszkodzeń.

Przyczyny pojawienia się tak zlokalizowanych rys są zwykle złożone i stanowią kumulację kilku czynników, do których należą m.in.: niewłaściwa kolejność sprężania poszczególnymi kablami; niekorzystnie ułożone zbrojenie. Pierwszy wymieniony czynnik ma zwykle duże znaczenie, dlatego też bardzo ważne jest prawidłowe opracowanie projektu sprężania (sekwencja wprowadzanych sił, ich wielkość oraz synchronizacja jednoczesnego naciągu kablów w dźwigarach) oraz nadzoru i obserwacji konstrukcji podczas tego procesu.

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

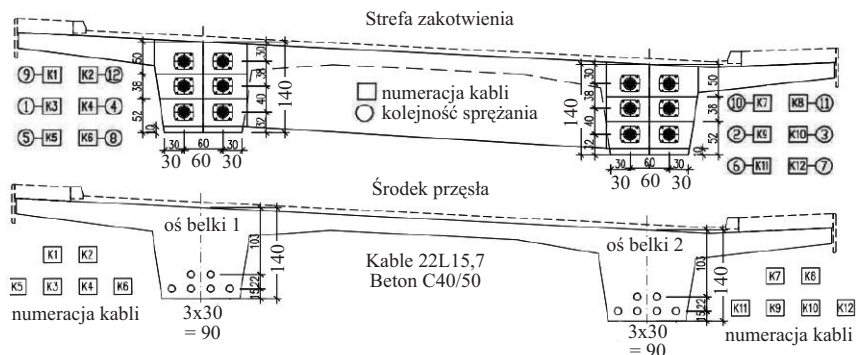
²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*} Adres do korespondencji: hciurej@agh.edu.pl

Należy też podkreślić, że stosowane standardowe obliczenia projektowe konstrukcji sprężonych na modelach belkowych, rusztowych lub/i płytowych mogą nie wykazać ryzyka powstania opisywanych uszkodzeń. Wymienione modele, powszechnie akceptowalne w praktyce projektowej, bazują bowiem na uproszczeniach, których skutkiem jest najczęściej brak możliwości wykrycia lokalnych zarysowań wynikających z pracy elementów pod złożonym obciążeniem. Prezentowany w artykule model przestrzenny MES, na bazie elementów objętościowych, pozwala analizować zjawiska lokalne znacznie dokładniej niż standardowe modele belkowe lub/i płytowe.

Ogólna charakterystyka przedmiotowego obiektu i uszkodzeń

Przedmiotem analizy jest obiekt mostowy jednoprzęsłowy płytowo-belkowy sprężony podłużnie (rysunki 1, 2, 3). Każdy dźwigar o przekroju trapezowym sprężono sześcioma kablami 22L15.7. Teoretyczny kąt skrzyżowania osi przęsła z osią podpór wynosi ok. 40°. Podstawowe wymiary obiektu pokazano na rysunkach 1 i 2. Jego długość w osi



Rys. 3. Układ kabli sprężających oraz kolejność sprężania

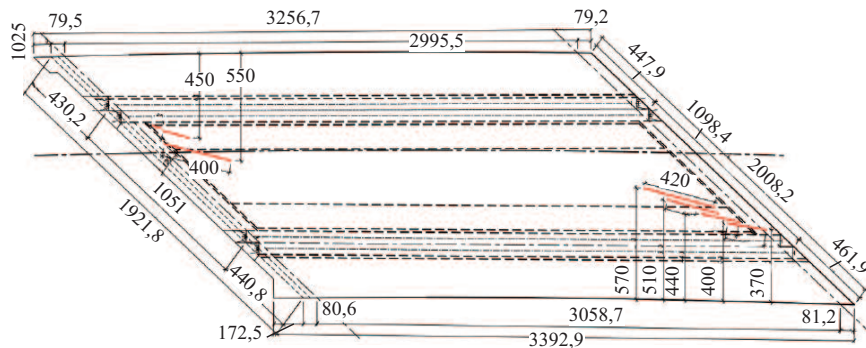
Fig. 3. Cable arrangement and tensioning order/sequence

podparć wynosi 30,6 m, a szerokość całkowita 12,6 m. Wprowadzane siły w zakotwieniach oraz kolejność sprężania poszczególnych kabli zestawiono w tabeli. Wszystkie kable mają identyczne parametry mechaniczne.

Kable sprężano pojedynczo i wg projektu sprężania jednocześnie z obu stron dźwigara. Zaobserwowane pęknięcia i zarysowania powstały w fazie budowy obiektu po sprężeniu i demontażu deskowania, a przed jakimkolwiek obciążeniem dodatkowymi elementami wyposażenia, nawierzchnią i przede wszystkim przed obciążeniem użytkowym. Tak więc powstanie zarysowań musiało mieć związek z obciążeniami od sprężenia.

