# ANALIZA WPŁYWU DEFEKTÓW ZESPOLENIA NA ZACHOWANIE SIĘ BELEK ŻELBETOWYCH WZMOCNIONYCH CFRP

ANALYSIS OF THE BOND DEFECTS INFLUENCE
ON THE BEHAVIOUR OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP

ROZSZERZONE STRESZCZENIE

ROZPRAWA DOKTORSKA W DYSCYPLINIE NAUKOWEJ

INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

**mgr inż. RAFAŁ BIAŁOZOR**
Wydział Budownictwa
Katedra Inżynierii Budowlanej

Promotor: **prof. dr hab. inż. Jan Kubica**
Promotor Pomocniczy: **dr inż. Marcin Górski, prof. PŚ**

**Politechnika Śląska**
**Gliwice, Marzec 2023**

*Strona celowo pozostawiona pusta*

# 1. PROBLEMATYKA, CEL I ZAKRES PRACY

Współcześnie, technologia wzmacniania elementów żelbetowych przy użyciu kompozytów polimerowych jest szeroko stosowaną praktyką w branży budowlanej. Jak dotąd, wciąż uzasadnionym ekonomicznie i środowiskowo wydaje się być wydłużanie cyklu życia budowli przez ich wzmacnianie, niż burzenie i wykonanie nowych. Od zastosowania pierwszego wzmocnienia przy użyciu kompozytów na bazie włókna węglowego (CFRP) mijają już blisko trzy dekady. Od tego czasu w literaturze, w tym również krajowej, przedstawiono szerokie spektrum badań doświadczalnych dotyczące wzmacniania elementów konstrukcyjnych poddanych ścinaniu, zginaniu, a nawet skręcaniu, co zaowocowało sformułowaniem wielu norm, wytycznych projektowania oraz szerokim upowszechnieniem tej technologii w przemyśle budowlanym, jak również jego dalszym rozwojem. Po wielu latach stosowania technik wzmacniania z wykorzystaniem taśm CFRP, coraz więcej uwagi poświęca się aspektom trwałości wzmocnień oraz metodom oceny ich stanu. Istnieje kilka metod nieniszczącej oceny, mniej lub bardziej zautomatyzowanych, dzięki którym możliwe jest uzyskanie informacji dotyczących wielkości i lokalizacji defektów w warstwie szczepnej wzdłuż zainstalowanego wzmocnienia. W przypadku wykrycia nadmiernej defektów szczególnie tych znajdujących się w strefie zakotwienia, uznaje się, że wzmocnienie powinno zostać wymienione lub pustka powinna zostać uzupełniona poprzez iniekcję. Poza tymi informacjami, nie podaje się miarodajnych wytycznych przez co ocena pozostaje subiektywna. Niemniej, niezależnie od metody przeprowadzania oceny jakości zespolenia, problem pozostaje niezmienny – w jaki sposób oszacować nośność wzmocnionego element konstrukcji gdy stwierdzono obecność defektów w zespoleniu? Odpowiedź nie jest jednak oczywista, a próba jej sformułowania rodzi kolejne pytania:

- Czy obecność każdego defektu w zespoleniu wiąże się koniecznością wymiany wzmocnienia?
- Czy istnieje możliwość określenia charakterystyki defektów pod względem wielkości lub ich lokalizacji decydujących o zakwalifikowani wzmocnienia jako nie nadającego się do użytku?
- Czy możliwe jest oszacowanie nośności element wzmocnienoego na podstawie takiej charakterystyki?
- Czy defekty mogą wpływajać na przewidywaną postać zniszczenia elementu?

- Czy możliwe jest przeprowadzenie symulacji numerycznych odzwierciedlających zachowanie elementów z defektami ?

Biorąc pod uwagę powyższe, głównym celem pracy jest rozpoznanie zachowania poddanych zginaniu elementów żelbetowych wzmocnionych przy użyciu taśm CFRP pod wpływem obecności defektów w zespoleniu w badaniach ekserymentalnych oraz symulacjach numerycznych. Rozważania ograniczono do wzmocnień na zginanie typu pasywnego w postaci taśm, pod działaniem krótkotrwałęgo obciążenia montonicznego.

