

Dr hab. inż. **Andrzej Seruga**
Profesor Politechniki Krakowskiej
Pracownia Konstrukcji Sprężonych
Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych
Politechniki Krakowskiej
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
Tel.: 12 628 23 75/ / 20 27
Email: aseruga@pk.edu.pl

Kraków, 18.03.2016

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Laska, pt. „Efektywność wzmacniania żelbetowych elementów na zginanie wstępnie naprężonymi taśmami z włóknami węglowymi”
Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Renata Kotynia, profesor Politechniki Łódzkiej

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi Uchwała nr 712 Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej z dnia 25.06.2015 roku oraz pismo Dziekana Wydziału z dnia 06.11.2015 roku

2. Przedmiot i zawartość pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Laska pt. „Efektywność wzmacniania żelbetowych elementów na zginanie wstępnie naprężonymi taśmami z włóknami węglowymi”. Rozprawa ma charakter doświadczalny z elementami analizy numerycznej i liczy 146 stron. Integralną częścią pracy jest 8 załączników:

- Tabelaryczne zestawienie parametrów i wyników badań obcych,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B12-asp,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B12-sp,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B12-asp-e,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B12-sp-e,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B12-a,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B16-asp,
- Wyniki pomiarów badań własnych dla B16-asp-e,

co ostatecznie daje 273 strony. Oznaczenia użyte w tekście zestawione są na 2 stronach. Wykaz 132 rysunków podany jest na 5 stronach, spis tablic na 1 stronie, natomiast 61 pozycji wykazu literatury i 7 norm oraz zaleceń przedstawiono na 4 stronach.

Objętość poszczególnych rozdziałów jest bardzo zróżnicowana, zawierają one bowiem od 3 do 52 stron. W pracy zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozdziały 4 do 8 będące podstawowym elementem pracy, stanowią łącznie 32% objętości zasadniczej części pracy. Należy jednak zaznaczyć, że wyniki badań własnych zestawione w 7 załącznikach zajmują 117 stron.

Rozdział 1 to wstęp stanowiący wprowadzenie do podjętego tematu pracy. Doktorant w sposób zwarty przedstawia wagę problemu czyli ocenę skuteczności wzmocnienia żelbetowych płyt i belek na zginanie, silnie wytężonych przed wzmocnieniem czego wyrazem są zarysowania i nadmierne ugięcia, za pomocą wstępnie naprężonych kompozytów. Autor pracy stwierdza, że przeprowadzone badania doświadczalne wykazały iż wzmocnienie konstrukcji przy zastosowaniu biernych kompozytów zwiększa jej nośność, jednak nie wpływa znacząco na poprawę warunków użytkowości.

W rozdziale 1 Autor rozprawy przedstawił nadrzędny cel podjętej pracy, a mianowicie, dokonanie analizy wpływu obciążenia żelbetowych elementów przed wzmocnieniem na zginanie, na stopień wzmocnienia elementów oraz graniczną odkształcalność naprężonych taśm CFRP. Wymienione zostały 3 szczegółowe cele pracy, teza i zakres pracy.

W rozdziale 2 przedstawiono sposoby wzmocnienia żelbetowych elementów na zginanie przy zastosowaniu naprężonych kompozytów FRP. Autor pracy stwierdza, że przy stosowaniu biernego wzmocnienia żelbetowych elementów wykorzystanie wytrzymałości materiału kompozytowego na rozciąganie nie przekraczało 35%, co było spowodowane odspojeniem materiału kompozytowego od powierzchni wzmocnianego elementu. Na podstawie analizy wyników otrzymanych z badań i przedstawionych w naukowych publikacjach, Doktorant stwierdza, iż minimalny poziom wstępnego naprężenia kompozytu powinien wynosić 25% jego wytrzymałości na rozciąganie. Przy poziomie naprężenia powyżej 70% wytrzymałości na rozciąganie, zniszczenie badanych elementów następowało na skutek zerwania włókien, natomiast przy naprężeniu poniżej 70% przez odspojenie kompozytu od powierzchni betonu. Za najbardziej efektywny poziom naprężenia kompozytu CFRP uznano 50-60% jego wytrzymałości na rozciąganie, co wyraża się jednoczesnym odspojeniem i zerwaniem włókien. W tym miejscu Autor pracy nie wypowiada się na temat efektywnego poziomu naprężenia w odniesieniu do kompozytu stosowanego bez udziału zaprawy klejowej.

