

Dariusz FAUSTMANN*
Politechnika Krakowska

ANALIZA WZMOCNIENIA DŹWIGARÓW ŻELBETOWYCH CIĘGNIAMI BEZ PRZYCZEPNOŚCI W ŚWIETLE BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne wzmocnienia dachowego dźwigara żelbetowego o długości 25 m za pomocą cięgni bez przyczepności. Podczas wzmocnienia realizowano program badawczy, w ramach którego analizowano wpływ sprężenia na odkształcenia badanego elementu. Mierzono odkształcenia w kierunku poziomym i pionowym dźwigara, za pomocą czujników nasadowych typu DEMEC o bazie pomiarowej 150 i 200 mm. Ponadto, za pomocą programu komputerowego, z wykorzystaniem metody elementów skończonych, przeprowadzono analizę wpływu sprężenia na stan naprężenia w dźwigarze. Otrzymane wyniki z obliczeń porównano z wynikami pochodzącymi z badań doświadczalnych i dokonano oceny skuteczności wzmocnienia. We wnioskach przedstawiono możliwe, dalsze kierunki badań zarówno doświadczalnych, jak i numerycznych.

ANALYSIS OF STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE GIRDERS WITH UNBONDED TENDONS IN VIEW OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION

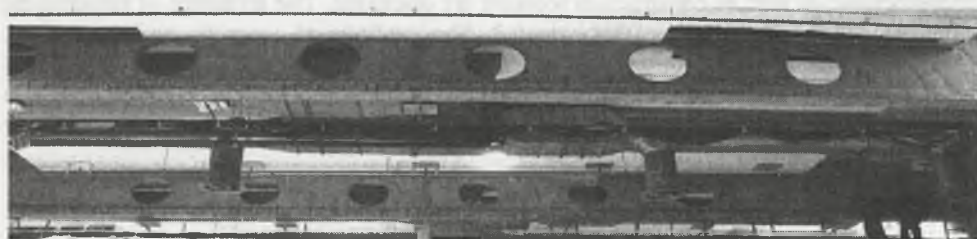
Summary. In the paper the practical possibility of strengthening of reinforced concrete roof girder, length equal to 25 m with unbonded tendons are presented. The system of strengthening, as well as construction solution are discussed. The influence of prestressing to structure deformation has been investigated. The readings of concrete strains at upper, and bottom flanges as well as at web girder has been taken with mechanical gauges DEMEC type (150, and 200 mm base). The results obtained from investigations were compared to the ones from FEM numerical analysis. The final findings dealing with the applied technology of strengthening has been also discussed.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. Politechniki Krakowskiej.

