

*recenzja sprawna wyrażająca pełną zgodę*

**Recenzent:**

dr hab. inż. Wit Derkowski  
Associate Professor  
Department for Building Technology  
Linnaeus University  
SE-351 95 Växjö, Sweden

Växjö, 19 maja 2023 r.

**Adresat Recenzji:**

Politechnika Śląska  
Rady Dyscypliny Naukowej  
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport  
ul. Akademicka 5  
44-100 Gliwice

**Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Białozora, pt. „Analysis of the bond defects' influence on the behaviour of RC beams strengthened with CFRP”

**1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo nr RDILT.512.1.2023, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Politechnice Śląskiej, dr hab. inż. Marcina Staniek, prof. PŚ, z dnia 27 marca 2023 roku, nawiązujące do Uchwały Rady Dyscypliny z dnia 23 marca 2023 roku, przesłane wraz z egzemplarzem rozprawy doktorskiej i umową.

Podstawami prawnymi wykonania recenzji są:

- Ustawa o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami),
- Ustawa z dnia 03 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku (Dz. U. z dnia 30 stycznia 2018 r., poz. 261).

**2. Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Białozora pt.: „Analysis of the bond defects' influence on the behaviour of RC beams strengthened with CFRP”. Praca została napisana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jana Kubicy, jako promotora oraz dr inż. Marcina Górskiego, prof. PŚ, będącego promotorem pomocniczym.

Opiniowana praca, napisana w języku angielskim, zawarta jest w jednym tomie liczącym 142 strony, na które składa się 7 stron zawierających podziękowania, streszczenie, spis treści i spis użytych oznaczeń, 101 stron zasadniczej części pracy, 12 stron zawierających wykaz 159 pozycji

Wydano dnia 23.05.2023 r.  
RDILT.512.1.2023

literatury oraz spis 19 wykorzystanych norm i wytycznych, 28 stron zawierających trzy załączniki oraz 4 strony spisów rysunków i tabel.

Tematem recenzowanej dysertacji jest analiza pracy zginanych belek żelbetowych wzmocnionych przez przyklejane na ich powierzchni rozciąganej taśm z włókien węglowych (w nomenklaturze angielskojęzycznej często używa się określenia „EAR CFRP”), prowadzona w kontekście błędów wykonawczych skutkujących lokalnymi brakami skleiny. Jest to praca o charakterze doświadczalno-obliczeniowym, w której Doktorant rozpoznał modele utraty nośności tak wzmocnionych belek i zaproponował model obliczeniowy dobrze odzwierciedlający ich rzeczywistą pracę.

Moim zdaniem tytuł dysertacji jest zbyt szeroki i nie odzwierciedla jej zakresu – może on sugerować, że praca dotyczy wszelkich rodzajów wzmocnień belek żelbetowych z zastosowaniem CFRP (w tym wzmocnień z użyciem taśm sprężonych, taśm wklejanych w bruzdy, wzmocnień na ścinanie i skręcanie), pracy belek pod różnymi obciążeniami (zmiennymi w czasie, jak i tymi o różnym charakterze, np. dynamicznym czy termicznym), oraz analiz prowadzonych w zakresach zarówno stanów granicznych użytkowalności, jak i nośności. Znacznie precyzyjniejszy, choć dłuższy, mógłby być tytuł: *„Analysis of the bond defects' influence on the capacity of bent RC beams strengthened with passive EAR CFRP system under monotonic loading”*.

Samo zagadnienie wpływu nieciągłości skleiny (pustek powietrznych) na pracę belek wzmocnionych, choć ma duże znaczenie praktyczne i jednocześnie stanowi interesujący problem naukowy, to wciąż nie doczekało się odpowiedniej ilości badań i analiz umożliwiających stworzenie miarodajnych modeli obliczeniowych. Fakt ten bardzo dobrze uzasadnia podjęcie tej problematyki, jako aktualnego i ważnego dla budownictwa zagadnienia, które winno zostać rozwiązane na drodze naukowej. Wybór takiego tematu dysertacji, moim zdaniem, zasługuje na wysoką ocenę.

