

Marcin GÓRSKI*
Politechnika Śląska

SKRĘCANIE WZMOCNIONYCH ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

Streszczenie. Kompozyty z włókien węglowych wykorzystywane są dziś powszechnie do wzmocnienia konstrukcji budowlanych poddanych wpływowi zginania i ścinania. Nierozpoznane pozostaje jednak wciąż zagadnienie zachowania się elementów poddanych wpływowi skręcania. Niniejszy artykuł przedstawia wybrane aspekty i rezultaty oryginalnych badań betonowych i żelbetowych belek narażonych na wpływ skręcania.

TORSION OF STRENGTHENED CONCRETE ELEMENTS

Summary. Carbon fibre polymers (CFRP) are commonly used as external reinforcement for structural strengthening in cases related with flexure and shear. But the problem of strengthening elements subjected to torsion is still unexplored. In this paper, chosen aspects of strengthening reinforced concrete members subjected to pure torsion are presented.

1. Wprowadzenie

Wzmocniające naprawy i wzmocnienia elementów konstrukcji budowlanych stały się dzisiaj inżynierską codziennością. Starając się sprostać wymogom właścicieli obiektów budowlanych, podejmujących naprawy bądź wzmocnienia konstrukcji ze względu na zmianę charakteru pracy konstrukcji inżynier-konstruktor musi sięgać po coraz bardziej skuteczne narzędzia realizacji tych wymagań. Lista zagrożeń konstrukcji jest długa i zróżnicowana [1]. Wielokrotnie spotykamy się z nałożeniem różnych wpływów, tym bardziej zasadne jest zastosowanie trwałego i niezawodnego systemu wzmocnień. Na rynku dostępnych jest wiele różnych technik naprawczych. Najbardziej dostępne wydają się techniki wzmocnień zewnętrznymi nakładkami zbrojenia (EBR). Technika ta zapoczątkowana we Francji i RPA w latach 60. XX wieku ewoluowała, sięgając po coraz bardziej zaawansowane technologicznie

* Opiekun naukowy: Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz.

materiały. W latach 90 XX wieku rozpoczęto masowe stosowanie włókien o wysokiej wytrzymałości: szklanych, aramidowych i węglowych. Techniki wzmocnień z użyciem tych materiałów pozwalają bowiem na dokonywanie szybkich napraw zagrożonych elementów, bez ingerencji w ich strukturę oraz zmiany ich geometrii i wymiarów.

Podczas ostatniej dekady wykonano wiele projektów badawczych i realizacji inżynierskich, które pozwoliły na usystematyzowanie zakresu stosowalności tych technik. W takich krajach, jak Szwecja, Szwajcaria czy Grecja podjęto się trudu znormalizowania procedur obliczeniowych [2].

Szczególnie dobrze rozpoznane są zagadnienia związane ze wzmocnieniem konstrukcji narażonych na wpływ zginania i ścinania. Propozycję obliczeń betonowych elementów wzmocnionych taśmami z włókien węglowych przygotowano także w Polsce [3]. Zbiór najnowszych propozycji obliczeniowych zawiera specjalny raport FIB [4] wydany w czerwcu 2001 roku.

Wszystkie znane procedury koncentrują się na wymienionych wyżej wpływach, nie uwzględniając skręcania. Nie odnotowano także znaczących prób rozpoznania badawczego tego zagadnienia. Jedyne badania skręcanych elementów betonowych wzmocnianych matami z włókien wysokiej wytrzymałości wykonał zespół profesora Belarbiego. Projekt ten opisany w [5] obejmował wzmocnienia matami z włókien szklanych. Jedyne podobny projekt zajmujący się wzmocnieniami z włókien węglowych wykonał zespół Katedry Inżynierii Budowlanej Politechniki Śląskiej w Gliwicach [6]. W badaniach wykonanych w Polsce skręcanie było jednym z elementów większego programu mającego na celu opisanie zachowania się wzmocnianego elementu w złożonym stanie naprężeń.

2. Opis modeli badawczych i sposobu przeprowadzenia badań

Badania zasadnicze przeprowadzono na modelach belkowych o wymiarach 200x300x2600 mm; elementy belkowe zbrojone były wkładkami $\varnothing 16$ mm. Zbrojenie pomocnicze górą wykonano z prętów $\varnothing 10$ mm, a strzemiona z prętów o średnicy 4 mm.