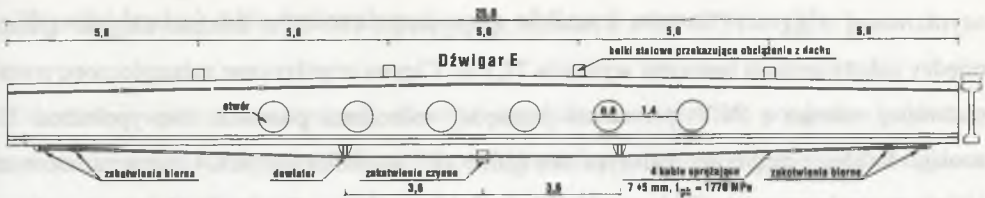
1. Wprowadzenie

Badania przeprowadzono na dwuspadkowym, jednoprzęsłowym dźwigarze żelbetowym, oznaczonym jako „E”, o długości 25,0 m, stanowiącym część konstrukcji hali zakładu przemysłowego. Pierwotny projekt zakładał zastosowanie dźwigara strunobetonowego, ze względu na trudności produkcyjne wykonano dźwigary żelbetowe. Konstrukcja hali ma układ słupowo-ryglowy. Dźwigary zostały rozmieszczone w odległości 7,5 m. Co drugi dźwigar oparty został na 15-metrowej belce pośredniej lub bezpośrednio na słupie. Dwuteowy przekrój poprzeczny badanego elementu jest zmienny wzdłuż długości, od 1,6 m w strefie podporowej do 1,8 m w środku rozpiętości. Na długości średnika znajduje się 6 otworów o średnicy 0,8 m, w odstępnie 2,2 m, umieszczonych w celu zmniejszenia ciężaru własnego. Obciążenia z konstrukcji dachu (stałe i zmienne) oraz urządzeń wentylacyjnych znajdujących się ponad dachem przekazywane są za pomocą czterech belek stalowych rozmieszczonych w odległości 5,0 m wzdłuż długości belki. Widok dźwigara przedstawia fot. 1 oraz rys. 1 i 2. Zbrojenie główne stanowi 6 prętów $\phi 28$ mm oraz 2 pręty $\phi 14$ mm, ze stali o $f_{yk} = 410$ MPa. Pręty $\phi 28$ mm rozłożono w dwóch warstwach: cztery przy dolnej krawędzi belki, a dwa w miejscu zmiany grubości półki dolnej. Pręty $\phi 14$ mm umieszczono przy styku półki dolnej z średnikiem. Strzemiona wykonano ze stali żebrowanej o średnicy $\phi 6$ mm w odstępnie 0,1 m. Beton zakwalifikowano do klasy B55.

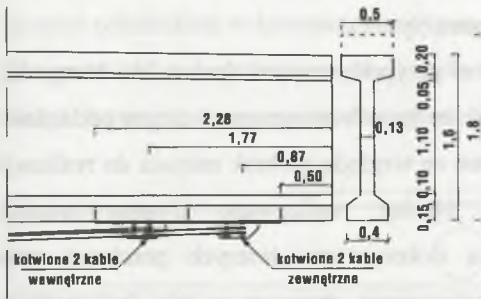
W trakcie inwentaryzacji elementów konstrukcyjnych stwierdzono nadmierne zarysowania dźwigarów. Przykładowy rozkład rys dla dźwigara tego typu przedstawia rys. 3. Zlokalizowano rysy prostopadłe i ukośne do osi belki. Średni rozstaw rys oceniono na 145 mm. Rozwartość rys prostopadłych do osi belki dochodzi do 0,4 mm, rozwartość rys ukośnych dochodzi do 0,6 mm.



Fot. 1. Widok dźwigarów – widoczne liczne zarysowania
Pic. 1. General view of girders - visible numerous cracking



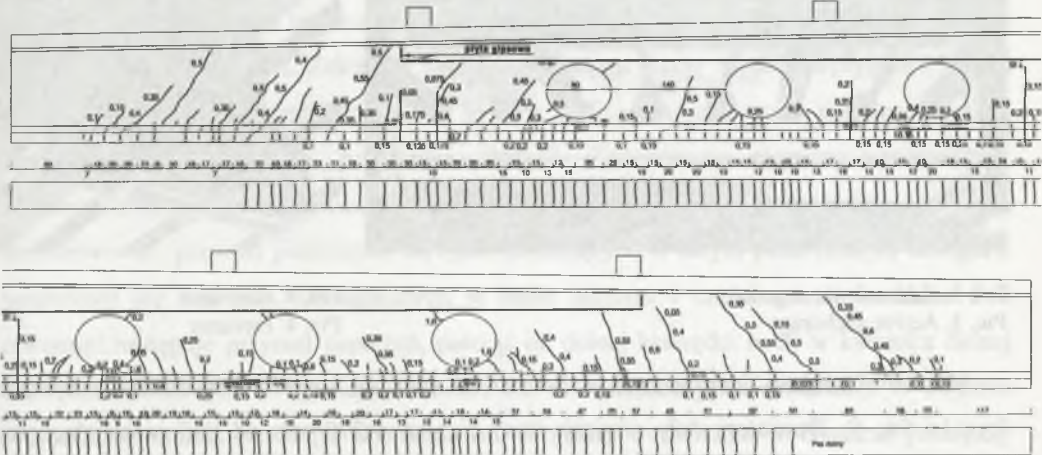
Rys. 1. Przekrój poprzeczny dźwigara i opis ogólny dźwigara
 Fig. 1. Cross section of girder and general view