W rozdziale tym Autor pracy omawia materiały kompozytowe stosowane do czynnych wzmocnień przedstawiając w sposób zwarty typy włókien (węglowe, szklane, aramidowe i bazaltowe), typy matryc (termoutwardzalne i termoplastyczne) oraz rodzaje materiałów kompozytowych (tkaniny, laminaty i pręty). Elementem warunkującym skuteczność wzmocnienia jest rozwiązanie konstrukcyjne systemu kotwiącego laminat w belce lub płycie żelbetowej. Doktorant szczegółowo omawia rozwiązania 5 systemów kotwiąco-sprężających i 3 bezkotrówowych systemów sprężających, które wykorzystują stopniową redukcję siły sprężającej na długości taśmy. Tylko w przypadku 3 systemów podane są możliwe do uzyskania w procesie sprężania maksymalne wartości odkształceń taśmy w przedziale od 6 do 9,5 %. Autor nie ocenia skuteczności utrzymania

pełnego naciągu w stanie granicznym nośności taśmy, co byłoby bardzo cenną informacją, pomocną przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu danego systemu kotwiącego.

W rozdziale 3, najbardziej rozbudowanym w zasadniczej części rozprawy, Doktorant analizuje wyniki otrzymane z badań doświadczalnych przeprowadzonych w 18 ośrodkach naukowych w latach 1998 – 2014. Omawiane kolejno badania doświadczalne przedstawiono w sposób uporządkowany, podając w miarę możliwości geometrie badanych elementów, zastosowany sposób wzmocnienia, parametry zmienne, cel badań, zasadnicze rezultaty i wynikające z nich wnioski. W przytoczonych opisach szczególną uwagę zwrócono na historie obciążenia elementów przed wzmocnieniem i podczas wzmocnienia. W niektórych przypadkach badane elementy uległy zarysowaniu pod wpływem ciężaru własnego, co odpowiadało wytężeniu elementu na poziomie 25% jego nośności na zginanie. Podano również usytuowanie elementu w chwili dokonywania sprężenia. Wzmocnienie w pozycji sufitowej odpowiada rzeczywistej pracy konstrukcji, natomiast preferowana w badaniach pozycja odwrócona zwiększa wpływ wstępnego sprężenia kompozytu.

W tym rozdziale pracy Autor zdefiniował stopień wzmocnienia elementu, wyrażający się stosunkiem względnego przyrostu nośności wzmacnianego elementu do elementu niewzmocnionego. W analogiczny sposób zdefiniowano stopnie wzmocnienia odpowiadające zarysowaniu elementu, uplastycznieniu zbrojenia zwykłego i momentu odpowiadającego granicznemu ugięciu. Tabelaryczne zestawienie parametrów i wyników otrzymanych z badań przeprowadzonych w innych ośrodkach naukowych (poza Politechniką Łódzką) podano w załączniku Z0. Szczegółowa analiza odtworzonych wyników badań w ujęciu liczbowym z podziałem na analizowane parametry badawcze stanowi w pewnym sensie zamknięcie rozdziału 3. Podsumowaniem tego rozdziału jest dokonana ocena wpływu stopnia zbrojenia kompozytowego i stalowego na poziom wykorzystania materiału FRP, na nośność elementu, na uplastycznienie zbrojenia stalowego, na moment rysujący i ograniczenie ugięć elementu.

