

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



Iwona Mularczyk
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wrocławska



Opiekun naukowy:
dr inż. Michał Musiał
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wrocławska

Przedmiotowe dźwigary znajdują się w wiacie hali przemysłowej, są one swobodnie podparte na słupach żelbetowych, razem stanowiąc główny ustrój nośny tej konstrukcji.

Zgodnie z [1] dźwigary wykazywały nadmierne ugięcia, znacznie przekraczające wartości dopuszczalne, co wymusiło potrzebę wzmocnienia ich ze względu na warunki stanu granicznego użyteczności. Tego typu wzmocnienie może być wykonane zarówno w sposób konwencjonalny – np. poprzez dobetonowanie fragmentów konstrukcji lub dolożenie dodatkowego zbrojenia stalowego [2], a także bardziej nowoczesnie – poprzez użycie sprężonych (bądź nie) laminatów CFRP lub sprężenie zewnętrznymi cięgnami stalowymi. Sposoby tradycyjne nie są jednak optymalne w każdym przypadku, ponieważ zwiększają ciężar (więc również obciążenia stałe) i tak już osłabionej konstrukcji, a także – w przypadku chęci zwiększenia przekroju poprzecznego – musi istnieć możliwość wykonania tego zabiegu. Dlatego też materiały CFRP wydają się idealne do takich zastosowań [3] – mają niewielką gęstość objętościową, bardzo dobre parametry wytrzymałościowe (wytrzymałość na rozciąganie około 3000 MPa, moduł Younga średnio 150–250 GPa), małą grubość laminatów, są odporne na korozję oraz zmęczenie. Z tych powodów stają się alternatywą dla wzmocnień konwencjonalnych, a przewagę nad nimi osiągają dzięki skracaniu czasu wykonania wzmocnienia, dowolności kształtowania, możliwości stosowania przy ograniczonych przestrzeniach oraz dostępie do kon-

SPOSOBY WZMOCNIENIA DŹWIGARÓW ŻELBETOWYCH

W artykule opisano wzmocnienie żelbetowych dźwigarów prefabrykowanych o długości 15 m za pomocą sprężonych taśm CFRP. Dźwigary te (wraz ze słupami) stanowią główne elementy nośne wiaty przy hali fabrycznej. Potrzeba wzmocnienia wynikała z występujących nadmiernych ugięć tych elementów spowodowanych procesami reologicznymi zachodzącymi w betonie – skurczem i pełzaniem.

strukcji, mając jednocześnie lepsze parametry wytrzymałościowe.

Przegląd systemów wzmocnień

Wzmocnienie konstrukcji materiałami CFRP może być wykonane na dwa sposoby – może być ono bierne lub czynne.

Bierne wzmocnienie jest realizowane przez naklejenie lub wklejenie w konstrukcję laminatów i stosuje się je przeważnie dla belek [4], słupów, np. [5] oraz płyt, np. [6]. W tym przypadku kompozyt przenosi jedynie dodatkowe obciążenia użytkowe, a niemożliwe jest przejście przez niego choćby części ciężaru własnego. Współpraca między materiałem CFRP a wzmocnioną konstrukcją rozpoczyna się dopiero z chwilą przyrostu jej odkształceń, dlatego konieczne jest maksymalne odciążenie konstrukcji przed wykonaniem wzmocnienia tego typu, bo inaczej nie będzie ono efektywne. Zaletą tego sposobu jest niewątpliwie prosta i szybka technologia aplikacji, niewymagająca specjalistycznego sprzętu, co bezpośrednio przekłada się na jego niższy koszt.

Czynne wzmocnienie jest wykonywane poprzez naklejenie na element sprężonych taśm CFRP – przenoszą one zarówno obciążenia użytkowe, jak i część stałych, a ich współpraca z elementem rozpoczyna się wraz z ich naciągnięciem i nie wymaga wystąpienia odkształceń. Poprzez wywołany stan mimośrodowego ściskania następuje poprawa nośności konstrukcji, a także własności użytkowych, co objawia się redukcją zarysowań i ugięć. Niestety wadami takiego rozwiązania są: konieczność użycia wy-

specjalizowanego sprzętu oraz wysoki koszt. Dodatkowo – nie każdą konstrukcję można wzmocnić w ten sposób: zależy to od układu zbrojenia w elemencie, a także od nośności strefy ściskanej, której nie można przekroczyć przy wprowadzeniu dodatkowych sił ściskających oraz od wytrzymałości betonu strefy rozciąganej.