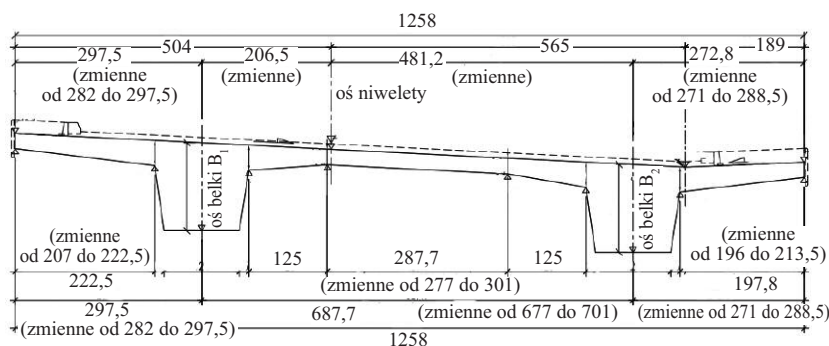
Kolejność sprężania kabli i siła sprężająca
The order of prestressing of cables and prestressing force

Lp.	Symbol kabla	Dźwigar (belka)	Siła sprężająca kN
1	K3	1	4910
2	K9	2	4895
3	K10	2	4880
4	K4	1	4865
5	K5	1	4851
6	K11	2	4835
7	K12	2	4821
8	K6	1	4805
9	K1	1	4791
10	K7	2	4775
11	K8	2	4761
12	K2	1	4745



Rys. 1. Most – rzut z góry

Fig. 1. The bridge – top view



Rys. 2. Przekrój poprzeczny mostu

Fig. 2. Cross-section of the bridge

Pierwsze obserwacje rysy płyty pomostu pojawiły się w rejonach ostrych naroży ok. dwóch tygodni po sprężeniu. Zarysowania te określono jako „nie-wielkie” rysy nieprzenikające na wskroś płyty. Po ok. miesiącu po sprężeniu zaobserwowano, że wcześniejsze rysy przebiegają już na wskroś płyty, a po okresie półtora miesiąca po sprężeniu dokonano pierwszej inwentaryzacji rys i pęknięć. Zaobserwowano wówczas, że niektóre pęknięcia mają maksymalną rozwarłość ok. 1,2 mm. Zasięg i długość głównych obserwowanych pęknięć pokazuje rysunek 1 – długość wynosi maksymalnie ok. 8 m, licząc od naroża ostrego przy osi nr 2. Fakt narastania szerokości rys/pęknięć jest spójny z obserwowanym przyrostem przemieszczeń pionowych po sprężeniu w czasie, co jest związane z procesami reologicznymi oraz zjawiskami skurczowymi w betonie. Z dokumentacji geodezyjnej wynika, że dzień po sprężeniu dźwigary „uniosły się” w strefie środków rozpię-

tości o ok. 33 mm, natomiast 30 dni po sprężeniu stwierdzono niewielki przrost przemieszczeń – środki rozpiętości dźwigarów „unosły się” w tym czasie o dodatkowe $6 \div 7$ mm.

Zaobserwowane podobieństwo morfologii, lokalizacji oraz rozwartości rys i pęknięć w obrębie obu ostrych naroży obiektu wskazuje na identyczny mechanizm i przyczynę ich powstania. Po demontażu deskowań, w stanie już obserwowanego zarysowania, na beton konstrukcji działają wyłącznie następujące obciążenia zewnętrzne:

- grawitacja przyłożona w całej objętości betonu;
- reakcje pionowe przyłożone lokalnie w łożyskach;
- parcie kabli w kanałach kablowych;
- siły sprężające w zakotwieniach.

Z punktu widzenia mechanicznego obiekt przed sprężeniem nie przenosi obciążeń – obciążenie grawitacyjne jest zrównoważone przez odpór deskowania i rusztowań. Można więc przyjąć, że poza naprężeniami termiczno-skurczowymi objętość betonu jest wolna od istotnych naprężeń. Sekwencyjne wprowadzanie sprężenia w kable powoduje istotne naprężenia w objętości betonu z jednoczesną zmianą natury istniejącego pierwotnie stanu równowagi – oddziaływanie kabli „unoszą” konstrukcję, odciażając rusztowania. Obciążenie grawitacyjne jest więc stopniowo zrównoważone jedynie przez pionowe reakcje w łożyskach wskutek zmniejszającego się odporu deskowania. Ostatecznie sprężenie doprowadza do konfiguracji równowagi z jednoczesną zmianą warunków podparcia innej niż pierwotna (po zabetonowaniu).