Rys. 2. Zakotwienie bierne
 Fig. 2. Passive anchorage



Fot. 2. Zakotwienie bierne
 Pic. 2. Passive anchorage

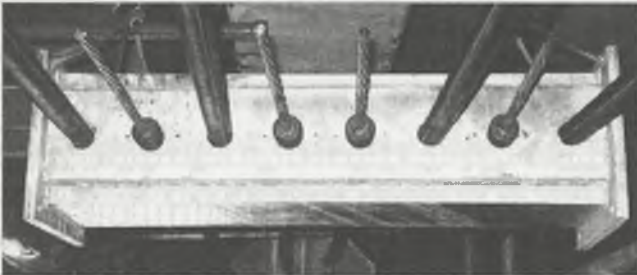


Rys. 3. Charakter zarysowania
 Fig. 3. Pattern cracks

Ze względu na niedobór nośności niezbędne okazało się wzmocnienie opisywanych dźwigarów. Wzmocnienie każdej belki zrealizowano za pomocą czterech cięgien bez przyczepności typu 7φ5 mm, o przekroju 150 mm². Ciężna zostały wykonane ze stali

ocynkowanej o $f_{pk} = 1770$ MPa i module sprężystości 190 GPa. Średnia długość splotów między zakotwieniami biernymi wynosiła 22,1 m. Ciężna ocynkowane zabezpieczone zostały podwójną osłonką z PCV, przestrzeń pomiędzy osłonkami pozostała niewypełniona. Siła naciągu każdego ciężna na badanym dźwigarze „E” wynosiła 205 kN. Ciężna zamocowane zostały parami przy podporach w zakotwieniach biernych (rys. 2 i fot. 2). Zakotwienia bierne zewnętrznych ciężen osadzone w elementach stalowych umieszczone zostały w odległości 0,87 m od końca belki. Druga para ciężen (krótszych) wewnętrznych umieszczona została w odległości 1,77 m od końca dźwigara. Zakotwienie czynne ruchome, przedstawione na fot. 3, zlokalizowane zostało w środku rozpiętości dźwigara (rys. 1).

Cztery ciężna sprężające, prowadzone ze stref przypodporowych (zakotwień biernych), zostały zamocowane w zakotwieniu czynnym. W ten sposób otrzymano 4 ciężna podzielone na 8 odcinków. Takie rozwiązanie było konieczne ze względu na brak miejsca do realizacji zakotwień czynnych na końcu dźwigara. Naciąg realizowano dwoma prasami hydraulicznymi, co skutkowało koniecznością dokonywania licznych przełożeń pras naciagowych na różne ciężna z dwóch stron zakotwienia czynnego w celu dokonywania wyrównania siły sprężającej w każdym ciężnie. Ciężna zamocowane zostały w zakotwieniach szczękowych. Wszystkie rysy o rozwarości większej niż 0,1 mm zostały zainiekowane.



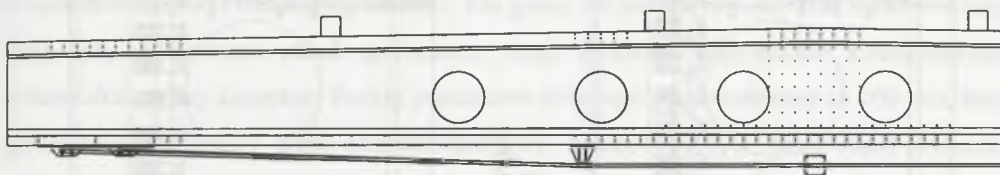
Fot. 3. Zakotwienie czynne
Pic. 3. Active anchorage

Fot. 4. Dewiator
Pic. 4. Deviator

Mimośród ciężen sprężających uzyskano za pomocą dwóch dewiatorów stalowych (rys. 1 i fot. 4). Dewiatory dały odgięcie trasy ciężen o 270 mm od linii prostej łączącej zakotwienia bierne. Dłuższe ciężna odgięte zostały w odległości 8,03 m od zakotwienia biernego, co dało kąt odgięcia wynoszący $1,52^\circ$. Podobnie krótsze ciężna zostały odgięte w odległości 7,13 m i otrzymano kąt odgięcia wynoszący $1,53^\circ$. Wszystkie elementy stalowe zamocowane na dźwigarze były ocynkowane. Ze względu na ścinanie zastosowano maty z włókna węglowego, przyklejone do środka w strefie podporowej oraz w polu pomiędzy pierwszym i drugim otworem licząc od końca belki.