Chociaż analizowana praca doktorska nie zawiera wprost sformułowanych tez, to Doktorant sformułował pięć pytań badawczych i dobrze dobrał metody naukowe służące znalezieniu rozwiązań. Niemniej jednak, sposób sformułowania poszczególnych pytań wymaga pewnej dyskusji:

- 1) *Is it always necessary to replace applied CFRP laminate no matter how big the defect or air void is detected in the bond?*

Pytanie zostało sformułowane bardziej jako praktyczny problem, a mniej jako naukowy. Jednocześnie stawia ono poruszony problem, jako zero-jedynkowy, tzn. rozważa jedynie pozostawienie systemu, lub jego wymianę? Takie podejście mogło mieć swoją podstawę w zacytowanej pozycji [128], będącej materiałem reklamowym jednego z producentów taśm CFRP, ale trudno ten materiał traktować jako podstawę rozważań naukowych. Moim zdaniem, w części przypadków, najkorzystniejszym rozwiązaniem może być zastosowanie lokalnej naprawy/wzmocnienia.

- 2) *Is it possible to arrange and classify geometrical properties of air voids (dimension, quantity, percentage, distance) based on which it can be decided that the laminate safety level is no longer acceptable?*

W tym pytaniu powinno się mówić raczej o poziomie bezpieczeństwa wzmocnionej belki, a nie samego laminatu (taśmy). Ponadto, słowo „safety” (bezpieczeństwo) ma szerokie znaczenie, np. obejmuje również zagadnienia bezpieczeństwa pożarowego, a niniejsza praca dotyczy przede wszystkim zagadnień nośności.

- 3) *Can failure mode be controlled by the bond defect regardless of the predicted failure mode with the perfect bond or can failure mode be changed?*

Pytanie można byłoby skrócić do formy: *Can failure mode be influenced by the bond defect size and/or location?*

- 4) *Is it possible to estimate the flexural capacity of CFRP-strengthened RC members based on records of bond defects detected along the laminate?*

To pytanie mogłoby być połączone z poprzednimi, ponieważ określenie nośności na zginanie jest niezbędne do określenia bezpieczeństwa konstrukcji i podjęcia ewentualnej decyzji o konieczności wymiany systemu wzmacniającego. Ponadto lepiej byłoby się zastanowić nie tyle *Czy możliwe jest oszacowanie nośności ...?* ale *W jaki sposób określić nośność ... z wymaganą dokładnością?*

- 5) *Can the behaviour of the flexural strengthened members with defects in the bond be satisfactorily represented in the numerical simulations?*

Szkoda, że Doktorant ograniczył się jedynie do analiz numerycznych, pomijając modele analityczne, niejednokrotnie pozwalające na znacznie szybszą analizę pracy konstrukcji.

Pomimo wspomnianych uwag dyskusyjnych uważam, że postawione zagadnienia badawcze są ważne i ciekawe z naukowego punktu widzenia, a ich rozwiązanie stanowi pożądane poszerzenie aktualnego stanu wiedzy.

### 3. Treść rozprawy doktorskiej

Rozdział 1, liczący 8 stron, zawiera krótkie wprowadzenie do problemu badawczego oraz omówienie zakresu, celu i - co warto podkreślić - ograniczeń prowadzonych analiz.

W rozdziale 2, zatytułowanym *Wprowadzenie do wzmocnień CFRP*, liczącym 29 stron, w niezmiernie syntetyczny sposób przedstawiono aktualny stan wiedzy w zakresie projektowania wzmocnień konstrukcji budowlanych z użyciem taśm z włókien węglowych. W pierwszej części zaprezentowano przegląd najważniejszych wytycznych obliczeniowych i modeli analitycznych dotyczących nośności na zginanie oraz długości zakotwienia taśm CFRP. W drugiej części zebrano swoistego rodzaju state-of-the-art w zakresie analizy wpływu wad skleiny (pustek powietrznych pod taśmą). Cennym elementem tej części jest podsumowanie, zawierające własne wnioski z przeprowadzonych wcześniej badań, pozwalające Doktorantowi na sformułowanie przedmiotu i zakresu tej pracy. Z tego punktu widzenia, czytelniejszym byłoby przedstawienie w pracy jej celu i zakresu oraz postawionych pytań badawczych dopiero po analizie dostępnego stanu wiedzy.