W związku z tym, że rysa pojawia się w betonie po przekroczeniu granicznych naprężeń rozciągających o kierunku prostopadłym do rysy, wprowadzone sprężenie musiało skutkować powstaniem, w rejonie kąta ostrego pomiędzy poprzeczną a dźwigarem, rozległego obszaru naprężeń rozciągających na wskroś grubości płyty o kierunku prostopadłym do rysy. Pojawienie się pęknięć (czyli zwolnienie więzów wewnętrznych) oznaczało jednocześnie redystrybucję naprężeń.

Model numeryczny

Uwagi ogólne. Model numeryczny opracowano na podstawie dokumentacji wykonawczej. Zastosowano metodę elementów skończonych w wersji przemieszczeniowej – program Lusas FEA [1]. Przedmiotową konstrukcję zamodelowano w całości, odtwarzając objętość betonu za pomocą elementów typu *3DBrick*. Siatki zbrojenia odwzorowano w postaci płaskich membran o zastępczych właściwościach anizotropowych, wynikających z zastosowanych prętów zbrojeniowych, ich średnic, rozstawu oraz wzajemnego kąta ułożenia [2, 3]. Membrany rozmieszczono w betonie w ich fizycznym położeniu odpowiadającym zastępczej powierzchni środkowej poszczególnych siatek zbrojeniowych z uwzględnieniem otuliny. Odwzorowano warunki podparcia: 1° deskowaniem (więzy jednostronne) w fazie sprężania oraz 2° podparcia na powierzchniach łożysk po sprężeniu.

W pierwszej kolejności odtworzono geometrię przedmiotowego obiektu, a przede wszystkim: podział geometrii obiektu na płyty, wsporniki, poprzecznice, dźwigary sprężone; geometrie objętości przypowierzchniowych w celu lokalizacji siatek zbrojeniowych; powierzchnie podparcia łożyskami oraz powierzchnie zakotwień kabli sprężających; trasy ciągów sprężających w objętości dźwigarów nośnych. Sprężenie zamodelowano jako obciążenie zastępcze wynikające z oddziaływania kabla na beton w zakotwieniach oraz na jego długości z uwzględnieniem strat siły sprężającej. Wprowadzanie sił w kablach odtworzono jako sekwencyjne narastanie sił w poszczególnych kablach do ich nominalnych wartości uzyskanych z dokumentacji sprężania.

Opracowany model MES analizowano w zakresie fizycznie nieliniowym w obszarze zarysowania kąta ostrego przy osi nr 2. W pozostałych obszarach materiał określono jako liniowo-sprężysty. Jest to usprawiedliwione faktem, że zaobserwowane podobieństwo morfologii, lokalizacji oraz rozwartości rys i pęknięć w obrębie obu osi podparcia obiektu wskazuje na identyczny mechanizm i przyczynę ich powstania. Z tego powodu zagęszczenie siatki MES zróżnicowano: w obszarze z rysami przy osi

nr 2 siatkę zagęszczono, natomiast w pozostałych obszarach modelu zastosowano siatkę zgrubną. Jest to związane również z tym, iż w obszarach zagęszczonej siatki zdefiniowano nieliniowe właściwości betonu z uwzględnieniem pęknięcia [1, 4, 5].

Analizę prowadzono również w zakresie nieliniowym geometrycznie ze względu na istnienie więzów jednostronnych (deskowania). W pierwszym etapie analizowano efekty wprowadzenia sprężenia i morfologię zarysowań. W drugim etapie na tak zarysowany model wprowadzono pozostałe obciążenia stałe oraz w formie wariantowej najbardziej niekorzystne ustawienia obciążeń użytkowych (eksploatacyjnych), reprezentowanych przez pojazd K, w celu obserwacji zachowania się rys. Istotą opracowanego modelu jest uzyskanie wyników nieliniowej pracy materiału w strefach popękanych płyty.

W odniesieniu do modeli pęknięcia przywołanych w cytowanej literaturze, a wykorzystanych w analizie, należy wyjaśnić, że są to tzw. **modele rys rozmytych**. Istotą tego podejścia jest ujęcie rysy jako osłabienia materiału, a nie efektu geometrycznego (jak się to dzieje w rzeczywistości) polegającego w istocie na zmianie geometrii ciała na skutek pojawienia się dodatkowej powierzchni swobodnej wewnątrz materiału – w rysie rzeczywistej, na jej wierzchołku, dochodzi do silnej kumulacji naprężeń. Skutkiem tego jest obserwowana propagacja rysy od wierzchołka. W modelu rys rozmytych morfologia zarysowań ma obraz powierzchniowy/objętościowy (rozmyty) i zależy od sposobu modelowania zbrojenia (pręty dyskretne lub siatki zbrojeniowe), a ponadto dokładność odwzorowania topografii pęknięć związana jest z zagęszczeniem siatki elementów skończonych modelu numerycznego. Pojawienie się rysy w tym modelu jest uzależnione przede wszystkim od poziomu naprężeń rozciągających w elemencie (w punkcie całkowania), energii pęknięcia i wytrzymałości materiału na rozciąganie.