Zrealizowano dwie główne grupy badań weryfikujące skuteczność wzmocnień laminatami CFRP elementów narażonych na:

- ścinanie i zginanie,
- skręcanie.

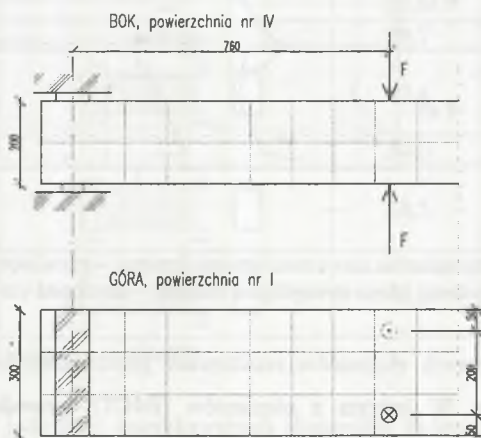
Podczas wszystkich prób rejestrowano poziom aplikowanej siły oraz odczyty stowarzyszonej z nią wielkości kąta obrotu. Siła realizowana była przez nacisk na element podwieszony do ramy nośnej podnośnika hydraulicznego.

Poza kątem obrotu rejestrowano odkształcenia postaciowe na powierzchni betonu i laminatu oraz odkształcenia stali zbrojenia głównego i pomocniczego.

Serię badań właściwych poprzedzono pilotującą serią wykonaną na niezbrojonych elementach betonowych o identycznych gabarytach. Badania zasadnicze poprzedzono pomocniczymi badaniami materiałów określającymi cechy fizyczne betonu, stali zbrojeniowej zbrojenia głównego i pomocniczego oraz laminatu.

Elementy betonowe

Badaniu poddano trzy niezbrojone elementy betonowe. Seria ta miała charakter rozpoznawczy. Głównym zamierzeniem było zweryfikowanie poprawności stanowiska badawczego do realizacji skęćania.



Rys. 1. Typowe stanowisko badawcze do realizacji skęćania

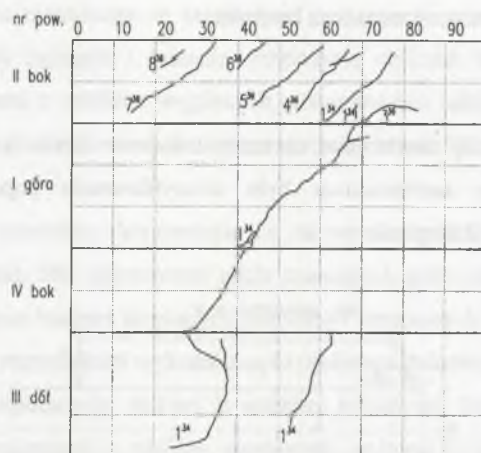
Fig. 1. Stand for torsion test

Próby przeprowadzono na elementach niewzmocnionych. Pierwsze badania zakończyły się niepowodzeniem. Pierwotnie testowano układ punktowego mimośrodowego podparcia i to było główną przyczyną „ułamania” modelu betonowego w rejonie podpór. Zdecydowano się więc na sztywne utwierdzenie elementu (rys. 1). Dopiero takie podparcie modelu pozwoliło na realizację skęćania bez lokalnych zaburzeń. Potwierdza to niemal książkowy obraz

zniszczenia elementu. Siła F_t niszcząca betonowy element bez wzmocnienia nie przekraczała 15 kN.

Elementy żelbetowe

Badania przeprowadzono na 6 elementach o opisanej wyżej geometrii i typowym zbrojeniu. Elementy żelbetowe bez wzmocnienia poddawane skręceniu niszczyły się przy sile rzędu 34 kN. Obraz zniszczenia elementu niewzmoczonego przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Typowy obraz zniszczenia niewzmoczonego elementu – rozwinięcie poboczniczy
Fig. 2. Typical failure scheme of not strengthened element – developed view of surface

Wzmocnienie czterech elementów realizowano przez pełne owinięcie strefy poddanej wpływowi skręcania. W jednym z elementów (B4CT) sprawdzono także efektywność niepełnego wzmocnienia w kształcie „U”. Pierwszą fazę badań stanowiły próby na elementach niewzmocnionych. Po ich zniszczeniu dokonywano iniekcji i następnie wzmocniano laminatem z dwóch warstw maty z włókien węglowych. Włókna orientowano równoległe do krawędzi elementu. W jednym z cykli badań dokonano także próby na elemencie wyłącznie zainiektowanym (T3i) – pomogło to w oszacowaniu wpływu iniekcji na nośność wzmoczonego elementu.