W rozdziale 3, liczącym 18 stron, przedstawiono plan badań doświadczalnych. Skrótowo opisano szczegółowe informacje na temat elementów badawczych, planowanych pomiarów i procedur stosowanych w badaniach. Należy podkreślić, że program obejmował dwie grupy belek, różniące się stopniem zbrojenia poprzecznego. W każdej grupie przebadano po 3 belki, przy czym w każdej z nich lokalizacja wady była inna. Wielkość wad skleiny w belkach z małym stopniem zbrojenia poprzecznego była dwa razy mniejsza niż w przypadku belek z większym zbrojeniem poprzecznym. Dodatkowo, badaniom poddano jeden element z bardzo rozległymi nieciągłościami skleiny. Badania wykonywano zatem zawsze na jednym elemencie danego rodzaju belki. Badania zaplanowano jedynie w jednym cyklu obciążenia monotonicznego. Dyskusję nad przedstawionym planem badań eksperymentalnych zawarłem w punkcie 4 niniejszej recenzji.

Na rozdział 4 składa się 8 stron prezentacji wyników badań materiałowych, 10 stron wybranych wyników badań eksperymentalnych dziewięciu belek oraz 3 strony podsumowania wyników badań. Badania materiałowe obejmowały wyznaczenie podstawowych cech mechanicznych stali zbrojeniowej, taśm CFRP oraz betonu, przy czym pominięto badania materiału skleiny. Wyniki

badania belek zostały częściowo przeniesione do Załączników C i D. Zważając na niewielką liczbę stron tych załączników zabieg ten nie był konieczny.

Moim zdaniem, rozdziały 3 i 4 powinny zostać połączone w jeden, obejmujący całość zagadnień badań eksperymentalnych, tym bardziej, że objętość każdego z nich jest stosunkowo niewielka.

W rozdziale 5, liczącym 32 strony, zawarto skrót przeglądu stanu wiedzy z zakresu modelowania żelbetowych belek wzmocnionych CFRP oraz prezentację własnych analiz numerycznych w ramach podjętego tematu. Całość analiz prowadzono w środowisku ABAQUS FEA. Przedstawiono zastosowane modele materiałowe, koncept modelowania i określenia nośności belek wzmocnionych taśmami CFRP z nieciągłościami skleiny oraz walidację modelu, przeprowadzoną na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Zakres analiz numerycznych został poszerzony w stosunku do zakresu badań eksperymentalnych o elementy ze zwiększonymi obszarami nieciągłości. Rozdział ten zakończony został syntetycznymi wnioskami.

Moim zdaniem, ten fragment rozprawy doktorskiej stanowi najcenniejszą część i sam w sobie stanowi pewne osiągnięcie naukowo-badawcze.

Rozdział 6, liczący 3 strony, stanowi podsumowanie całej dysertacji zawierający wnioski końcowe z badań doświadczalnych i analiz numerycznych wraz z propozycją kierunków dalszych badań. Niestety, w tej części nie znalazło się bezpośrednie odniesienie do poszczególnych pytań badawczych sformułowanych w rozdziale 1.

Zasadnicza część rozprawy doktorskiej uzupełniona została następującymi czterema załącznikami:

- Załącznik A (10 stron) zawierający informacje o modelu obliczeniowym, w tym skrótowy opis modelu nośności na zginanie, przyjętych modeli materiałowych, sposobu wyznaczania ugięcia oraz walidacji modelu wynikami obcych badań eksperymentalnych;
- Załącznik B (2 strony) zawierający wstępną weryfikację modelu CDP przy użyciu wyników badań przeprowadzonych na Politechnice Łódzkiej;
- Załącznik C (2 strony) prezentujący zdjęcia badanych belek po zniszczeniu;
- Załącznik D (4 strony) prezentujący mapy odkształceń w kierunku osi podłużnej elementu, uzyskane w badaniach własnych Doktoranta.