2. Wyniki badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych

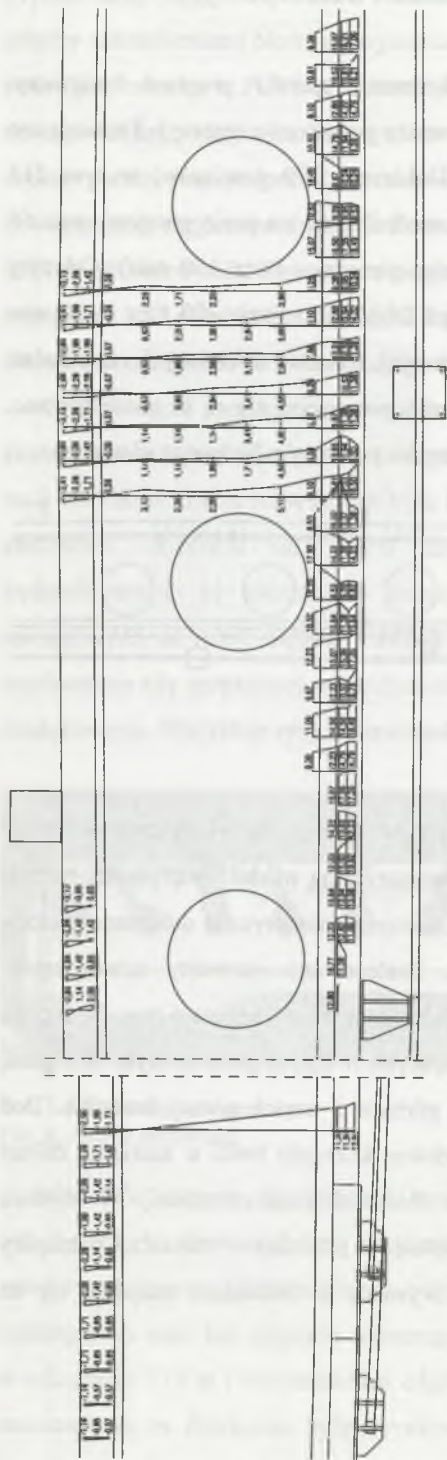
W trakcie prac remontowych obiektu zrealizowano szeroki program badawczy. Na prezentowanym dźwigarze „E” naklejono 234 punkty pomiarowe (repery). Prowadzono pomiar odkształceń dźwigara podczas sprężenia. Dokonano 279 pomiarów, w tym 211 w kierunku poziomym (86 na pasie dolnym, 62 na średniku, 63 na pasie górnym) oraz 68 w kierunku pionowym (44 na średniku, 24 na pasie górnym – baza 150 mm). Odczyty dokonywano za pomocą czujników nasadowych typu DEMEC o bazie 200 mm i 150 mm (pomiar odkształceń w kierunku pionowym pasa górnego). Rozkład naklejonych reperów na dźwigarze „E” przedstawia rys. 4. Pomiary w kierunku pionowym nie są tu prezentowane. Na rys. 5 przedstawiono zmierzone naprężenia w kierunku poziomym badanego elementu.