Przeprowadzono również badanie na elemencie uprzednio zniszczonym w serii prób określających wpływ wzmocnienia na elementy zginane stowarzyszonego ze ścinaniem.

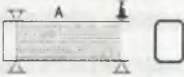
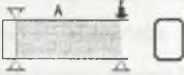

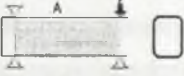

Element ten (MBCT) był więc dwukrotnie niszczone i wzmacniany. Schematy wzmocnienia elementów przedstawiono wraz z wynikami badań w tabeli 1.

3. Porównanie wyników badań

Wartości sił niszczących badane elementy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie wyników badań

Model		Rodzaj wzmocnienia	Siła niszcząca F_t [kN]	Przyrost siły niszczącej* %
T1C	T1C		104,9	203
T2	T2	—	34,6	—
	T2C		83,3	141
T3	T3	—	35,1	—
	T3i	iniekcja	29,7	-15
	T3iC		83,4	138
T4	T4	—	34,0	—
MBCT	MBCT		74,5	115
B4CT	B4CT		45,1	30

* w stosunku do T2 (z wyjątkiem modelu T3)

Kąt obrotu belki był jednym z najciekawszych elementów w realizowanych badaniach. Wartość przyrostu kąta obrotu rejestrowano dzięki układowi czujników indukcyjnych umieszczonych na niepodatnych prowadnicach zamocowanych do powierzchni belki.

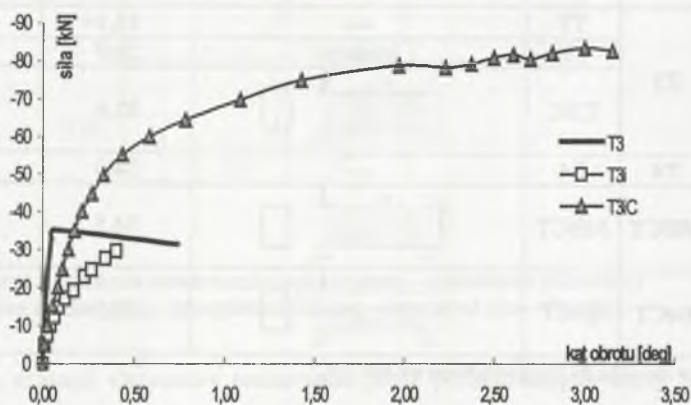
Elementy żelbetowe poddawane skrećeniu niszczone były przy sile na poziomie 34 kN. Siła aplikowana była na mimośrodku 200 mm, a więc maksymalny moment skrećający wynosił 6,8 kNm.

W przeciwieństwie do belek poddanych zginaniu iniekcja nie przyniosła wzrostu nośności elementu - zanotowano jej 15% spadek. Naprawa i wzmocnienie poprzez „owinięcie” strefy

skręcającej przyniosło 2,5-krotny przyrost nośności. Jeszcze wyższą wartość (3x) osiągnięto dzięki wstępnemu wzmocnieniu elementu.

Wzmocnienie w schemacie „U” pozwoliło także na znaczące podwyższenie wartości siły niszczącej – osiągnięto poziom o 30% wyższy od badania elementu bazowego. Również wzmocnienie elementu poprzednio pracującego i zniszczonego w innym schemacie (MBCT) wskazuje na olbrzymi potencjał tego systemu napraw wzmocniających.

Belki pierwotnie zniszczone, zainiektowane, reprofilowane i wzmocnione przez oklejenie dwukierunkowym laminatem całej strefy skręcającej osiągały 2,5-krotny wzrost siły niszczącej. Potwierdziły się również obserwacje z pierwszej serii: epoksydowy laminat zbrojony włóknami węglowymi pozwala na sygnalizację stanu awaryjnego na długo przed zniszczeniem elementu. Końcowy kąt obrotu zdeformowanej belki wzmocnionej po zniszczeniu wynosił ok. 5°, był więc widoczny gołym okiem. Badanie zakończono w obawie o zniszczenie stanowiska badawczego mimo możliwości dalszego wzrostu odkształcenia.