# 2. WROWADZENIE DO PROBLEMATYKI WZMOCNIEŃ CFRP

Rozdział drugi pracy przybliża obecny stan wiedzy z zakresu wzmacnia belek żelbetowych w kontekście podjętej tematyki badawczej. Omówiono ogólne zasady działania belek wzmocnionych pasywnie oraz przytyoczono znane z literatury postacie ich zniszczenia jak również przytoczono normowe podejścia projektowe w celu zmniejszenia ryzyka ich wystąpienia. Ponadto uwagę skupiono na czynnikach mających wpływ na zachowanie wzmocnionych belek żelbetowych, przy czym podzielono je na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią czynniki związane są z procesem projektowym elementów i wzmocnień takie jak: geometria belek, własności materiałowe, sztywność taśm, stosunek taśmy do szerokości elementu wzmacnianego czy rodzaj obciążenia. Jako drugą grupę ustanowiono czynniki związane z aplikacją wzmocnień (przygotowanie powierzchni) i czynnikami środowiskowymi (temperatura, wilgotność). Osobny punkt rozdziału poświęcono na omówienie aspektów związanych z defektami warstwy wiążącej, ich przyczynami oraz podejścia do tolerancji i monitorowania uszkodzeń (*ang. damage tolerance apporach*) stosowanego w przemyśle lotniczym. Przedyskutowano krótko, teoretyczny wpływ defektów ze względu na ich lokalizację we wzmocnionych jednoprzęsłowych belkach żelbetowych. Przytoczono wybrane przykłady badań laboratoryjnych poświęconych wpływowi defektów na wzmocnienia różnych elementów konstrukcyjnych, a na ich podstawie w podsumowaniu rozdziału wskazano argumenty stanowiące podstawę do badań własnych autora, i tym samym poszerzenia istniejącego stanu wiedzy.

# 3. PROGRAM BADAŃ, ZAKRES I METODOLOGIA

W rozdziale trzecim, mając na uwadze stan wiedzy przedstawiono program, założenia oraz przyjętą metodologię przeprowadzonych badań eksperymentalnych. W pracy nacisk położony został na określeniu wpływu lokalizacji oraz wielkości defektów zespolenia pomiędzy elementem wzmacnianym oraz taśmą CFRP na zachowanie belek jednoprzęsłowych poddanych zginaniu. W tym celu przyjęto elementy badawcze jako belki żelbetowe o wymiarach przekroju porzecznego 0.2 × 0.3m oraz długości 3 metrów. Elementy badawcze podzielono na dwie serie różniącę się ilością zastosowanych strzemion, mających wpływ na przewidywaną postać zniszczenia wzmocnionych belek: w serii A - zniszczenie na skutek dominującego wpływu zgniania, w serii B - zniszczenie z dominującym wpływem ścinania. Wpływ defektów obserwowano pod kątem redukcji nośności, ale również wszelkich symptomów mogących świadczyć z wyprzedzeniem o występowaniu defektu w warstwie szczepnej. Badane belki wykonano z betonu towarowego, zbrojonych podłużnie dołem czterema prętami $\phi$12 oraz górą dwoma pręta $\phi$10 z zagęszczonym zbrojoniem poprzecznym $\phi$6 w serii A oraz rozrzedzonym w serii B. Głównym badanym parametrem ustalono lokalizację defektu wzdłuż długości przęsła. Defekt realizowano poprzez odcięcie warstwy kleju od betonu poprzez folię mocowaną do jego powierzchni. Przyjęto trzy różne lokalizacje defektu: a) w środku przesła, b) pod działaniem siły oraz c) tuż przed strefą zakotwienia. Powierzchnia defektu stanowiła 5% całkowitej powierzchni wzmocnienia w serii A, którą zdecydowano zwiększyć w serii B do wartości 10%. Dodatkowo przewidziano badania belki z serii A z defektem stanowiącym ponad 60% powierzchni całkowitej wzmocnienia (belka A6). Jako punkt odniesienia przewidziano również referencyjne belki: żebetową (A1) oraz belkę wzmocnioną pozbawioną defektów (A2). Elementy były wzmacniane na powierzchni dolnej belek przy użyciu niskomodułowej taśmy z włókna węglowego o szerokości 120mm oraz grubości 1.2mm. Wszystkie elementy badawcze analizowano na przygotowanym stanowisku w próbie czeteropunktowego zginania pod obciążeniem monotonicznym. Podczas badania monitorowano wartość siły, ugięcie belek, szerokość i rozstaw rys, odkształcenia betonu, stali oraz taśmy CFRP. Ugięcie belki rejestrowane było przy pomocy czujników indukcyjnych rozmieszczonych w pięciu punktach na długości belki. Pomiar szerokości rozwarcia i rozwoju rys był przeprowadzony w sposób ręczny do wartości obciażenia 160 kN. Pomiar odkształceń betonu i stali odbywał się za