Odrębnego wyjaśnienia wymaga pojęcie użyte w dalszej części artykułu, tj. **miary rozwartości rys** (wielkość bezwymiarowa). Jest ono powiązane

z modelem rys rozmytych [4, 5]. W przypadku modelowania zbrojenia prętami dyskretnymi, tj. pojedynczymi prętami jak w rzeczywistej konstrukcji, na podstawie tej miary i odkształceń w zbrojeniu można obliczyć rzeczywistą rozwartość rysy. Natomiast gdy zbrojenie modeluje się jako zastępcze siatki o właściwościach powierzchniowych (membrany anizotropowe), wówczas obliczenie rzeczywistego rozwarcia jest kłopotliwe, ale, co najważniejsze, szerokość rozwarcia rysy pozostaje proporcjonalna do użytej miary rozwartości rys. Jeśli więc rozważa się jedynie zmniejszenie lub zwiększenie rozwartości rys, jak w omawianej analizie, wówczas operowanie miarą rozwartości rys jest usprawiedliwione i wystarczające.

Materiały. Właściwości materiałów określono na podstawie dostępnych danych. Przyjęto wartości charakterystyczne ze względu na zasadniczy cel, tj. ewolucję rys i pęknięć w objętości betonu płyty [6]. A oto charakterystyka materiałów:

1) stal zbrojeniowa AIIIIN – model liniowo-sprężysty o następujących parametrach: wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie przy klasie ciągliwości C $f_{yk} = 500$ MPa; moduł Younga $E_s = 205$ GPa; współczynnik Poissona $\nu_s = 0,3$; otulina $t_s = 30$ mm;

2) stal sprężająca – model liniowo-sprężysty o następujących parametrach: kable typu 22L15,7; pole powierzchni $A_p = 3300$ mm²; współczynnik tarcia $\mu = 0,2$; poślizg kabla w zakotwieniu czynnym $a = 6$ mm; niezamierzony kąt falowania trasy $k = 0,005$ rad/m; charakterystyczna siła zrywająca $P_{vk} = 6138$ kN; wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie $f_{pk} = 1860$ MPa; moduł Younga $E_p = 195$ GPa;

3) beton konstrukcyjny C40/50 – model nieliniowy (Smoothed Multi-Crack model 109 [1]): moduł sprężystości liniowej $E_b = 39$ GPa (w fazie sprężania przyjęto $E_b = 30$ GPa); współczynnik Poissona $\nu_b = 0,2$; jednoosiowa wytrzymałość na rozciąganie $f_{tk} = 3,6$ MPa; jednoosiowa wytrzymałość na ściskanie $f_{ck} = 48,0$ MPa; współczynnik dwuosowego i jednoosiowego stanu naprężenia $\eta_b = 1,15$; energia pęknięcia $G_f = 126,4$ J/m²; kąt dylatacji $\psi_f = -0,1$.

Kinematyczne warunki brzegowe.

Pionową sprężystość wszystkich łożysk zamodelowano jako sprężystość powierzchniową $k_{vb} = 27,8$ GPa/m, a podatność poprzeczną łożyska stałego i jednokierunkowo przesuwnego na kierunku blokady przyjęto o wartości $k_{hb} = 0,1 k_{vb}$. Łożyska na kierunkach swych przesuwnów mają swobodę ruchu. Podparcie deskowaniami traktowano jako podpory jednostronne sprężyste (wyłącznie możliwe unoszenie) o sprężystości powierzchniowej pionowej $k_{vd} = 0,01 k_{vb}$, które są usuwane po sprężeniu.

Obciążenia. Rozważano następujące obciążenia w kolejności przykładania:

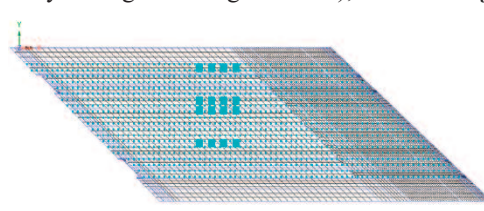
1) ciężarem własnym – związane jedynie z ciężarem „czystej” konstrukcji przed sprężeniem;

2) sprężenie kabli łącznie z odwzorowaniem procesu sprężenia (sekwencja naciągów) – aktywowane po grawitacji (tabela 1). W analizie uwzględniono straty doraźne, narastające wraz z naciągami kolejnych kabli oraz opóźnione (reologia) występujące w dalszym okresie po sprężeniu;

3) stałe od wyposażenia – aktywowane dwa miesiące po sprężeniu;

4) użytkowe (eksploatacyjne) pojazdem $K = 800$ kN w przypadku obiektu mostowego klasy A [7, 8] w trzech ustawieniach (konfiguracjach), liczonych oddzielnie i aktywowanych każdorazowo po przyłożeniu „wcześniejszych” obciążeń 1-3 (globalny współczynnik dynamiczny $\psi = 1,2$).