#### 4. Ocena merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr inż. Rafała Białozora stwierdzam, że przyjęty układ oraz sposób prezentacji treści jest logiczny i typowy dla prac o charakterze doświadczalno-obliczeniowym. Bardzo wysoko oceniam fakt podjęcia się przez Doktoranta napisania pracy w języku angielskim, nawet jeśli znajdują się w niej niewielkie niedociągnięcia językowe – takie podejście pozwala na znacznie lepsze rozpowszechnienie wyników badań własnych. Strona edytorska rozprawy znajduje się na bardzo wysokim poziomie. Dobór pozycji literaturowych jest raczej właściwy, choć razić może dość lakoniczne, a czasami żadne, odwoływanie się do nich w tekście pracy. Przykładowo, na str. 9, mówiąc o wzmocnieniach np. konstrukcji murowych lub drewnianych, czy wzmocnieniach konstrukcji żelbetowych na ścinanie, Autor każdorazowo powołuje się tylko na jedną pozycję literaturową, natomiast aż 32 pozycje zawarte w spisie literatury (oznaczone numerami: 18, 19, 20, 23, 29, 30, 31, 36, 38, 43, 53, 65, 68, 101, 102, 103, 107, 108, 111, 113, 122, 129, 131, 136, 140, N3, N6, N11, N13, N14, N15, N19) nie zostały ani razu zacytowane w dysertacji.

Na fakt mojej pozytywnej oceny przedmiotowej rozprawy doktorskiej wpływają przede wszystkim następujące argumenty:

- dobre rozpoznanie przez Doktoranta problemu, do tej pory nieopracowanego naukowo, który ma bezpośrednie odniesienie do praktyki inżynierskiej – zarówno tematyka i cel dysertacji, jak i pytania badawcze zostały trafnie dobrane. Należy w tym miejscu wysoko ocenić zamiar łączenia pracy badawczej nad zagadnieniami o charakterze naukowo-poznawczym z wdrażaniem nowych rozwiązań inżynierskich w praktyce;
- przeprowadzenie trudnych i pracochłonnych badań eksperymentalnych na elementach konstrukcyjnych w skali zbliżonej do rzeczywistej, z zastosowaniem zróżnicowanych technik pomiarowych;
- opracowanie kompleksowego modelu numerycznego dla badanych elementów, oraz jego walidacja na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych. Autor wykazał tym samym możliwość przeprowadzenia stosunkowo wiarygodnej analizy numerycznej pracy żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP z nieciągłościami skleiny;
- wykorzystanie metod naukowych do opracowania wniosków o charakterze inżynierskim w zakresie określania wielkości dopuszczalnych nieciągłości skleiny we wzmocnieniach przy użyciu taśm CFRP.

Podczas studiowania rozprawy nasunęły się pewne wątpliwości, niejasności bądź błędy, które powinny zostać wyjaśnione. Uwagi te podzieliłem na następujące pięć grup:

- Uwagi ogólne, odnoszące się do całości pracy
- analiza przedstawionej dysertacji pokazuje, że Doktorant wnioski formułuje na podstawie własnych badań doświadczalnych i analiz numerycznych, w dużym stopniu pomijając przegląd stanu wiedzy. Szkoda, że w pracy pominięto próbę analizy modeli analitycznych, powszechnie stosowanych w praktyce inżynierskiej, tym bardziej, że opis modeli zakotwienia taśm CFRP zajmuje dużą część rozdziału 2. Proste obliczenia analityczne pomogłyby również w ocenie wyników przeprowadzonych badań, np. we wnioskach z badań numerycznych pojawia się stwierdzenie, że „moment rysujący był raczej przeszacowany” – takie domniemanie można było bardzo łatwo udowodnić obliczeniami wielkości momentów rysujących dla badanych belek.  
Na str. 69 Autor poddaje pod rozwagę ciekawą koncepcję analizowania belek wzmocnionych taśmami CFRP z występującymi nieciągłościami skleiny analogiczną, jak belek sprężonych zewnętrznymi cięgnami bez przyczepności. Szkoda, że ten pomysł nie został dalej rozwinięty w pracy, co mogłoby doprowadzić do interesującego analitycznego podejścia obliczeniowego.
- Pewne wątpliwości budzi program badań, który tylko częściowo pozwala na znalezienie odpowiedzi na postawione pytania badawcze, w szczególności:
  - \* W badaniach postanowiono wykonać dwie grupy belek, różniące się od siebie stopniem zbrojenia poprzecznego, chociaż ten parametr wprost nie pojawia się w żadnym z pytań badawczych i żaden wniosek końcowy nie odwołuje się bezpośrednio do tego parametru. Pośrednio, zbrojenie poprzeczne ma rzeczywiście wpływ na schemat zniszczenia, ale nie można powiedzieć, że jest to jedyny parametr o tym decydujący (decydować może również np. odległość końca taśmy od podpory belki, czy grubość skleiny).