W rozdziale 4 przedstawiony został program własnych badań doświadczalnych przy którego opracowaniu uwzględniono wyniki i wnioski wynikające z dotychczas przeprowadzonych badań w innych ośrodkach naukowych. Głównym parametrem był poziom wstępnego obciążenia (ciężar własny oraz inne obciążenie zewnętrzne) elementu przed wykonaniem wzmocnienia. Stopień wytężenia płyt wynosił 25% i 14% nośności elementu niewzmocnionego (tylko ciężar własny) oraz 76% nośności elementu (ciężar własny i obciążenie zewnętrzne). Obciążenie było utrzymywane na stałym poziomie podczas wzmacniania płyt jak i wiązania zaprawy klejowej.

W rozdziale tym przedstawiono charakterystykę badanych elementów i sposób ich wykonania. Podano opis stanowiska badawczego, przyjętą metodę wykonania wzmocnienia oraz przyjętą metodykę badań doświadczalnych. Szczegółowo opisano wszystkie czynności związane z wykonaniem wzmocnienia 7 płyt na stanowisku badawczym w pozycji sufitowej, w obu analizowanych stanach wstępnego obciążenia. Elementy wzmocniono za pomocą pojedynczej taśmy CFRP o przekroju 100 x 1,2 mm. Projektowane wstępne odkształcenie taśmy wynosiło 5 %, co stanowi 30% wytrzymałości taśmy na rozciąganie. Do wykonania naciągu taśm zastosowano system kotwiąco-sprężający firmy S&P, który był demontowany po uzyskaniu przez klej żądanej

wytrzymałości, tj. po 16 godzinach od przyklejenia taśmy. W przypadku dwóch płyt wzmocnienie wykonano bez zastosowania kleju na odcinku taśmy między zakotwieniami. Ponadto jedną płytę wzmocniono z redukcją naciągu bez mechanicznego zakotwienia. Po wprowadzeniu wstępnego naprężenia, taśmę przyklejono w środkowej części płyty na długości 2,6m. Po upływie 72 godzin na końcach części przyklejonej taśmy założono stalowe obejmy dociskające i zdemontowano system sprężający wraz z płytami kotwiącymi. Wolne fragmenty taśmy na obu jej końcach długości 1,0 m przyklejono do powierzchni betonu w sposób bierny. Stalowe obejmy zdemontowano po upływie kolejnych 3 dni.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych. Dla materiałów podstawowych, tj. betonu, stali zbrojeniowej, taśm z włókien węglowych i zaprawy klejowej, zestawiono kompleksowo wszystkie wyniki charakteryzujące właściwości mechaniczne materiałów zastosowanych do wykonania płyt i ich wzmocnienia. Podano stosowne wykresy, tablice i zilustrowano wykonane próbki do badania taśmy CFRP oraz zaprawy klejowej S&P Resin 220, jak również przedstawiono widok maszyny wytrzymałościowej UFP 400 podczas prowadzonych badań eksperymentalnych.

Kompleksowe dane dotyczące wszystkich pomierzonych parametrów podczas badania 7 płyt zestawiono w załącznikach Z1 do Z7, zachowując tę samą kolejność:

- przekrój podłużny i poprzeczny płyty z rozmieszczeniem zbrojenia zwykłego i układem sił obciążających,
- zestawienie charakterystycznych parametrów dla danej płyty,
- rozwój odkształceń betonu otrzymanych z zapisów komputerowych w zależności od zewnętrznego obciążenia,
- rozwój odkształceń taśmy CFRP rejestrowanych za pomocą tensometrów elektrooporowych TFs-5 o bazie 5 mm, w zależności od zewnętrznego obciążenia,
- rozwój pionowych przemieszczeń elementu, rejestrowanych za pomocą przetworników przemieszczeń liniowych o zakresie 50 mm, w zależności od zewnętrznego obciążenia,
- rozwój odkształceń betonu na wysokości dolnego i górnego zbrojenia oraz pionowych przemieszczeń płyty w zależności od odkształceń taśmy w procesie jej naprężenia,
- rozwój odkształceń w stali zbrojeniowej rejestrowanych za pomocą tensometrów elektrooporowych TFs-5 o bazie 5 mm, w zależności od zewnętrznego obciążenia.

W zasadniczej części pracy omówiono mechanizmy zniszczenia elementów i przeanalizowano zarysowanie, odkształcenia oraz ugięcia elementów.