Ustawienie 1: pojazd $K + 0,3 K + q$ ustawiony nad środkiem dźwigara nr 1 (rysunek 4) – ustawienie to reprezentuje obciążenia eksploatacyjne wywołujące maksymalne wyężenie belki nr 1 z towarzyszącym obciążeniem powierzchniowym jezdni $q = 4$ kPa (zastosowany wariant obciążenia wynika z wymagań Projektu Funkcjonalno-Użytkowego PFU tego obiektu);



Rys. 4. Ustawienie 1, pojazd $K + 0,3 K + q$ ustawiony nad środkiem dźwigara nr 1

Fig. 4. Load setting No 1, vehicle $K+0,3K+q$ at midspan of the girder No. 1

Ustawienie 2: pojazd K (bez obciążenia q), ustawiony nad środkiem krótkiej przekątnej mostu (rysunek 5) – ustawienie to reprezentuje obciążenia eksploatacyjne wywołujące maksymalne zgięcie płyty na środku obiektu.



Rys. 5. Ustawienie 2, pojazd K ustawiony nad środkiem krótkiej przekątnej mostu

Fig. 5. Load setting No 2, vehicle K at midspan of the short diagonal of the bridge

Ustawienie 3: pojazd K (bez obciążenia q), ustawiony nad obszarem zarysowania płyty przy ostrym narożu osi 2 (rysunek 6) w celu względnie dużego wyężenia tego obszaru.



Rys. 6. Ustawienie 3, pojazd K nad obszarem zarysowania płyty w narożu ostrokatnym osi nr 2

Fig. 6. Load setting No 3, vehicle K above the plate cracked area in the acute corner of axis No 2

Przyjęto wartości charakterystyczne obciążeń ze względu na cel analizy, tj. analizę wielkości dotyczących stanu użytkowania, a nie nośności. W związku z przyrostowym charakterem rozwiązywanego zagadnienia nieliniowego, zdefiniowano krzywe przyrostu poszczególnych obciążeń z odwzorowaniem sekwencji ich aktywacji.

Sposób rozwiązania zadania.

Z uwagi na nieliniowy charakter analizowanych zjawisk, tj. nieliniowy model betonu wraz z pękaniem, zastosowano **algorytmu analizy fizycznie nieliniowej** – klasyczny algorytm Newtona-Raphsona [1] z automatycznym krokiem przyrostu obciążeń, wg zadanych krzywych obciążeń. Użyto zalecanych, w przypadku zadań nieliniowych z pękaniem betonu, wartości błędów w przemieszczeniach i siłach rezydualnych jako kryteriów zbieżności iteracyjnego algorytmu poszukiwania stanu równowagi. Oznacza to także, że

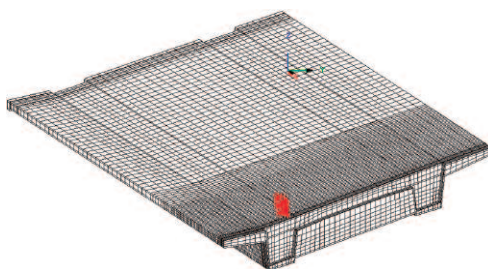
na etapie obciążenia poszczególnymi składowymi należało zdefiniować krzywe ich przyrostu, które jednoznacznie określają m.in. sekwencję i sposób narastania/zmniejszania wartości zdefiniowanych obciążeń.