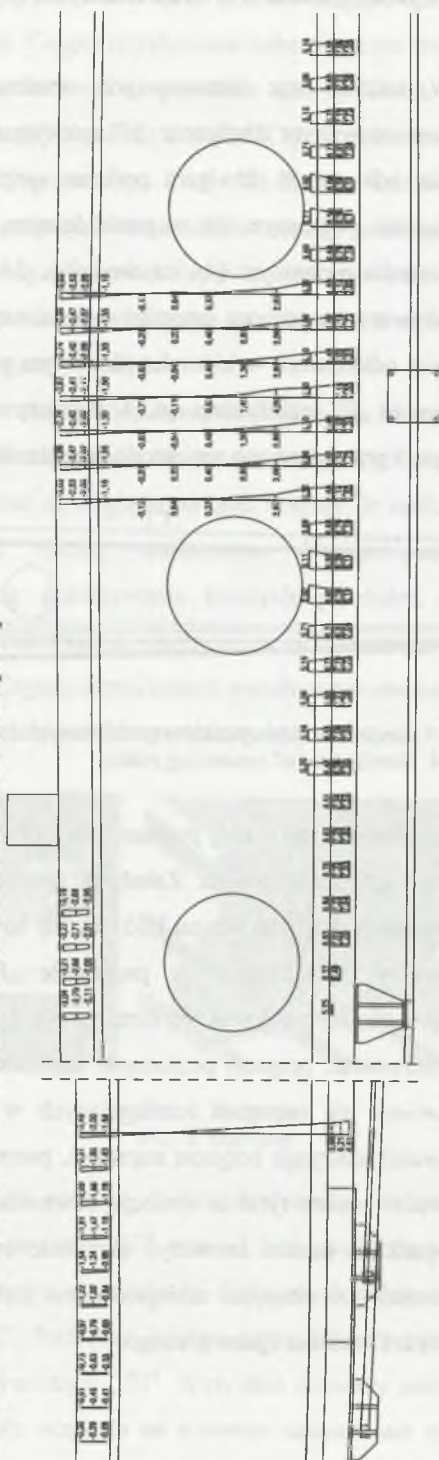
Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych (reperów)

Fig. 4. Distribution of measuring points

Analizie numerycznej poddano cały dźwigar. Prezentowane są tu wyniki porównawcze w punktach pomiarowych. Założono zgodnie z inwentaryzacją moduł sprężystości betonu odpowiadający klasie betonu B55, $E_{cm} = 36$ GPa. Obliczenia numeryczne dokonano metodą elementów skończonych w programie „Robot”. Zastosowano elementy czworokątne, ośmiowęzłowe, o boku ok. 50 mm. Na rys. 5, co potwierdzają wyniki obliczeń (rys. 6), można zaobserwować: przyrost poziomych naprężeń ściskających w całym pasie dolnym dźwigara, pojawienie się naprężeń rozciągających w pasie górnym i części górnej średnika. Pod otworami następuje przyrost naprężeń, patrząc od dolnej krawędzi belki w kierunku dolnej krawędzi otworu (jest to sytuacja odwrotna niż w obszarach poza otworami). W obydwu przypadkach można zauważyć obniżenie osi obojętnej w średniku w obszarze pomiędzy otworami. Oś obojętka umiejscowiona jest dość wysoko. W badaniach znajduje się na krawędzi średnika i pasa górnego.



Rys. 5. Wyniki badań doświadczalnych – naprężenia w kierunku poziomym [MPa]
 Fig. 5. The results of experimental investigation – stresses in horizontal direction [MPa]



Rys. 6. Wyniki analizy numerycznej – naprężenia w kierunku poziomym [MPa]
 Fig. 6. The results of numerical analysis – stresses in horizontal direction [MPa]

W strefie przypodporowej w pasie górnym występują naprężenia rozciągające, których wartości maleją wraz z zbliżaniem się do końca belki. Na rys. 6 można zauważyć spadek naprężeń z lewej i prawej strony otworów. Związane jest to z pojawieniem się w osi poziomej środka naprężeń rozciągających w kierunku poziomym.

Porównując wyniki doświadczalne z numerycznymi (rys. 5 i 6) można zauważyć, że rozkład naprężeń w przypadku badań wzdłuż wysokości dźwigara jest nieregularny. Widoczne jest to na pasie dolnym, w mniejszym stopniu na środku i pasie górnym. Można zauważyć bardzo dobrą zgodność pomiędzy wynikami z badań i obliczeń w pasie górnym. Natomiast wartości w pasie dolnym różnią się znacznie od siebie, ale zachowują takie same kierunki zmian (na przykład pod otworami). Analizując charakter zarysowania dźwigara (rys. 3) widać, że zarówno pas dolny i środek są bardzo mocno zarysowane. Rysy są w małym rozstawie i o dużej rozwartości. Pas górny nie jest zarysowany. Jak opisano wyżej, rysy były iniekowane przed sprężeniem, skąd wynikają wspomniane nieregularności w kierunku zmiany naprężeń. Punkty pomiarowe były regularnie rozłożone co 200 mm, bazy pomiarowe przebiegały przez zainiekowane rysy. Iniekowane były zarysowania widoczne o rozwartości większej niż 0,1 mm. Mogły natomiast pozostać mniejsze zarysowania, niezainiekowane. Ponadto, nie wiadomo również nic na temat penetracji żywicy wewnątrz rysy.