W rozdziale 6 Doktorant przeprowadził analizę wyników otrzymanych z badań własnych, koncentrując się wokół następujących zagadnień:

- wpływ istniejącego zbrojenia zwykłego na stopień wzmocnienia elementu,
- wpływ stopnia naprężenia kompozytu na efektywność wzmocnienia,
- wpływ wstępnego wyężenia elementów badawczych przed wzmocnieniem, na efektywność wzmocnienia.

Ponadto Autor rozprawy ustosunkował się do wpływu takich czynników jak obecność zaprawy klejowej pomiędzy kompozytem a powierzchnią wzmacnianego elementu i obecność blach kotwiących na pracę wzmacnianego elementu żelbetowego.

W rozdziale 7 przedstawiono model nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych (opracowany przez prof. Czkwianianca i prof. Kamińską w 1995 roku) rozbudowany o moduł obliczania elementów wzmocnionych przy użyciu materiałów FRP z uwzględnieniem analizy stanu wyężenia konstrukcji przed wzmocnieniem, w trakcie wzmocnienia i po wzmocnieniu aż do zniszczenia pod wpływem zewnętrznego obciążenia. Autor pracy podaje założenia i opis modelu obliczeniowego oraz weryfikację doświadczalną wyników otrzymanych z analiz obliczeniowych. Ponadto w rozdziale tym zaproponowano model inżynierski do oszacowania nośności na zginanie przekroju żelbetowego wzmocnionego materiałem FRP, bez wstępnego wyężenia elementu przed wzmocnieniem. Rozdział 7 stanowi zatem podsumowanie dokonań Doktoranta, który w rozdziale 8 przedstawił wnioski końcowe wynikające z przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz kierunki dalszych prac.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że przyjęty układ i sposób prezentacji treści jest logiczny, typowy dla prac o charakterze doświadczalnym. Rozprawa napisana jest dobrą polszczyzną, strona graficzna na bardzo dobrym poziomie. Podczas studiowania pracy zauważono pewne usterki redakcyjne, nie mające większego znaczenia dla wartości rozprawy. Dobór pozycji literaturowych jest właściwy i wystarczający, jakkolwiek z uwagi na specyfikę pracy należałoby sięgnąć do niektórych prac dotyczących wzmacniania konstrukcji żelbetowych za pomocą stalowych cięgien sprężających.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Ocena doboru tematu pracy

Przyjęcie tak sformułowanego tematu pracy doktorskiej należy uznać za bardzo ambitną, w pełni uzasadnioną próbę rozwiązania zagadnień bardzo aktualnych pod względem naukowym, jak również pod względem praktycznym. Do uszkodzenia konstrukcji żelbetowych najczęściej dochodzi w wyniku postępującego procesu ich degradacji spowodowanego wieloletnim oddziaływaniem środowiska lub warunków eksploatacyjnych obiektu. Powodem uszkodzenia konstrukcji lub ich elementów, mogą być również błędy projektowe i wykonawcze. W ostatnich latach coraz częściej wzmacniane są konstrukcje w wyniku prowadzonych rekonstrukcji istniejących obiektów, co spowodowane jest zmianą ich przeznaczenia lub chęcią uzyskania większej ich nośności.

Aktywne wzmocnienie istniejących konstrukcji żelbetowych za pomocą sprężenia, czyli zastosowania stalowych cięgien lub materiałów FRP jest najbardziej skuteczną i efektywną metodą wzmocnienia.

3.2. Tezy pracy

Podstawową tezę pracy można sformułować następująco: wzmocnienie konstrukcji żelbetowych na zginanie przy użyciu naprężonych kompozytów polimerowych CFRP, nawet przy

silnym obciążeniu tych konstrukcji przed wzmocnieniem, jest wysoce efektywne. Aby udowodnić tak postawioną tezę Autor rozprawy sformułował następujące cele pracy:

- analiza wpływu stopnia istniejącego zbrojenia zwykłego na zachowanie się elementów pod obciążeniem w stanie granicznym użytkowalności i nośności, jak i na stopień wzmocnienia elementów na zginanie,
- analiza wpływu obecności zaprawy klejowej na odkształcalność i nośność wzmocnionych elementów,
- opracowanie modelu obliczeniowego, który stałby się podstawą procedury projektowania wzmocnień na zginanie elementów żelbetowych z uwzględnieniem historii ich obciążenia przed wzmocnieniem.