pomocą tensometrów foliowych rozlokowanych równomiernie na powierzchni bocznej przekroju środkowego belki, z kolei pomiar odkształceń włókna węglowego odczytywano z tensometrów papierowych instalowanych na długości włókna. Pomiary ugięć i odkształceń zweryfikowano pomiarami metodą cyfrowej korelacji obrazu (ang. *Digital Image Correlation*) systemem Aramis. Badania przeprowadzono w ciągu jednego tygodnia po 12 miesiecach od wyknonania próbek i elementów żelbetowych.

# 4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Rozdział czwarty poświęcony został prezentacji wyników przeprowadzonych badań zasadniczych oraz poprzedzających je badań materiałowych dla stali zbrojeniowej, betonu oraz włókna węglowego. Na ich podstawie określono wielkości takie jak: wytrzymałość betonu na ściskanie, moduł sprężystości podłużnej, współczynnik Poissona betonu, wytrzymałość betonu na rozciąganie w próbie brazylijskiej, moduł sprężystości stali oraz granicę plastyczności, moduł sprężystości włókna weglowego oraz jego wytrzymałość w próbie rozciągania. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono każdorazowo dla 6 próbek walcowych. Dodatkowo wytrzymałość na ściskanie przeprowadzono na próbkach sześciennych.

W wynikach badań zasadniczych przedstawiono postacie zniszczenia poszczególnych belek. Za zniszczenienie niewzmocnionej belki żelbetowej (A1) uznano zniszczenie belki w strefie ściskanej poprzedzone uplastycznieniem zbrojenia w strefie rozciąganej oraz znacznym przyrostem ugięć belki.

W przypadku referencyjnej belki wzmocnionej (A2) bez defektów zaobserwowano odspojenie taśmy na długości połowy przęsła. Po odspojeniu na tasmie pozostawała cienka warstwa betonu. Podobną postać zniszczenia zaobserwowano dla wszystkich belek serii A (A3a-A3c). Odspojenie taśmy rozpoczynało się w obszarze czystego zginania w sąsiedztwie inicjacji pionowych rys. W literaturze, ta postać zniszczenia oznaczana jest jako IC (*ang. intermediate crack debonding*). Odspojenie postępowało w kierunku jednej z podpór: w przypadku belek A2 oraz A3a - w kierunku podpory przesuwnej, w przypadku belek A3b oraz A3c - w kierunku podpory nieprzesuwnej (w kierunku wystepowania defektu). W przypadku belek serii B o zmniejszonej ilości strzemion, zniszczenie było inicjowane każdorazowo wystapieniem rysy ukosnej w strefie

zakotwienia w pobliżu końca tasmy oraz postępowało wraz propagowaniem rysy w poziomie zbrojenia dolnego w kierunku środka przęsła belki. W efekcie taśma odspaja się razem z częścią otuliny, a taka forma zniszczenia znana jest jako CCS (*ang. concrete cover separation*).

