

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA
Wydział Budownictwa i Architektury

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Dorota Michałowska – Maziejuk

**EFEKTYWNOŚĆ WZMOCNIENIA ZGINANYCH BELEK
ŻELBETOWYCH PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW
KOMPOZYTOWYCH TYPU CFRP**

Promotor: prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Tworzewski

STRESZCZENIE

Materiały kompozytowe w postaci taśm lub mat są coraz częściej wykorzystywane do wzmacniania elementów konstrukcji z betonu. Konieczność rozszerzania i uzupełniania wiedzy dotyczącej tego zagadnienia powoduje, że tematyką tą zajmuje się wiele ośrodków naukowych na świecie. W literaturze przedstawiane są jednak głównie badania, w których wzmocnienie wykonywane jest w pozycji odwróconego elementu, co na pewno poprawia jakość i ułatwia wykonanie wzmocnienia, ale odbiega od warunków wzmacniania w praktyce budowlanej. Biorąc to pod uwagę w pracy doktorskiej zaplanowano badania belek żelbetowych wzmacnianych taśmami CFRP wklejanymi w betonową otulinę (metoda NSMR) pod stałym obciążeniem, w pozycji pułapowej, czyli odwzorowujących wykonywanie wzmocnień eksploatowanych elementów konstrukcji. Wykonanie w taki sposób wzmocnienia w laboratorium wymagało dostosowania istniejącego stanowiska do badania belek, umożliwiającego wykonanie wklejania taśmy w betonową otulinę w pozycji pułapowej pod stałym obciążeniem oraz co było trudniejsze, utrzymanie stałego obciążenia przez czas wzmacniania i wiązania zaprawy klejowej. Poszukując rozwiązań, zastosowano we współpracy z firmą Sika Services AG z siedzibą w Polsce oraz w Szwajcarii (prototypowe urządzenie) podgrzewanie taśmy CFRP, uzyskując w ten sposób przyspieszony czas wiązania zaprawy klejowej z 7 dni do 1,5 godziny. Ogólnie program zrealizowanych w ramach rozprawy badań obejmuje:

- badania 15. elementów żelbetowych 150x150x600mm wzmacnianych w pozycji odwróconej, które posłużyły do ustalenia efektywnej temperatury grzania taśmy kompozytowej w czasie wzmacniania, w celu skrócenia czasu wiązania zaprawy klejowej i tym samym przyspieszenie wykonania wzmocnienia,
- badania do zniszczenia 16. belek żelbetowych o wymiarach 120x300x3300mm, w tym 12. wzmacnianych poprzez wklejanie pod obciążeniem, w pozycji pułapowej taśmy kompozytowej CFRP w betonową otulinę, różniących się programem obciążania, w tym zmiennego cyklicznie, stopniem zbrojenia stalowego, stopniem zbrojenia kompozytowego oraz wykonaniem wzmocnienia z zastosowaniem przyspieszenia wiązania kleju (grzanie taśmy) lub czasu wiązania kleju równego 7 dni (zgodnego z kartą informacyjną produktu),
- badania wyjaśniające uzyskaną większą efektywność wzmocnienia belek przy zastosowaniu grzania taśmy CFRP podczas wzmacniania. Badano 3. elementy żelbetowe 150x150x600mm z wklejoną taśmą kompozytową i trzy elementy betonowe 150x150x150mm z osadzoną taśmą kompozytową (taśma bez użycia kleju),

- badania pozwalające ustalić cechy wytrzymałościowe zastosowanych: betonu, prętów stalowych i taśmy kompozytowej.

W trakcie badań wykonywanych w Laboratorium Konstrukcji Betonowych i Diagnozowania Obiektów Technicznych Politechniki Świętokrzyskiej stosowano nowoczesny sprzęt i aparaturę badawczą, w tym prototypowe urządzenie grzewcze, zestaw optyczny 3D typu ARAMIS oraz urządzenie optyczne do pomiaru współrzędnych 3D – TRITOP. Analizy uzyskanych wyników z badań zostały wykonane pod kątem:

- uzyskania optymalnej temperatury grzania taśm CFRP podczas wzmacniania elementów żelbetowych, celem przyspieszenia czasu wiązania zaprawy klejowej z 7 dni do 1,5 godziny,
- nośności wzmocnionych belek żelbetowych, stopnia wzmocnienia odnoszącego się do nośności belek niewzmocnionych i temperatury grzania taśm,
- wpływu zastosowania przyspieszonej metody wzmocnienia na wielkość ugięć, odkształceń i krzywizn badanych belek żelbetowych,
- wpływu zmiany temperatury otoczenia na zachowanie się taśmy zatopionej w zaprawie klejowej będącego przyczyną zwiększonej efektywności wzmocnienia elementów, gdzie przyrost stopnia wzmocnienia η_u w stosunku do belek niegrzanych dochodził nawet do 50 %.