Doktorant sprecyzował również zakres pracy, w którym kluczowym elementem było przeprowadzenie badań doświadczalnych na 7 płytach żelbetowych, wykonanych w laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej oraz dokonanie stosownych analiz.

Pod względem merytorycznym teza i cele pracy zostały sformułowane prawidłowo, a przyjęty i zrealizowany program badań doświadczalnych potwierdził ich zasadność.

3.3. Badania doświadczalne

W ramach przyjętego programu badań doświadczalnych przewidziano wykonanie 7 płyt o przekroju poprzecznym 0,22 x 0,50 m długości 6,5 m z betonu klasy C30/37. Pięć płyt z serii A i B zazbrojono w strefie rozciąganej czterema prętami o nominalnej średnicy 12 mm. Dwie płyty z serii C zazbrojono czterema prętami o średnicy 16 mm. Zbrojenie górne we wszystkich płytach wykonano z czterech prętów średnicy 8 mm. Na całej długości płyt, za wyjątkiem środkowej części rozpiętości 1,2 m zastosowano strzemiona zamknięte z prętów o średnicy 8 mm w rozstawie co 0,15 m. Betonowa otulina prętów podłużnych wynosiła 28 mm.

Z opisu badań można wnioskować, że płyty betonowano w 3 seriach A, B i C. Przed przystąpieniem do badania płyt określono właściwości mechaniczne stali zbrojeniowej, taśm z włókien węglowych i zaprawy klejowej. Parametry wytrzymałościowe betonu wyznaczono w dniu badania elementów, a otrzymane wyniki zestawiono w tabelicy 5.1. W tabelicy tej nie podano wytrzymałości betonu na ściskanie f_c dla płyty 6/C (B16-asp.) Wartość tej wytrzymałości jest natomiast zamieszczona w tabelicy 6.1.

W pracy nie podano składu mieszanki betonowej ani kolejności betonowania i badania poszczególnych płyt. Przypisanie elementów do poszczególnych serii nie oznacza że płyty były betonowane jednocześnie po 2, 3 i 2 sztuki. Na podstawie wartości wytrzymałości betonu na ściskanie, można wnioskować że 2 płyty z serii A były zabetonowane jednocześnie. Z uwagi na niespełnienie warunków wytrzymałościowych badania elementów zostały przesunięte w czasie. Nie oznacza to, że właśnie te płyty badane były w pierwszej kolejności.

Przeprowadzone badania doświadczalne są bardzo dobrze udokumentowane, niemniej jednak po dokładnym zapoznaniu się z podanymi wynikami nasuwają się pewne niejasności:

Płyta B12-asp

- W przedstawionych materiałach brak tablicy obrazującej rozwój odkształcalności taśmy w procesie jej wstępnego naprężania. Na jakiej podstawie podano w tablicy Z.1.3. wartości odkształceń w taśmie na poziomie 5,2 ‰ przed rozpoczęciem zewnętrznego obciążenia płyty do wartości $2F = 7,3 \text{ kN}$?
- Czy mierzono wygięcie płyty i odkształcenia betonu podczas wzmacniania elementu (naprężenia taśmy)? Jeśli tak, to jakie wystąpiły zmiany w stosunku do wartości zarejestrowanych przed rozpoczęciem badań zasadniczych. Z danych zamieszczonych w tablicy 5.5 wynika, że do zewnętrznego obciążenia płyty przystąpiono dopiero po 33 dniach.
- Czy były prowadzone pomiary odkształceń stali zbrojeniowej podczas obciążania płyty?