- \* W drugim pytaniu doprecyzowano, jakich parametrów nieciągłości skleiny požądane byłoby scharakteryzowanie ale w analizie, poza procentowym udziałem nieciągłości w stosunku do całej powierzchni skleiny i ich lokalizacji na długości taśmy, pominięto inne parametry, takie jak ilość i odległości między defektami.
  - \* Wnioskowanie z przeprowadzonych badań doświadczalnych utrudnia fakt wprowadzenia wielu zmiennych parametrów w badanych belkach (przy różnych stopniach zbrojenia poprzecznego wprowadzono różne powierzchnie nieciągłości).
  - \* Dlaczego nie przeprowadzono badań referencyjnych belek drugiego typu (B1 i B2)? Zamiast zbadania takich belek referencyjnych, Doktorant jedynie prezentuje domniemane, że zniszczyłyby się one identycznie jak elementy A1 i A2 (str. 72). Takie podejście uniemożliwiło też walidację modelu numerycznego dla belek typu B.
  - \* Dlaczego w belkach typu A zastosowano powierzchnie nieciągłości  $12000 \text{ mm}^2$ , skoro w literaturze [156] wykazano, że taka wielkość defektu nie ma wpływu na pracę belek?
- Uwagi dotyczące redakcji całości tekstu pracy:
- \* Jak wspomniałem wcześniej, zasadne jest połączenie całości rozdziałów 3 i 4 w jeden rozdział omawiający badania eksperymentalne. Właśnie takie podejście Doktorant zastosował w stosunku do badań numerycznych, łącząc w jednym rozdziale opis modelu, jego walidację, opis prowadzonych analiz, uzyskane wyniki i wnioski. Wątpliwa jest też decyzja o tworzeniu załączników o bardzo małej objętości, które mogłyby być włączone w zakres poszczególnych rozdziałów pracy.
  - \* Rozdział 2.4.5. *Bond Strength* liczy zaledwie 7 linijek tekstu i jeden rysunek, nie wnosząc nic nowego do pracy. Szkoda, ponieważ analiza złożonego zjawiska przyczepności taśmy CFRP do betonu mogłaby być kluczowa dla problematyki tej pracy - dlatego zasadne byłoby rozbudowanie tego rozdziału.
  - \* Rozdział 2.5.9. *Fatigue*, liczący 9 linijek tekstu, nic nie wnosi, tym bardziej, że w ograniczeniach pracy wskazano zagadnienie zmęczenia jako to z wyjęte z jej zakresu. Ponadto, definicja zmęczenia podana w pierwszym zdaniu rozdziału jest na tyle uproszczona, że można ją uznać za błędną.
  - \* Rozdział 2.6. *Effect of Defects* z logicznego punktu widzenia, powinien być częścią rozdziału 2.5. *General Factors Affecting CFRP Flexural Strengthening*.
- W pracy brakuje analizy błędów i niepewności wyników pomiarowych.
- Uwagi dotyczące badań doświadczalnych
- W opisie badań (str. 50) Doktorant podaje, że badano odkształcenia zbrojenia rozciąganego w belce, nie precyzując jednak w ilu miejscach zainstalowano tensometry. Wyniki tego pomiaru nie zostały w ogóle opisane w rozdziale 4, natomiast wykorzystano je do walidacji modelu numerycznego (str. 92). Nie podano niestety, czy czujniki znajdowały się w przekroju rysy w betonie, czy w przekroju pomiędzy rysami (odkształcenia stali zbrojeniowej są różne w tych przekrojach).
  - Jakie wartości zostały podane w Tabeli 4.1 (wartości średnie / minimalne / charakterystyczne)? Jakie były wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności? Czy podany zakres zmienności pomierzonej średnicy obrazuje odchylenie standardowe, dokładność pomiaru, czy może

różnicę między średnicą nominalną a maksymalną? Takie informacje powinny uzupełniać podawane dane. Podobne pytania dotyczą prezentacji wyników dla innych materiałów.