W pracy dla poszczególnych belek zestawiono oraz przeanalizowano zależności obciążenie – ugięcie mierzone w środku rozpiętości oraz funkcje ugięć mierzonych wzdłuż długości belki. W podobny sposób zestawiono i przeanalizowano zależność moment – krzywizna dla przekroju środkowego belki jak również wartości odkształceń mierzone wzdłuż długości włókna węglowego. Zaobserwowano subtelny pik odkształceń taśmy mierzony na tensometrach okolicach defektu. Dla każdej belki zarówno z serii A jak i B przedstawiono układ oraz propagację rys na powierzchni bocznej belki w trakcie obciążania. W przypadku belek w serii A, różnica pomiędzy zarejestrowanymi wartościami sił niszczących dla różnych lokalizacji defektu ($P_{ui}$), a wartością siły niszczącej wzmocnionej belki referencyjnej, nie przekracza 1%. W przypadku belek serii B, różnica pomiędzy wartościami sił niszczących wynosi około 5%. Konsekwencją niewielkie różnic w wartościach sił niszczacych jest prawie stała zależność stosunku sił niszczących dla belek w serii A (A3a-c) oraz serii B (B3a-c) do największej siły niszczącej (zarejestrowanych w poszczególnych seriach - $P_{uimax}$) w odniesieniu do lokalizacji defektu. W przypadku belki wzmocnionej z dużym defektem (A6) ze względu na pojawienie się zjawiska poślizgu taśmy oraz opóźnionego przyrostu odkształceń w włóknie przy działaniu obciążenia, wskazano pewne analogie do przypadku zachowania się belki z cięgnami zewnętrznymi.

W podsumowaniu badań eksperymentalnych wprowadzono wielkość $\Delta_{eff}$ określoną jako efektywność wzmocnienia. Wielkość ta obliczona dla uzyskanych rezultatów z badań, została przedstawiona w odniesieniu do tzw. stopnia odspojenia - $A_{def}/A_{CFRP,}$ czyli stosunku powierzchni defektu do całkowitej powierzchni wzmocnienia. W analogi do efektywności wzmocnienia wyprowadzono wielkość $\Delta_{red}$ zdefiniowaną jako stopień redukcji wzmocnienia belki w wyniku obecności defektu. W przypadku obu wielkości, metodami regresji dopasowano funkcje będące wielomianami kwadratowymi. Innymi słowy, zaobserwowano, że dla badanej geometrii belek, stopień redukcji wzmocnienia w sposób przybliżony można opisać paraboliczną zależnością stopnia odspojenia.