Płyta B12-sp

- Z danych zamieszczonych w tablicy Z.2.5 wynika, że w rezultacie wzmocnienia płyty jej wygięcie w punkcie 5 (oś płyty) wyniosło 6,6 mm, a średnie odkształcenie taśmy 5,02%. Ponadto w tym samym stanie obciążenia, w strefie czystego zginania, na poziomie górnego zbrojenia płyty w punktach R_{C1} i R_{C5} uwidoczniły się rysy o szerokości 0,036 mm. Z odkształceń betonu pomierzonych na poziomie dolnego zbrojenia płyty w punktach R_{t5} , R_{t6} , R_{t7} , R_{t8} i R_{t9} wynika, że zaciśnięte zostały pionowe rysy o szerokości rzędu 0,075 mm. Czy przed przystąpieniem do wzmocnienia płyty a potem jej zewnętrznego obciążania prowadzono ciągłą rejestrację rozwoju rys z pomiarem ich szerokości?
- Do badań zasadniczych przystąpiono po 21 dniach (tablica 5.5) od wzmocnienia płyty. Podane średnie wartości odkształceń taśmy wynosiły 4‰ (w chwili wzmocnienia $\varepsilon_{fp} = 5,02\text{‰}$). O czym to może świadczyć?
- Jak kształtowały się średnie wartości odkształceń taśmy na jej długości i współczynniki zmienności, dla charakterystycznych (wybranych) poziomów obciążenia w płytach B12-asp i B12-sp?
- Czy były prowadzone pomiary odkształceń stali zbrojeniowej podczas obciążania płyty?

Płyta B12-asp-e

- Z danych zamieszczonych w tablicy Z.3.2 wynika, że przy zewnętrznym obciążeniu płyty o wartości $2F = 8,3 \text{ kN}$, na poziomie dolnego zbrojenia płyty wystąpiły rysy w bazach pomiarowych R_{t3} , R_{t5} , R_{t9} i R_{t11} . W miarę postępującego procesu obciążania płyty do wartości $2F = 20 \text{ kN}$, wystąpiły kolejne rysy we wszystkich bazach pomiarowych. Do tego samego wniosku można dojść na podstawie analizy wyników otrzymanych z pomiarów wykonanych ręcznie za pomocą czujnika nasadowego (tablica Z.3.6). Maksymalna szerokość rysy mogła osiągnąć wartość 0,5 mm. Odkształcenia zarejestrowane w dolnych prętach zbrojeniowych (tablica Z.3.5) świadczą o wystąpieniu w tym etapie obciążenia naprężeń w stali rzędu 399 MPa, które pod naciągnięciem taśmy zostały zredukowane do wartości 272 MPa. Na poziomie górnego zbrojenia zarejestrowano wyłącznie odkształcenia ściskające w betonie. Z danych zamieszczonych w tablicy Z.3.6 można również wnioskować,

że w bazach pomiarowych 12 i 18 mamy do czynienia z mikrorysami powstałymi w pobliżu strzemion w okresie dojrzewania betonu. Już przy zewnętrznym obciążeniu $2F = 12,3 \text{ kN}$ widoczne są w tych przekrojach większe odkształcenia ściskające w betonie.

Zastanawiający jest fakt, iż w wyniku naprężenia taśmy nie nastąpiła redukcja naprężeń ściskających na górnej krawędzi płyty a wprost przeciwnie, zarejestrowano wzrost odkształceń ściskających na poziomie górnego zbrojenia. Oznaczałoby to, że obciążenie zewnętrzne wywołuje trwały stan naprężeń ściskających w górnej strefie przekroju, pomimo znacznej redukcji ugięcia płyt.