- W przypadku badań betonu zastanawiają proporcje pomiędzy uzyskanymi wynikami – wytrzymałość badana na walcach: 38,2 MPa, wytrzymałość badana na kostkach: 58,1 MPa oraz moduł sprężystości o wartości tylko 24,1 GPa. Jaką zatem uzyskano klasę betonu? Czy te różnice naprawdę mogą być tłumaczone jedynie złym zawibrowaniem próbek? Jeśli tak, to wyniki ze źle pobranych próbek należałoby odrzucić. Jakie zatem wartości przyjęto w analizach obliczeniowych belek?
- W przypadku badań taśm CFRP Autor podaje na str. 57, że uzyskano wytrzymałość mniejszą o 25% od tej podawanej przez Producenta. Moim zdaniem, to nie może być spowodowane jedynie procesem cięcia próbek, jak sugeruje Doktorant. Najprawdopodobniej powodem przedwczesnego zniszczenia był błędny sposób badania, niegwarantujący osiowości wprowadzania siły rozciągającej oraz powodujący powstanie karbu na krawędzi przyklejonych sztywnych szczęk stalowych i taśmy. Teorię tę może potwierdzać fakt, iż dla dwóch badanych próbek (oznaczonych numerami 2 i 3) Autor w ogóle nie podał wartości osiągniętej nośności.
- Czy grubość skleiny była kontrolowana w trakcie wzmocnienia belek i czy następnie była inwentaryzowana? Patrząc na Rys. 3.6 b), a w szczególności Rys. 4.13a), można mieć wrażenie, że skleina miała stosunkowo dużą grubość (parę milimetrów), co może znacząco wpływać na pracę systemu wzmocniającego.
- Wnioski jakościowe z wykonanych badań belek wzmocnionych są cenne i poszerzają stan wiedzy, jednakże z uwagi na realizację badań jedynie na jednym elemencie danego typu niemożliwe jest uogólnianie wniosków ilościowych. Dlatego w przyszłych publikacjach zalecane jest preredagowanie wniosków końcowych.

- Uwagi dotyczące analiz numerycznych

- Analizując wyniki analiz numerycznych można zauważyć, że dobrze odzwierciedlają one zachowanie belek w kontekście wielkości obciążenia niszczącego. Trochę mniejszą zgodność uzyskano w kwestii maksymalnego ugięcia (patrz wyniki dla belek A3b i A3c na Rys. 5.19). Ciekawe jaką uzyskano zgodność w zakresie obrazów zarysowania na poszczególnych etapach obciążenia – te wyniki niestety nie zostały zaprezentowane w pracy.
- w Załączniku B, na Rys. B.0.3, pokazano porównanie obrazu zarysowania uzyskanego w obliczeniach numerycznych (nie wiadomo dla jakiego poziomu obciążenia) z zarysowaniami zarejestrowanymi w trakcie badania analizowanej belki. O ile zarysowania prostopadłe (wywołane momentem zginającym) są wiarygodnie odtworzone, to skuteczność odwzorowania zarysowań ukośnych jest już mniejsza, a odspojenie taśmy CFRP w ogóle nie występuje w wynikach analiz numerycznych.
- dlaczego przy wykreślaniu krzywej na Rys. 5.29 b) założono zerową nośność dopiero dla 100% powierzchni nieciągłości skleiny, skoro wyniki analiz numerycznych pokazanych na kolejnym rysunku (Rys. 5.30) wskazują na wyczerpanie nośności już przy 80% poziomie nieciągłości spoiny?
- Tabela 5.2. – na jakiej podstawie przyjęto wartość  $f_{pu} = 2179$  MPa (wartość różna od tej podanej w Tabeli 4.2.)