Wyniki analizy

Obciążenie ciężarem własnym oraz sprężeniem kablami K3-K9-K10-K4-K5-K11-K12-K6. Pierwszym analizowanym stanem jest obciążenie ciężarem własnym konstrukcji, gdy pozostaje ona w deskowaniu. W tej sytuacji nie występują znaczne naprężenia na skutek istnienia odporu deskowań na całej powierzchni podparcia. Jako pierwsze sprężano sekwencyjnie: kabel K3 w belce nr 1, a następnie kable K9 i K10 w belce nr 2, po czym kabel K4 w belce nr 1. Na tym etapie sprężenia nie zaobserwowano „unoszenia się” konstrukcji z deskowań. W symulacji nie obserwuje się również istotnych naprężeń rozciągających lub ściskających. Po sprężeniu kablem K5 w belce nr 1 stwierdzono niesymetryczne uniesienie się dźwigara nr 1 do ok. 6 mm, a po sprężeniu kablem K6 symetryczne uniesienie obu dźwigarów do ok. 20 mm. Natomiast po sprężeniu kablem K11 zaobserwowano w belce nr 2 symetryczne uniesienie obu dźwigarów do ok. 8 mm, a po sprężeniu kablem K12 niesymetryczne uniesienie dźwigara nr 2 do ok. 12 mm.

Na rozważanych etapach sprężania nie występują pęknięcia płyty w modelu obliczeniowym, ale obserwuje się stopniowe powiększanie stref głównych naprężeń rozciągających, ale są one mniejsze od f_{tk} .

Sprężenie kablami K1-K7-K8-K2. Sekwencyjne sprężanie kolejnymi kablami K1-K7-K8-K2 prowadzi do inicjacji pęknięcia w ostrych narożach, dlatego też omówiono je odrębnie. Po sprężeniu kablem K1 w belce nr 1 obserwuje się niesymetryczne uniesienie obu dźwigarów – belka nr 1 unosi się do ok. 22 mm. W płycie zostają przekroczone maksymalne naprężenia rozciągające σ_1 powyżej f_{tk} w narożu ostrokątnym belki nr 2 i osi nr 2, przez co następuje zarysowanie płyty (rysunek 7). Poza tymi rejonami nie wystąpiły istotne naprężenia rozciągające.



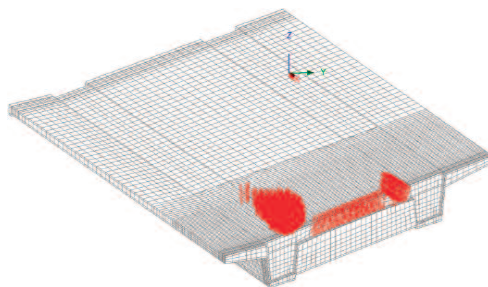
Rys. 7. Zarysowanie płyty po sprężeniu kablem K1 w narożu ostrokątnym belki nr 2 i osi nr 2

Fig. 7. Slab crack pattern after tensioning of cable K1 in the acute corner of beam No 2 and axis No 2

Po sprężeniu kablem K7 w belce nr 2 obserwuje się symetryczne uniesienie obu dźwigarów do ok. 30 mm. W płycie pojawia się powierzchniowy obszar naprężeń głównych σ_1 powyżej f_{tk} w rejonie kąta ostrego osi 1 i dźwigara 1 oraz zarysowania analogicznie jak na rysunku 7. Obszar zarysowania w rejonie kąta ostrego belki nr 2 i osi nr 2 (rysunek 7) pozostaje bez zmian.

Po sprężeniu kablem K8 w belce nr 2 obserwuje się niesymetryczne uniesienie obu dźwigarów – belka nr 2 unosi się do ok. 33 mm. W płycie powierzchniowe obszary naprężeń głównych σ_1 powyżej f_{tk} w rejonie kątów ostrych pozostają bez zmian. Obszary zarysowania pozostają także bez zmian.

Po sprężeniu ostatnim kablem K2 w belce nr 1 obserwuje się niesymetryczne uniesienie obu dźwigarów – belka nr 1 unosi się do ok. 35 mm. W płycie powiększa się powierzchniowy obszar naprężeń głównych σ_1 powyżej f_{tk} w rejonie kąta ostrego osi 2 i dźwigara 2 oraz inicjują się pęknięcia płyty w rejonie kąta rozwartego (rysunek 8). Znacznie zwiększa

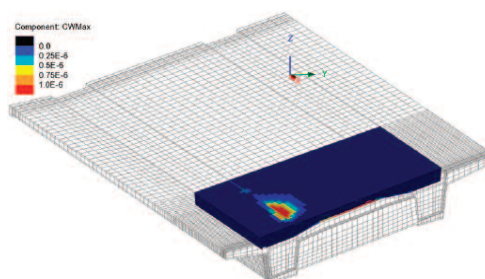


Rys. 8. Zarysowanie płyty po sprężeniu kablem K2 przy osi nr 2

Fig. 8. Slab crack pattern after tensioning of cable K2 in the acute corner of beam No 2 and axis No 2

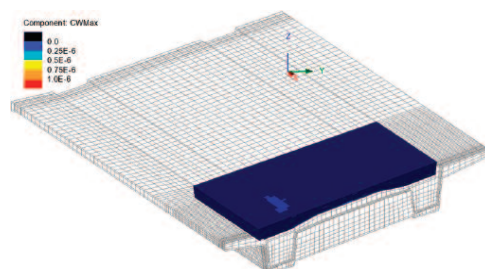
się miara szerokości rozwarcia rys na powierzchni płyty w rejonie kąta ostrego osi 2 i dźwigara 2, pokazana na rysunku 9.