- Maksymalne odkształcenie taśmy w wyniku jej naprężenia osiągnęło wartość $5,0\text{‰}$, która spadła do poziomu $4,7\text{‰}$ przed rozpoczęciem obciążania wzmacnianego elementu.
- Ugięcie płyty zostało zredukowane o 15 mm w wyniku naprężenia taśmy.
- Rysy na poziomie dolnego zbrojenia zostały częściowo zaciśnięte, co wyraża się spadkiem średniej wartości odkształcenia $\varepsilon_{t,avg}$ z poziomu $1,73\text{‰}$ do $1,27\text{‰}$. Średnie ściskające odkształcenia betonu na poziomie górnego zbrojenia wzrosły w wyniku naprężenia taśmy z wartości $\varepsilon_{c,avg} = -0,21\text{‰}$ do $-0,32\text{‰}$.
- Proszę o bardziej szczegółowe przedstawienie morfologii rys w kolejnych etapach obciążenia płyty (rys 5.10 nie jest czytelny), z podaniem szerokości rys (jeśli były mierzone). Ponadto proszę opisać sposób wywołania zewnętrznego obciążania płyty. W jakim stopniu było podatne przyłożone obciążenie w okresie naprężenia taśmy i czasu wiązania zaprawy klejowej.

Płyta B12 sp-e

- W analizowanej płycie można stwierdzić analogiczne zachowanie się elementu jak w przypadku płyty B12-asp-e. Otrzymane ugięcie płyty od zewnętrznego obciążenia $2F = 20 \text{ kN}$ wynosiło $52,8 \text{ mm}$ ($56,7$ dla płyty B12-asp-e), natomiast jej wygięcie w wyniku naprężenia taśmy z początkowej wartości $17,6 \text{ mm}$ spadło do $12,8 \text{ mm}$ po stabilizacji wzmocnienia.
- Odkształcenia w dolnych prętach zbrojeniowych zarejestrowano na nieco niższym poziomie (o 10%) dla stanu obciążenia $2F = 20 \text{ kN}$ i po sprężeniu, niż w przypadku analogicznej płyty z zaprawą klejową (B12-asp-e).
- Należy podkreślić fakt wprowadzenia maksymalnych odkształceń początkowych w taśmie tylko $\varepsilon_{fp} = 4,7\text{‰}$ i odnotowanym spadku do wartości $4,2\text{‰}$. Odkształcenie taśmy otrzymane w wyniku zewnętrznego obciążenia $\varepsilon_{f,test} = 5,2\text{‰}$ wobec wartości $6,4\text{‰}$ otrzymanej w przypadku elementu B12-asp-e.
Co może być tego przyczyną? Wartość początkowego odkształcenia taśmy w sposób istotny wpływa na efektywność wzmocnienia elementu.

Płyta B12-a

- Występujące rysy o szerokości $0,05 \text{ mm}$ w bazach pomiarowych 12 i 18 (tablica Z.5.7) na poziomie dolnego zbrojenia zostały zaciśnięte w wyniku naprężenia taśmy do średniej

wartości odkształcenia $\varepsilon_{fp} = 5,1\%$. Mikrorysy na poziomie górnego zbrojenia w bazach pomiarowych 9, 11, 18, 20 (o szerokości rzędu $0,036 \div 0,048$ mm) zostały otwarte w wyniku naprężenia taśmy, a następnie były stopniowo zaciskane pod wpływem zewnętrznego obciążenia.

- Przy maksymalnym odkształceniu taśmy $5,1\%$, wygięcie płyty wyniosło $11,1$ mm, po czym spadło do $9,2$ mm.
- Naprężenie ściskające w dolnym zbrojeniu określone na podstawie pomierzonych odkształceń podczas sprężania płyty wyniosło 57 MPa.
- Odkształcenie taśmy zarejestrowane podczas obciążenia zewnętrznego wyniosły $\varepsilon_{f,test} = 6,3\%$ (tablica Z.5.3)
- Należy zwrócić uwagę, na charakterystyczny, odmienny od pozostałych przypadków, rozkład odkształcenia w taśmie na jej długości, w kolejnych etapach obciążenia do zniszczenia.