# 5. ANALIZY NUMERYCZNE

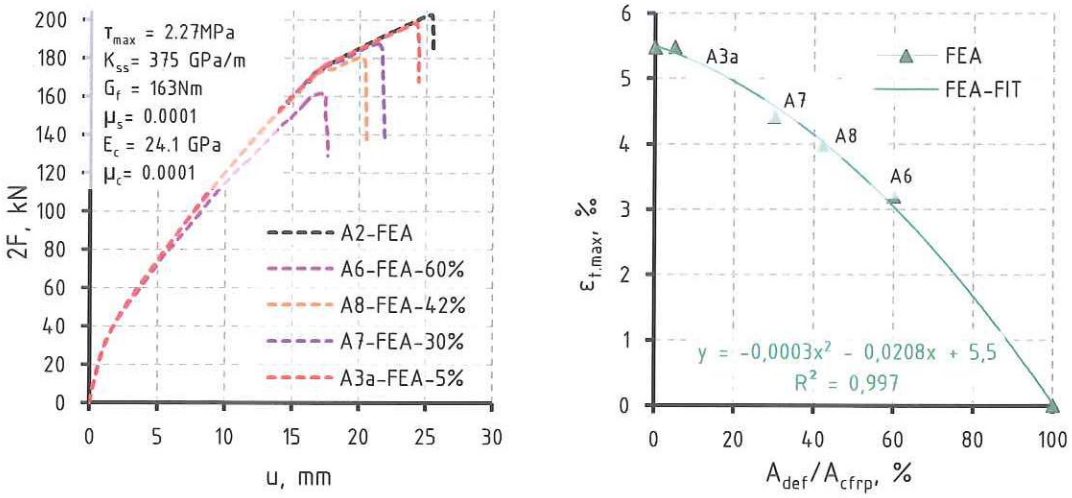
W rozdziale piątym w krótki sposób opisano zaczerpnięte z literatury różne podejścia w symulacjach numerycznych zginanych belek żelbetowych wzmocnionych za pomocą włókna węglowego metodą elementów skończonych. Zasadniczym celem analiz numerycznych było okreslenie możliwości modelowania belek wzmocnionych CFRP wraz z istniejacymi defektami w warstwie wiązania. Do symulacji przyjęto odpowiednią strategię, przeprowadzając analizy w kilku krokach. W pierwszej kolejności zdefiniowano niezbędne parametry modeli materiałowych na bazie badań własnych oraz literatury. W drugiej kolejności przeprowadzono symulacje modeli numerycznych belek referencyjnych żelbetowej A1 oraz wzmocnionej A2 przy założeniu idealnego zespolenia, a także przeprowadzono analizę wrażliwości parametrów materiałowych na odpowiedź modeli numerycznych. Rezultaty uzyskane metodą elementów skończonych zostały zweryfikowane poprzez rozwinięty przez autora program w języku programowania Python do uogolnionej analizy elementu zginanego na bazie obliczeń poszczególnych przekrojów poprzecznych tzw. metodą paskową (*ang. fiber-beam analysis*). Nastepnie, metodą prób i błędów dla belki A2 przeprowadzono kalibrację parametrów prawa (przyczepność-poślizg) rządzącego warstwą wiążącą pomiędzy betonem a włóknem węglowym. Po ustaleniu parametrów i walidacji modeli numerycznych belek z defektami przeprowadzono analizę numeryczną rozszerzoną o dodatkowe nie ujęte w badaniach zasadniczych modele belek.

Numeryczne modele belek zostały wykonane jako trójwymiarowe wykorzystując warunki symetrii podłużnej, przy czym betonową część wykonano z elementów bryłowych, elementy taśmy z włókna węglowego jako elementy powierzchniowe, nastomiast prety zbrojeniowe z elementów prętowych.

W pracy przedstawiono opisy przyjętech modeli materiałowych. Do odwzorowania nieliniowego zachowania betonu zastosowano sprężysto-plastyczno-degradacyjny (CPD) model betonu. Funkcje parametrów degradacji przy ściskaniu i rozciąganiu oraz poza sprężystą odpowiedź naprężenie-odkształcenie wyznaczono metodą iteracyjną [2] dostosowaną do wielkości oczka siatki elementów skończonych. W przypadku stali zbrojeniowej przyjęto biliniowy sprężysto-plastyczny model materiałowy, a w przypadku włókna weglowego – model sprężysty. Na podstawie oceny wrażliwości rozmiaru oczka siatki elementów skonczonych na uzyskiwane rezultaty przyjęto jej wymiar jako 25mm.

Warstwę wiążącą zadano jako kontakt pomiędzy betonem a włóknem węglowym przyjmując liniowo prawo interfejsu beton – CFRP.

Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych wykazały relatywnie dobrą zgodność z wynikami badań doświadczalnych. W przypadku serii A uzyskane rożnice w oszacowaniu wartości siły niszczącej nie przerkaczały 6%, a w przypadku serii B - 5%. Podobną zgodność w wartości siły niszczacej do 6% uzykano w przypadku belki A6 z dużym defektem. Jako uzupełnienie wprowadzono dodatkowee obiekty badawcze w postaci belek oznaczonych jako A7 i A8 z defektami zlokalizowanymi na środku rozpiętości przesła o powierzchni stanowiącej odpowiednio 30% oraz 42% całkowitej powierzchni wzmocnienia. W ten sposób uzyskano bardziej precyzyjny rozkład wyników dla w relacji obciążenie – ugięcie (*Rys. 5.1a*) oraz dla zależności efektwyności wzmocnienia i redukcji siły niszczacej od stopnia odspojenia ($A_{def}/A_{cfrp}$). Z punktu widzenia obliczeniowej weryfikacji wzmocnionych belek z obecnym defektem użyteczne jest operowanie na maksymalnym odkształceniu jakie może zostać osiągnięte w taśmie dla każdego z defektów w środku rozpiętości przęsła stąd dla analizowanych belek dopasowano również zależność maksymalnego zarejestrowanego odkształcenia taśmy CFRP ($\varepsilon_{t,max}$) od stopnia odspojenia (*Rys. 5.1b*).




*Rys. 5.1.: Wyniki z symulacji numerycznych mierzone wśrodku rozpiętości belek a) Zależność siła – ugięcie b) Maksymalne wartości odkształcenia taśmy CFRP*

Ponadto w analizach numerycznych część uwagi poświecono również dla zmiany parametrów opisujących numeryczny model zniszczenia warstwy zespolenia. Rozpatrzono zmiany parametru $Q$ odpowiadającego za proces inicjacji zniszczenia (ang. *Damage initiation criterion*) rejestrowanego w każdym z węzłów powierzchniowych elementów skończonych na powierzchni taśmy bedącego funkcją naprężeń normalnych oraz

stycznych. Rozpatrzono także zmienną degradacji zespolenia *D (ang. Damage evolution variable)* w celu analizy kierunku propagacji degradacji zespolenia betonu i taśmy.

# 6. PODSUMOWANIE

Rozdział szósty stanowi podsumowanie eskperymentalnej oraz numerycznej części pracy oraz wnioskmi z nich wynikającymi. Badania przeprowadzono w ramach niniejszej rozprawy pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

- Badane belki żelbetowe wzmnicnione taśmami CFRP z założonymi defektami wciąż wykazują znaczną efektywność wzmocnienia. Wartość siły niszczącej zależna jest od geometrii i zbrojenia elementu wzmacnianego.

- Uzyskane rezultaty badań eksperymentalnych zarówno serii A jak i serii B, wykazały brak istotniej wrażliwości na lokalizację defektu wzdłuż wzmocnienia w badanym zakresie rozpatrywanych powierzchni defektów.

- Funkcja redukcji siły niszczącej w relacji do stopnia odspojenia dla uzyskanych wyników została aproksymowana wielomianem stopnia drugiego.

- Po przeprowadzeniu procesu kalibracji, różnice pomiędzy wynikami analiz numerycznych a wynikami badań eksperymentalnych w przypadku siły niszczącej nie przekraczały 6%, nawet w przypadku belki (A6) z dużym defektem. Dobra zgodność wyników uzyskano w przypadku obu spodziewanych postaci zniszczenia.

Badania wykazały, że istnieje akceptowalny poziom odspojenia w odniesieniu do powierzchni defektu mający niewielki wpływ na nośność wzmocnionych belek żelbetowych. Zachowanie analizowanych wzmocnionych belek z defektami w niewielkim stopniu zależała od lokalizacji defektu, z koleji istonie zależała od stopnia odpsojenia. Nie zaobserwowano wpływy defektu na zmianę postaci zniszczenia. Dla zadanych waurunków brzegowych symulacje numeryczne wykazały satysfakcjonujący poziom zgodności z wynikami badań eksperymentalnych. Biorąc pod uwagę powyższe uznano że stawiany w pracycel został osiągniety w planowanym zakresie.

W załącznikach do rozprawy zawarto opis procedur w oparciu o które sporządzony został program do analizy belek metodą paskową oraz uzupełnienie wyników uzyskanych w badaniach labolatoryjnych.

Rafał Białozor 13.03.2023