- Uwagi szczegółowe

- str. 24 - zamiast „shear strength” (str. 24) powinno być „shear capacity”, ponieważ *strength* jest wytrzymałością (cechą materiału) a *capacity* jest nośnością odnoszącą się do elementu;
- str. 39 – jest *“bending capacity of the strengthening system”* powinno być *“bending capacity of strengthened beam”*;
- str. 21 - metoda obliczania nośności przekroju zginanego, zgodna z rys. 2.5, jest błędna. W analizie stanu granicznego nośności konieczne jest przyjęcie nieliniowej pracy betonu i stali, tj. naprężenia w tych materiałach wyznaczane muszą być na podstawie nieliniowych obliczeniowych zależności  $\sigma$ - $\epsilon$ , a nie – jak podano na rysunku, jako iloczyn odkształcenia i modułu sprężystości. Proszę o wyjaśnienie, co wprowadzono do algorytmu obliczeniowego;
- str. 23 - wzory w p. 2.4 bazują wyłącznie na *fib* Bulletin 90. Dlaczego, przy tak szerokiej bibliografii nie odwołano się również do innych wytycznych i norm, tak jak to zrobiono w p. 2.5.5?
- str. 32 - Rys. 2.15 a) w rozdziale 2.5.8. *Concrete Grade* wymaga wyjaśnienia. Podpis pod rysunkiem mówi o zależności efektywnej długości zakotwienia taśmy od wytrzymałości betonu na ściskanie, a osie wykresu opisane są jako odkształcenia taśmy  $\epsilon_f$  i sztywność taśmy  $E_f t_f$ ;
- str. 47 - rysunki belek w ramach Tabeli 3.1. są mało precyzyjne – np. nie podano informacji o średnicy strzemion i rodzaju stali zbrojeniowej;
- str. 47 - wartości podane w Tablicy 3.2 są nieprecyzyjnie opisane – nie wiadomo, które dotyczą belek wzmocnionych, a które niewzmocnionych. Nie podano sposobu wyznaczenia nośności. Tytuł Tabeli podaje, że obliczenia wykonano zgodnie z EC2 – w jaki sposób zatem obliczono nośność wzmocnionej belki według normy EC2?
- str. 66 - na Rys. 4.15a) podano wykresy ugięć wszystkich belek typu A przy obciążeniu 200 kN, podczas gdy belka A3c zniszczyła się przy sile niższej, wynoszącej 199,3 kN.
- str. 67 - Rys. 4.16 pomija obrazy zarysowania dla belek A1 i A2, a to utrudnia analizę wpływu nieciągłości skleiny na sposób zniszczenia belki i odpowiedź na jedno z postawionych pytań badawczych.
- Rysunki o numerach 4.21 – 4.22 oraz D.0.1 – D.0.7 pokazują mapy odkształceń przed i po zniszczeniu, jednakże określenie „przed” oraz „po zniszczeniu” są niezwykle mało precyzyjne. W pracach naukowych zwykle podaje się precyzyjnie określoną wartość obciążenia zewnętrznego, powodującą dany stan odkształceń.
- Rys. 3.1, Rys. 4.15, Rys. 4.17, Rys. 4.20 oraz Załącznik C pomijają prezentację wyników dla belki A1

- Wybrane szczegółowe uwagi edytorskie

- Nie jest jasne kryterium tworzenia spisu oznaczeń
  - \* spis ten wydaje się być dość wybiórczy (np. dlaczego podane jest  $f_y$ , a już nie podano  $f_{fd}$ ?);
  - \* nomenklatura użyta w spisie nie zawsze jest precyzyjna (np.: L – „length”, bez podania czego i jaka to jest długość; całkowita wartość działających obciążeń punktowych określana jest zarówno jako 2F, jak i 2P, a jednocześnie graniczne obciążenie podane jest jako  $P_u$  (jedno P, a nie 2P), itp.), lub nazewnictwo bywa niezgodne z powszechnie używanym (np.:  $\sigma_{fd}$  – „stress in CFRP due to ultimate load” zamiast „design strength of CFRP laminate”,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – „principle stress directions” zamiast „principle stresses”, itp.);