Obliczenia ugięć

W analizach skoncentrowano się na dźwigarze D8, wykazującym największą wartość ugięcia (94 mm) i jednocześnie największe przekroczenie wartości dopuszczalnej, która wynosi 64 mm. Obliczono wartości teoretyczne ugięć (w tym wywołane skurczem) dla sytuacji przed wykonaniem wzmocnienia oraz ugięć teoretyczne po wzmocnieniu, uwzględniając rzeczywiste ugięcia dźwigara zmierzone przez geodetę (94 mm).

Ugięcia od obciążenia obliczono zgodnie z Eurokodem 2 [7], a ugięcia od skurczu betonu zgodnie z [8]:

$$a_{cs} = \alpha_{k,s} \cdot k_{cs,m} \cdot l_{eff}^2,$$

gdzie:

$\alpha_{k,s}$ – współczynnik zależny od warunków podparcia elementu,

$k_{cs,m}$ – średnia krzywizna elementu wywołana skurczem betonu,

l_{eff} – długość obliczeniowa elementu,

średnia krzywizna elementu wywołana skurczem betonu:

$$k_{cs,m} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e,i} \cdot \frac{S_{II}}{I_{II}} \left[1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{SII}} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{S_I \cdot I_{II}}{S_{II} \cdot I_I} \right) \right],$$

gdzie:

ϵ_{cs} – odkształcenie skurczowe betonu wg Eurokodu 2 [7],

$\alpha_{e,t}$ – stosunek modułu sprężystości stali do efektywnego modułu sprężystości betonu,

S_{II} – moment statyczny pola przekroju zbrojenia rozciąganego względem osi obojętnej,

$I_{p,II}$ – moment bezwładności przekroju żelbetowego w odpowiednio I lub II fazie pracy,

S_I – moment statyczny pola przekroju zbrojenia rozciąganego względem osi obojętnej,

β_1 – współczynnik uwzględniający profil stali zbrojeniowej,

β_2 – współczynnik uwzględniający długo-trwałość działania obciążenia,

M_{cr} – moment rysujący,

M_{sd} – moment zginający wywołany kombinacją obciążeń długotrwałych.

W przypadku rozważanego dźwigara i sytuacji przed wzmocnieniem ugięcie teoretyczne wyniosło 70 mm, przy czym składowa od skurczu betonu wyniosła 7,6 mm. Porównując je z rzeczywistym ugięciem, które wystąpiło (94 mm), i mając na uwadze zaistniałe procesy reologiczne, można wyciągnąć wnioski, iż to nieprawidłowości w trakcie procesu produkcji i magazynowania mu-

siały przyczynić do nadmiernych wartości ugięć – większych niż wynikające z obliczeń dla SGU [1].

Dla dźwigara D8, po wzmocnieniu trzema taśmami CFRP o szerokości 100 mm, grubości 1,4 mm i wytrzymałości na rozciąganie 3240 MPa każda, naprężonymi do poziomu 1964 MPa, wyznaczono wartość ugięcia teoretycznego. Została ona obliczona jako suma ugięcia rzeczywistego (zmierzonego przez geodetę: 94 mm) oraz ujemnej strzałki ugięcia dla schematu obliczeniowego obciążonego jedynie siłami od sprężania, wyliczonej ze wzoru Maxwella-Mohra (-38,15 mm); wyniosła 56 mm, co spełnia warunki SGU (dopuszczalne ugięcie dźwigara D8 wynosi 64 mm).

Technologia realizacji

W przypadku przyjętego systemu sprężania zakotwienia wykonywane są indywidualnie, zgodnie z wytycznymi projektanta, co pozwala na ich dopasowanie do istniejącego w elemencie układu zbrojenia. Przed wykonaniem wzmocnienia powierzchnię elementu należy oczyścić z wszelkich zanieczyszczeń [9] (m.in. pyłów, starych powłok

malarskich, mleczka cementowego – najlepiej metodą piaskowania), usunąć nierówności powierzchni, ubytki uzupełnić zaprawą, a zarysowania wypełnić żywicą epoksydową. Należy także sprawdzić wytrzymałość betonu na odrywanie za pomocą metody *pull-off*, dla której wartość próby powinna wynosić min. 1,5 MPa.