Obciążenie stałe od wyposażenia. Po przyłożeniu obciążeń stałych od wyposażenia uniesienie pionowe dźwigarów zmniejszyło się symetrycznie do ok. 25 mm. W płycie obserwuje się istotne zmniejszenie obszarów rozciągających naprężeń głównych σ_1 powyżej f_{tk} . Obszary pęknięć nie ulegają zmianie, lecz miara szerokości rozwarcia rys w płycie pokazana na rysunku 9 znacznie się zmniejsza, czyli się zamka (rysunek 10).



Rys. 9. Miara rozwartości rys na górnej powierzchni płyty po sprężeniu kablem K2 w narożu ostrokątnym belki nr 2 i osi nr 2

Fig. 9. Crack width measure on the top of slab surface after tensioning of cable K2 in the acute corner of beam No 2 and axis No 2



Rys. 10. Miara rozwartości rys na górnej powierzchni płyty w narożu ostrokątnym belki nr 2 i osi nr 2 po przyłożeniu obciążeń stałych

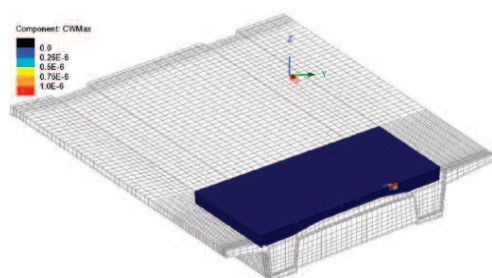
Fig. 10. Crack width measure on the top of slab surface in the acute corner of beam No 2 and axis No 2 after service loading

Obciążenie użytkowe. W Ustawieniu 1, przemieszczenia pionowe wynoszą ok. 10 mm w przypadku dźwigara obciążonego (ugięcie w dół w stosunku do poziomu deskowań), a uniesienie dźwigara nieobciążonego wynosi ok. 8 mm. W ostrych narożach płyty maksymalne naprężenia główne σ_1 nie przekraczają f_{tk} . Rozkład pęknięć w płycie pozostaje bez zmian, a miary rozwartości rys uległy zmniejszeniu

w porównaniu ze stanem po przyłożeniu obciążeń stałych (rysunek 11), tj. rysy zamykają się.

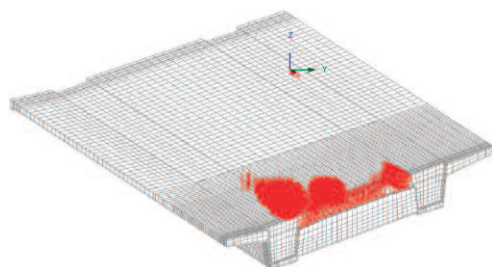
W Ustawieniu 2 oba dźwigary pozostają w symetrycznym uniesieniu pionowym ok. 15 mm. W ostrych narożach płyty maksymalne naprężenia główne σ_1 nie przekraczają f_{tk} . Rozkład pęknięć w płycie pozostaje bez zmian, a miary rozwartości rys uległy zmniejszeniu w porównaniu ze stanem po przyłożeniu obciążeń stałych, tj. rysy zamykają się.

W Ustawieniu 3 niesymetryczne uniesienia pionowe dźwigarów wynoszą: w przypadku dźwigara nr 1 – ok. 10 mm, a dźwigara 2 – ok. 5 mm. W ostrych narożach płyty maksymalne naprężenia główne σ_1 nie przekraczają f_{tk} . Pod obciążeniem K pojawia się lokalnie nowe zarysowanie (rysunek 12) na spodzie płyty żelbetowej (rysunek 13).

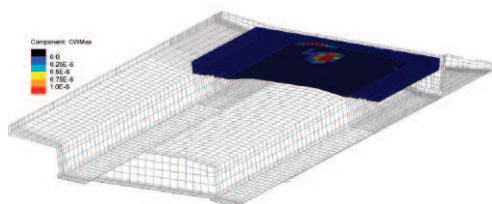


Rys. 11. Miara rozwartości rys na górnej powierzchni płyty w narożu ostrokątnym belki nr 2 i osi nr 2 w ustawieniu nr 1

Fig. 11. Crack width measure on the top surface in load setting No 1



Rys. 12. Zarysowanie w ustawieniu nr 3 przy osi nr 2
Fig. 12. Plate crack pattern in the load setting No 3 along axis No 2



Rys. 13. Miara rozwartości rys na dolnej powierzchni płyty przy osi nr 2 w ustawieniu nr 3

Fig. 13. Crack width measure on the bottom surface in load setting No 3

Natomiast w tym ustawieniu miary rozwartości rys, powstałych po sprężeniu, zmniejszyły się w stosunku do stanu po przyłożeniu obciążeń stałych, tj. powstałe wcześniej rysy zamykają się.