Rys. 3. Zależność obciążenie - kąt obrotu

Fig. 3. Relation: load – rotation angle

4. Wnioski

Skuteczność systemu naprawczego z wykorzystaniem mat z włókien węglowych do wzmocnień elementów narażonych na skręcanie okazała się być jeszcze wyższa niż w przypadku elementów zginanych.

Zastosowanie pełnego owinięcia strefy skrećanej przyniosło wzrost nośności do poziomu niemal 300% w stosunku do nośności elementu pozbawionego wzmocnienia. Zadowalające, lecz nie aż tak wysokie wyniki uzyskano dla niepełnego owinięcia belki laminatem. Wzmocnienie w schemacie „U” pozwoliło jednak także na znaczące podwyższenie wartości siły niszczącej – osiągnięto poziom o 30% wyższy od badania elementu bazowego. W przeciwieństwie do belek poddanych zginaniu iniekcja rys nie przyniosła wzrostu nośności elementu - zanotowano jej 15% spadek.

Podobnie jak w badaniach pierwszej serii (ściananie + zginanie) skuteczność zastosowania laminatu na bazie włókien węglowych wykazują obserwacje odkształceń badanego modelu. Ostatnie odczyty przed skończeniem badania uznano za maksymalne wartości kąta obrotu. W przypadku elementów bez wzmocnienia oznaczało to pełne jego zniszczenie, natomiast w przypadku modeli wzmocnionych za koniec badań uznawano sytuację stwarzającą zagrożenie dla stateczności stanowiska badawczego. Kąt obrotu belki naprawionej wzrósł 2,5-krotnie w odniesieniu do modelu bazowego. Pierwotne wzmocnienie belki, bez jej uprzedniego zniszczenia, przynosi niemal czterokrotny wzrost kąta obrotu.

Pomimo wysoce zadowalających wyników badań można jednak sformułować wiele uwag, które mogłyby uczynić ten sposób wzmocnienia jeszcze bardziej efektywny. Obserwacja mechanizmu zniszczenia laminatu wykazuje, że powodzenie operacji wzmocnienia zależy w największej mierze od ścisłego przestrzegania wymogów podanych przez producenta [7], a więc od długości zakładów i dokładnego sfazowania i wyrównania krawędzi elementów. Są to miejsca, w których zaczyna się proces destrukcji wzmocnienia.

Optymalnym materiałem do wzmocnień tego typu byłaby mata dwukierunkowo pleciona, wyeliminowałoby to lokalne zniszczenia wywołane rozerwaniem stabilizującego, poprzecznego wiązania podłużnych pasm maty.

LITERATURA

1. Górski M.: Wzmacniające naprawy belek betonowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1559, Gliwice 2002, s. 185-194.
2. Matthys S., Taerwe L.: Strengthening of Concrete Members with Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement. Proceedings of the 1st FIB Congress, Osaka, 13-19 October 2002.

3. Kamińska M.E., Kotynia R.: Obliczanie nośności belek wzmocnionych taśmami CFRP. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1999, s. 87-94.
4. FIB Bulletin 14 (TRIAFANTAFILLOU T.) Externaly bonded FRP reinforcement for RC structures. FIB, July 2001.
5. Panchacharan S., Belarbi A.: Torsional Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites. Proceedings of the 1st FIB Congress, Osaka, 13-19 October 2002.
6. Górski M.: Opracowanie zasad obliczania wzmocnień konstrukcji betonowych za pomocą mat z włókien węglowych. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego Nr 7 T07E 011 18, Gliwice, 04.2002.
7. Karta techniczna systemu SikaWrap.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maria Kamińska

Abstract

Due to growing requirements facing structural engineer on the field of providing higher capacities of existing already structures many novel techniques were developed. CFRP externally bonded reinforcement seems to be most effective proposal. During last decade many research teams investigated CFRP effectiveness, mainly in areas concerned bending and shear influences. There is lack of works analysing torsional behaviour. Paper presents results of such tests performed on RC beams strengthened with CFRP, focused on torsion. Bearing capacity of tested elements raised significantly after strengthening, despite their former total failure. Most promising result of such a strengthening is early signalisation of failure by significant increase rotation angle.