Bezpośrednio przed aplikacją taśmy CFRP należy oczyścić i przetrzeć szmatką nasączoną rozpuszczalnikiem, aby odtłuścić laminat i usunąć z niego pył węglowy, a następnie odczekać ok. 10 min do wyschnięcia taśmy.

Przechodząc do wykonania wzmocnienia [10], jako pierwsze montuje się do elementu zakotwienia bierne – za pomocą szablonu tego zakotwienia należy wytrasować i wywiercić otwory do jego mocowania, a następnie przykręcić je do elementu (rys. 3.1.). Kolejno, za pomocą szablonu zakotwienia czynnego, wytrasować i wywiercić otwory pod mocowanie tego zakotwienia oraz urządzenia naciągowego (rys. 3.2.), zamontować oba elementy (rys. 3.3.) i przystąpić do próbnej aplikacji laminatu bez kleju, naciągając go z siłą o projektowanej wartości (rys. 3.4.) i przez

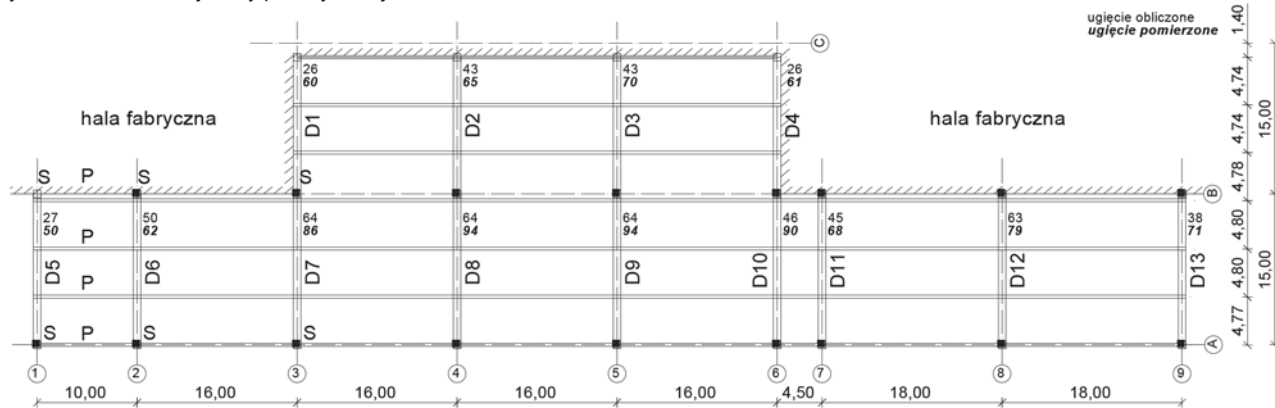
REKLAMA

CROSS – FIX EJOT® system fasadowy

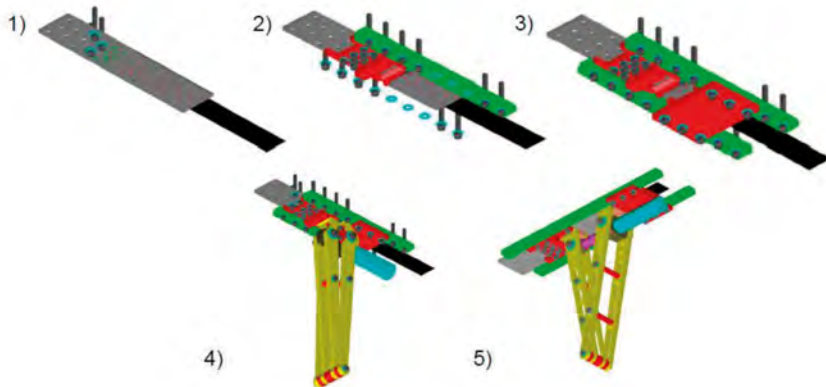
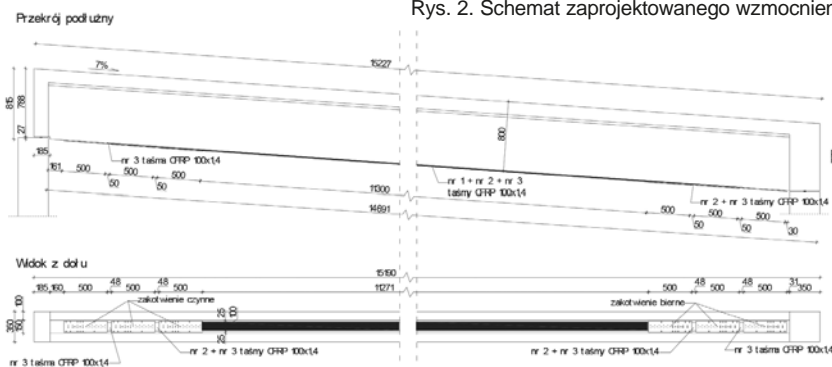