Podczas sprężenia realizowany był geodezyjny pomiar wygięcia dźwigara. Za pomocą niwelatora optycznego i łąty przykładanej do naklejonych na dolną krawędź belki reperów zmierzono strzałkę wygięcia dźwigara obrazującą wpływ sprężenia na wygięcie dźwigara do góry. Przemieszczenie punktu w środku rozpiętości, umieszczonego tuż obok zakotwienia czynnego, wyniosło 14,1 mm. Po miesiącu od sprężenia wygięcie przyrosło jeszcze o 3 mm, dając końcową wartość 14,4 mm.

3. Analiza wyników i wnioski

Wartości odkształceń (przeliczone na naprężenia), pomierzone podczas sprężenia betonu na obszarach zarysowanych, ujmują rozmiar przemieszczenia wynikającego niezainiekowania pozostałych rys, mniejszych niż 0,1 mm. Wnioskowanie zatem o wartości występujących naprężeń w pasie dolnym na podstawie pomiarów jest bardzo utrudnione. Należy pomierzone wartości zredukować o skrócenie wynikające z zaciskania się rys. Należy mieć również

świadomość, że struktura materiału nie pozwala na całkowite zamknięcie rys najmniejszych, niebędących przedmiotem iniekcji.

Aby wnioskować o skuteczności wzmocnienia, należy prowadzić pomiar siły sprężającej w ciągnię, nie opierając się wyłącznie na odczycie wydłużenia cięga i wskazaniach prasy naciągowej. Należy metodami geodezyjnymi kontrolować wygięcia sprężanych elementów.

W dalszych pracach należy przeprowadzić badania mające na celu określenie wpływu rys niezainiekowanych na stan naprężenia i nośność elementu zarysowanego. Należy pamiętać, że w praktyce zdarzają się przypadki wzmocnienia konstrukcji zarysowanych przez sprężenie bez wcześniejszego wypełnienia rys, co może w istotny sposób podważać zasadność takich wzmocnień. Z uwagi na efektywność wzmocnienia należałoby rozważyć określenie minimalnej wartości rozwartości rys, powyżej której konieczne jest ich wypełnienie. Jest to niezmiernie ważne zagadnienie z uwagi na problemy ograniczonej stosowalności żywicy epoksydowej do iniekcji rys o rozwartości poniżej 0,1 mm, prawidłowego wypełnienia żywicą iniekowanych rys oraz inwentaryzacji wszystkich istniejących zarysowań w naprawianym elemencie żelbetowym.

LITERATURA

1. Ajdukiewicz A., Mames J.: Konstrukcje z betonu sprężonego. Polski Cement, Kraków 2004.
2. Kiang-Hwee T., Chee-Khoo N.: Effects of Deviators and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams. *ACI Structural Journal*, 1997, p. 13-22.
3. Chee-Khoo N.: Tendon Stress and Flexural Strength of Externally Prestressed Beams. *ACI Structural Journal*, September-October 2003, p. 644-653.
4. Bui K. D., Niwa J.: Evaluation of Ultimate Stress in Beams Prestressed with External Tendons. *Proceedings of the 2nd International Congress, Italy–Naples 2006*.
5. Roberts-Wollmann C. L., Arrellaga J. A., Breen J. E., Kreger M. E.: Filed Measurements of Prestress Losses in External Tendons. *ACI Structural Journal*, September-October 1996, p. 595-601.
6. Aravinthan T., Witchukrengkrai E., Mutsuyoshi H.: Flexural Behavior of Two-Span Continuous Prestressed Concrete Girders with Highly Eccentric External Tendons. *ACI Structural Journal*, May-June 2005, p. 402-411.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Ajdukiewicz