- \* zdarza się, że opisy podane w zbiorze oznaczeń są powtarzane ponownie w treści pracy (np.:  $f_{cm}$  pod wzorem (2.3),  $G_f$  i  $t_f$  pod Tabelą 2.3, itp.), co jest niepotrzebne;
- \* zdarza się, że dana wielkość ma inne oznaczenie w spisie oznaczeń, a inne w tekście pracy (np.  $b_f$ , które na stronie pojawia się jako  $b_p$  – być może jest to literówka);
- Rys. 2.7. na str. 22 – błędnie podane podpisy, rysunek ma 4 części, oznaczone a) – d), podczas gdy podpisy dotyczą tylko 3 części (źle przyporządkowane);
- Błędna numeracja podrozdziałów:
  - \* jest 5.3.1 (str. 87) – powinno być 5.3.3.1,
  - \* jest 5.3.1 (str. 88) – powinno być 5.3.3.2,
  - \* jest 5.3.2 (str. 90) – powinno być 5.3.3.3,
  - \* jest 5.3.3 (str. 92) – powinno być 5.3.4,
  - \* jest 5.3.4 (str. 94) – powinno być 5.3.5.

## 5. Podsumowanie recenzji

W opiniowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Rafała Białozora podjęto problem w pełni aktualny i mający znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Praca ta rozwiązuje w pewnym stopniu postawione zadanie naukowe i stanowi wkład w rozwój wiedzy z zakresu wzmacniania konstrukcji żelbetonowych przy użyciu materiałów CFRP, a uzyskane wyniki mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce inżynierskiej, co jest znaczącym osiągnięciem Autora pracy. Pod tym względem pracę oceniam bardzo wysoko.

Mając na uwadze, że w pierwszym rozdziale dysertacji Doktorant postawił pięć pytań badawczych należy stwierdzić, że:

- odpowiedź na pytanie 1, czy zawsze konieczna jest wymiana systemu wzmacniającego (w domyśle, w sytuacji stwierdzenia nieciągłości skleiny między taśmą CFRP a betonem), nie została wprost udzielona, choć - bazując na informacjach podanych na Rys. 5.30 - możliwe jest określenie nośności elementu w zależności od procentowego udziału nieciągłości, a więc możliwe jest podjęcie miarodajnej decyzji, co do możliwości pozostawienia wzmocnienia bez dalszej ingerencji lub jego wymiany;
- odpowiedź na pytanie 2, dotyczące klasyfikacji właściwości geometrycznych uszkodzeń pozwalającej na określenie poziomu bezpieczeństwa konstrukcji, została udzielona częściowo, jedynie w zakresie wielkości powierzchni nieciągłości oraz lokalizacji tej nieciągłości na długości taśmy CFRP;
- odpowiedź na pytanie 3, czy obecność i geometria nieciągłości mogą wpływać na mechanizm zniszczenia, została pośrednio udzielona, w szczególności w zakresie nieciągłości o stosunkowo niewielkiej powierzchni;
- odpowiedź na pytanie 4, dotyczące możliwości określenia nośności na zginanie belek wzmocnionych, została w pełni udzielona;
- odpowiedź na pytanie 5, dotyczące możliwości miarodajnego odwzorowania w symulacjach numerycznych pracy przedmiotowych belek, została bezspornie udzielona jedynie w zakresie szacowania ich nośności pod obciążeniem statycznym.

Podsumowując, można stwierdzić, że choć odpowiedzi udzielono częściowo, to jednak Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego wnioskowania naukowego na podstawie własnych rozwiązań postawionych problemów.

Doktorant wykazał się również odpowiednimi umiejętnościami prowadzenia trudnych technicznie i czasochłonnych badań doświadczalnych w skali zbliżonej do rzeczywistej. W świetle opisanych faktów stwierdzam, iż Doktorant posiada predyspozycje i odpowiednie przygotowanie do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Podkreślam również, że moim zdaniem mocne strony dysertacji przeważają nad słabszymi, które najprawdopodobniej wynikały z ograniczeń czasowych. Szereg z przedstawionych wcześniej uwag i komentarzy ma charakter dyskusji naukowej bądź wskazówek dotyczących przyszłej pracy naukowej.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż recenzowana rozprawa pt. „Analysis of the bond defects' influence on the behaviour of RC beams strengthened with CFRP” spełnia podstawowe wymogi odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie z dnia 03 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669), Ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku (Dz. U. z dnia 30 stycznia 2018 r., poz. 261). Stwierdzam również, że Doktorant osiągnął efekty uczenia się, stawiane dla Poziomu 8 Europejskich Ram Kwalifikacji, i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Rafała Białozora do publicznej obrony złożonej pracy.

*dr hab. inż. Wit Derkowski*