Na podstawie wykonanych analiz sformułowano szereg wniosków, z których najważniejsze, to:

- Zastosowanie podgrzewania taśmy skraca czas wiązania zaprawy klejowej. Skrócenie wiązania zaprawy klejowej przekłada się bezpośrednio na skrócenie czasu wykonania wzmocnienia elementu żelbetowego.
- Zastosowanie wzmocnienia belek żelbetowych o różnym stopniu zbrojenia kompozytowego wklejanego w betonową otulinę powoduje zwiększenie obciążenia niszczącego belek wzmocnionych w stosunku do niewzmocnionych. Dotyczy to zarówno belek o niskim stopniu zbrojenia stalowego $\rho_s = 0,51\%$, jak i wyższym $\rho_s = 1,00\%$, a także obciążanych monotonicznie do zniszczenia, jak i z zastosowaniem obciążenia zmiennego cyklicznie.
- Efektywność wzmocnienia belek żelbetowych, obciążanych monotonicznie do zniszczenia, zarówno przy zastosowaniu grzania taśm kompozytowych podczas ich wklejania w betonową otulinę, jak i bez zastosowania podgrzewania taśm zależy od ich stopnia zbrojenia stalowego.
- Porównując wyniki z badań wzmocnionych elementów żelbetowych podanych w literaturze oraz z badań własnych można stwierdzić, że rozrzuty wyników stopnia wzmocnienia belek wzmacnianych pod obciążeniem, w pozycji pułapowej mieszczą się w rozrzutach wyników stopnia wzmocnienia elementów wzmacnianych w pozycji odwróconej.
- Zachowanie się taśmy przy współpracy z zaprawą klejową pod wpływem zmieniającej się temperatury otoczenia tłumaczy większy przyrost stopnia wzmocnienia belek w metodzie „na gorąco” w stosunku do metody „na zimno” dając efekt „mikro-sprężenia”.
- Przyjęcie modelu obliczania nośności na zginanie wzmocnionych taśmami belek żelbetowych opartego na założeniach EC2 z przyjęciem ograniczenia odkształcenia taśmy do połowy wartości jej odkształceń granicznych, nie daje zadowalających rezultatów, wymaga więc szerszych badań celem jego modyfikacji.

Biorąc pod uwagę przedstawione analizy i wnioski, dalsze badania zaplanowano pod kątem:

- wpływu dokładności wykonania bruzdy w otulinie betonowej belki żelbetowej na efektywność wzmocnienia z zastosowaniem metody NSRM,
- oceny ilościowej większego stopnia wzmocnienia elementów żelbetowych przy zastosowaniu przyspieszonej metody wzmacniania,
- modyfikacji modelu obliczania nośności na zginanie wzmocnionego przekroju żelbetowego z zastosowaniem metody NSMR.

Dorota Juchanowska - Maręsik
01.06.2022r.

EFFECTIVENESS OF STRENGTHENING BENDING REINFORCED CONCRETE BEAMS USING COMPOSITE MATERIALS OF THE CFRP TYPE

SUMMARY

The use of composite materials in the form of strips or mats to strengthen concrete structures is becoming increasingly common. The need of expanding and further supplementing knowledge on this issue brings attention of numerous research centres across the world. However, the literature focuses on tests where the strengthening is performed in the position of an inverted element. As much as it improves the quality and facilitates the execution of the strengthening, it is vastly different from the strengthening conditions in construction practice. Taking this into account, this doctoral dissertation plans the research on the reinforced concrete beams reflecting application of the strengthening to the structural elements. Such strengthening required adapting the laboratory for testing beams which would enable the strip to be glued into the concrete cover in the overhead position under a constant load and, what is more difficult, maintaining a constant load during the strengthening and adhesive hardening. Searching for solutions, a prototype device for heating the CFRP strip was used in cooperation with Sika AG based in Poland and Switzerland. It allowed the adhesive hardening to accelerate from 7 days to 1.5 hours. The research program implemented as part of the doctoral dissertation includes:

- tests of fifteen 150x150x600mm reinforced concrete elements strengthened in an inverted position used to determine the effective heating temperature of the composite strip during strengthening in order to shorten the adhesive hardening and thus accelerate the application of the strengthening,
- destruction tests of sixteen 120x300x3300mm reinforced concrete beams, of which twelve were strengthened by glueing the CFRP composite strip into the concrete cover under load in the overhead position and differing in the loading program with cyclical variability included, steel strengthening ratio, composite strengthening ratio, and application of strengthening with the use of accelerated bonding of the adhesive (strip heating) or the bonding time of 7 days (in accordance with product information document),
- studies explaining the obtained higher effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams using CFRP strip heating during strengthening. Tests on three 150x150x600mm reinforced concrete elements with a composite strip glued in and three 150x150x150mm concrete elements with an embedded composite strip (strip without the use of glue),
- tests allowing to determine the strength characteristics of the used: concrete, steel bars and composite strip.

Modern equipment and research apparatus were used during the tests performed at the Laboratory of Concrete Structures and Technical Objects Diagnosis of the Kielce University of Technology, including a prototype heating device, a 3D optical set of ARAMIS type and a TRITOP optical device for measuring 3D coordinates. The research results analysis was performed for:

- obtaining the optimal heating temperature of CFRP strips during strengthening of reinforced concrete elements in order to accelerate the adhesive hardening from 7 days to 1.5 hours,
- load capacity of the strengthened reinforced concrete beams, strengthening ratio η_u (defined as strengthening effectiveness) relating to the load capacity of the unstrengthened beams and the strip heating temperature,
- the effect of the application of the accelerated strengthening method on the size of deflections, strain and curvatures of the tested reinforced concrete beams,

- the influence of the ambient temperature change on the behaviour of the strip embedded in the adhesive, which is the cause of the increased effectiveness of the strengthening of elements where the increase in the strengthening ratio η_u in relation to unheated beams reached up to 50%.

Based on performed analyses, a number of conclusions were formulated, the most important of which are:

- The use of strip heating accelerates the adhesive hardening which translates directly into the reduction of the time needed to perform the strengthening of the reinforced concrete element.
- The application of strengthening to the reinforced concrete beams with a varying composite strengthening ratio, glued into the concrete cover, increases the ultimate load of the strengthened beams compared to the unstrengthened ones. This applies to both beams with a low steel reinforcement ratio $\rho_s = 0.51\%$ and higher $\rho_s = 1.00\%$, and also loaded monotonically to failure, as well as with the application of a cyclical variable load.
- The effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams, loaded monotonically to failure, both when using the heating of composite strips during their glueing into the concrete cover, and without the use of heating, depends on steel reinforcement ratio.
- Comparing the results of the research on strengthened reinforced concrete elements found in the literature with my own, it can be concluded that the variation in results of strengthening ratio of beams under load in the overhead position is within the variation of the results of strengthening ratio of the elements strengthened in the inverted position.
- The behaviour of the strip in cooperation with the adhesive under changing ambient temperature explains the increase in the strengthening ratio for beams in the so-called "hot method" in comparison to the so-called "cold method", resulting in the "micro-compression" effect.
- The adoption of the model for calculating the bending capacity of reinforced concrete beams strengthened with strips based on the assumptions of EC2 with the limitation of the strip strain to half the value at which the ultimate strain is achieved does not give satisfactory results, and therefore requires more extensive research for modification.

Taking into account both presented analyses and conclusions, further research is planned in terms of:

- the impact of the accuracy of the groove in the concrete cover of a reinforced concrete beam on the effectiveness of the strengthening using the NSRM method,
- quantitative assessment of a higher strengthening ratio of reinforced concrete elements using the accelerated method,
- modification of the model for calculating the bending capacity of a reinforced concrete cross-section using the NSMR method.

Dorota Duchajowska-Jaworska
01.06.2022v.