Wnioski

Lokalizacja i morfologia zarysowań płyty uzyskane z obliczeń na etapie sprężania i zaobserwowane in situ są zgodne. Wyniki obliczeń wskazują, że kolejność sprężania i wynikające z niej przyrosty sił skutkują naprzemiennie zmiennym obciążeniem obu dźwigarów. Każdy z tych przyrostów odpowiada naciągowi dwóch kabli w jednym dźwigarze i, jak wynika z analizy, jest niekorzystny, gdyż prowadzi do rozwoju obszaru rozciągań w rejonie kątów ostrych – rozciągań, których wyraźny wzrost rozpoczyna się od naciągu kabla K7. Ostatnie w sekwencji sprężenie kablami K8 i K2 prowadzi ostatecznie do powiększenia i utrwalenia zarysowania w płycie w rejonie kątów ostrych obiektu. Nie ma już bowiem obciążeń na etapie sprężania, które mogłyby zamknąć zaistniałą rysę. Skutkiem działania obciążeń stałych i użytkowych jest ugięcie dźwigarów w dół, co pozostaje co do zasady efektem przeciwnym do działania sprężenia.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przykładanie obciążeń stałych od wyposażenia, a także obciążeń użytkowych powoduje zamykanie się zaobserwowanych rys w płycie w ostrych narożach i redukcję zasięgu obszaru przekroczenia głównych naprężeń rozciągających σ_1 powyżej wartości f_{tk} w płycie w rejonie kątów ostrych. Tak więc obciążenie od sprężenia, będące obciążeniem trwałym przykładanym jednorazowo bez możliwości powtórzenia się, wygenerowało stan naprężeń, który pod wpływem dodatkowych obciążeń stałych od wyposażenia, a także zmiennych obciążeń użytkowych modyfikuje się na korzyść zamykania się rys w płycie.

Zasadniczą konkluzję z przeprowadzonej analizy można sprowadzić do zalecenia, że ujawnione zarysowania i pęknięcia w płycie przedmiotowego obiektu powinny zostać poddane iniekcji żywicami epoksydowymi, aplikowanymi ciśnieniowo z zachowaniem właściwej technologii, przed przyłożeniem jakichkolwiek obciążeń stałych. Taki sposób naprawy płyty pomostu przywróci jej spójność w miejscach uszkodzeń i zapewni zdolność współpracy zarysowanych części oraz zbrojenia. Umożliwi to zastosowanie typowej analizy liniowej obiektu w celu np. wykonania projektu obciążenia próbnego.

Wnioskiem praktycznym, wynikającym z przeprowadzonej analizy, jest konieczność opracowania precyzyjnego projektu sprężania obiektów pod dużym skosem. Opisane zjawiska naprzemiennie zwiększających się ugięć dźwigarów prowadzą w takich obiektach do niekorzystnych zjawisk, w tym również skręcania poprzecznic. Ponadto, co wykazano w obliczeniach, skutkują pęknięciem pomostu lub innych elementów żelbetowych wymagających w dalszej kolejności przywrócenia ciągłości materiału i współpracy ze zbrojeniem.

Literatura

- [1] Lusas Manuals, v. 19.1, LUSAS FEA Ltd. London, 2021.
- [2] Marks M. Analiza i optymalizacja kompozytów uzbrojonych dwiema rodzinami włókien. IPPT PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Studia z zakresu inżynierii. 2003 (49), Warszawa.
- [3] German J. Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych. Politechnika Krakowska. Kraków 1996.
- [4] Jefferson AD. Craft – a plastic-damage-contact model for concrete. Part I. Model theory and thermodynamic considerations. International Journal of Solids and Structures. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00390-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00390-1).
- [5] Jefferson AD. Craft – a plastic-damage-contact model for concrete. Part II. Model implementation with implicit return-mapping algorithm and consistent tangent matrix. International Journal of Solids and Structures. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00391-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00391-3).
- [6] fib Model Code for Concrete Structures 2010. CEB-FIB, Ernst & Sohn. Berlin, 2013.
- [7] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia.
- [8] Rybak M. Obciążenia mostów. Komentarz do PN-85/S-10030. 1989. WKL. Warszawa.

Przyjęto do druku: 7.08.2022 r.