- ▶ pierwsza na rynku podkonstrukcja ze stali nierdzewnej do poziomych i pionowych profili nośnych
- ▶ znacząca redukcja mostków termicznych
- ▶ wysoka nośność statyczna
- ▶ lepsza ochrona przeciwpożarowa

Rys. 1. Rzut konstrukcji wiaty przemysłowej



Rys. 2. Schemat zaprojektowanego wzmocnienia



Rys. 3. Kolejne etapy montażu sprężonych taśm CFRP z zakotwieniami [10]

otwory przelotowe w taśmie wywiercić otwory do jej mocowania do elementu. Następnie zdemontować układ sprężający, taśmę wyjąć z szyn prowadzących i nanieść na nią klej. Potem dokonuje się właściwego montażu taśmy CFRP, powtarzając czynności jak dla aplikacji „na sucho”, na końcu mocując zakotwienie czynne do wzmocnianego elementu (rys. 3.5.). Po zakończeniu montażu układ sprężający należy zdemontować, sprawdzić przyleganie laminatu do podłoża oraz (za pomocą wałka dociskowego) docisnąć taśmę do podłoża, aby nadmiar kleju został wyciśnięty na jej boki, a następnie zebrać ten nadatek.

Podsumowanie

Nadmierne ugięcia, przy spełnieniu warunków stanu granicznego nośności, nie są zagrożeniem dla bezpieczeństwa konstrukcji. Ponadto nie zaobserwowano nadmiernych zarysowań zwiastujących jej stan awaryjny. Najprawdopodobniej działania można by ograniczyć do okresowej kontroli ugięć, które dążą do stabilizacji, tym bardziej że nawet tak duże deformacje nie pogarszają walorów użytkowych analizowanej konstrukcji. Należy jednak pamiętać, że decyzja o podjętych działaniach należy do użytkowników obiektu.

Bibliografia

- [1] Musiał M., Trapko T., Prefabrykowane dźwigary żelbetowe o rozpiętości 15 m – problem nadmiernych ugięć, „Materiały Budowlane” 11/2017, No. 543.
- [2] Urban T., Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych metodami tradycyjnymi, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [3] Kaluża M., Wzmacnianie konstrukcji budowlanych materiałami kompozytowymi FRP, „Inżynier budownictwa” 2015, No. 4.
- [4] Kotynia R., Wpływ ukształtowania zewnętrznego zbrojenia kompozytowego CFRP na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych, „Inżynieria i Budownictwo” 2005, Vol. 61, No. 1.
- [5] Trapko T., Musiał M., The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns, „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2011, Vol. 11, No. 1.
- [6] Przygocka M., Lasek K., Kotynia R., Strengthening of RC slabs with prestressed and non-prestressed NSM CFRP strips, „Architecture Civil Engineering Environment” 2015, Vol. 8, No. 3.
- [7] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [8] Kubicki J., Wpływ skurczu na ugięcia długotrwale zginanych elementów żelbetowych według Eurokodu 2, „Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik” 2001, No. 3 (119).
- [9] TINES Megachemie SA, NEOXEPLATE. Taśmy kompozytowe CFRP do wzmocniania konstrukcji – karta informacyjna produktu, Kraków 2016.
- [10] Siwowski T i in., Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmocniania mostów, Proc. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin–Międzyzdroje, 26–29 maja 2009.

ABSTRACT: In the article, strengthening of precast reinforced concrete girders with span of 15 m by using prestressed CFRP strips is described. These girders (together with columns) represent the main structural elements of the canopy by the industrial hall. The necessity to perform the strengthening was caused by excessive deflections of these elements, being a result of rheological processes in the concrete – shrinkage and creep. Possible ways of executing the strengthening by using CFRP strips were analyzed and compared, results of calculations of deflections of the girders before and after their external prestressing were described and the technology of the chosen prestressing system was presented.

Keywords: girder, reinforced concrete, deflection, strengthening, CFRP strips