Płyta B16-asp

- Zachowanie płyty analogiczne jak w przypadku elementu B12-asp. Podczas naprężenia taśmy do wartości odkształcenia $\varepsilon_{fp} = 4,89\%$
- Stwierdzono zaciskanie rys ($0,04$ mm) na poziomie dolnego zbrojenia i nieznaczne rozwieranie mikrorys ($0,02$ mm) na poziomie górnego zbrojenia. Wygięcie płyty w wyniku sprężenia wyniosło $4,8$ mm, natomiast początkowe odkształcenie taśmy $\varepsilon_{fp} = 4,89\%$ spadło do wartości $4,79\%$. Wyznaczone odkształcenie taśmy podczas badań $\varepsilon_{f,test} = 8,1\%$

Płyta B16-asp-e

Zachowanie płyty analogiczne jak w przypadku elementu B12-asp-e.

- Odkształcenia betonu na poziomie dolnego zbrojenia w wyniku przyłożonego zewnętrznego obciążenia $2F = 34,3$ kN, potwierdzają wystąpienie wielu rys o szerokości dochodzącej do $0,53$ mm. Naprężenie w dolnym pręcie wyznaczone na podstawie pomierzonych odkształceń osiągnęło znacząca wartość rzędu 528 MPa, która w wyniku przyłożonego sprężenia została zredukowana do poziomu 433 MPa.
- Ugięcie elementu od zewnętrznego obciążenia $2F = 34,1$ kN wynoszące w osi elementu $60,9$ mm zostało zredukowane, w wyniku naprężenia taśmy, do wartości 50 mm.
- Odkształcenia ściskające betonu zarejestrowane na poziomie górnego zbrojenia dla zewnętrznego obciążenia $2F = 34,1$ kN wynoszące na odcinku czystego zginania $0,40\%$ nie uległy redukcji w wyniku naprężenia taśmy. Wprost przeciwnie, analogicznie jak w przypadku płyty B12-asp-e odkształcenia wzrosły, osiągając w stanie granicznym nośności wartość rzędu $0,7\%$
- Zarejestrowane w wyniku sprężenia maksymalne odkształcenie taśmy wyniosło $4,9\%$, natomiast dalszy przyrost odkształceń taśmy w wyniku zewnętrznego obciążenia $\varepsilon_{f,test} = 6,8\%$

- Czym można uzasadnić większe wygięcia badanej płyty w wyniku naprężenia taśmy niż to miało miejsce w przypadku płyty B16-asp?

4. Uwagi i spostrzeżenia

Podczas studiowania rozprawy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne i spostrzeżenia:

- Usystematyzowanie przez Doktoranta danych z badań doświadczalnych wykonanych w innych ośrodkach naukowych stanowiło dużą trudność z uwagi na konieczność odczytywania niektórych informacji drogą pośrednią, np. z wykresów.
- Elementy badawcze różniły się w sposób istotny wymiarami, stopniem zbrojenia (od 0,19% do 1,79%), wytrzymałością charakterystyczną betonu na ściskanie f_{ck} (od 16 MPa do 57 MPa), wytrzymałością na rozciąganie f_{ctm} (od 1,9 do 5,2 MPa) i modułem sprężystości.
- Autorzy badań nie podawali historii obciążenia elementów, ani stanu zarysowania w chwili wykonywania wzmocnienia.
- W większości przypadków elementy w chwili wzmacniania utrzymywane były w pozycji odwróconej, czyli nie odpowiadały rzeczywistej pracy konstrukcji.

W świetle przedstawionych faktów należy wysoko ocenić dokonania Doktoranta zmierzające do wyciągnięcia konkretnych wniosków w zakresie otrzymanych wyników i sformułowania programu badań własnych. Nie można się jednak zgodzić ze stwierdzeniem, że beton nie miał wpływu na efektywność wzmacniania badanych elementów.

Przed podjęciem decyzji o wzmacnianiu danej konstrukcji bądź też elementu konstrukcyjnego, musi być dokonana ocena stanu technicznego konstrukcji z podaniem jakości i wytrzymałości betonu, rodzaju i stopnia zbrojenia oraz stanu zarysowania i ugięć. Należy również rozważyć możliwość odciążenia konstrukcji w okresie jej wzmacniania.

Prowadzenie badań doświadczalnych na elementach żelbetowych wykonanych z betonu o charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie 16,0 MPa, w przypadku stosowania aktywnego wzmacniania za pomocą stalowych cięgien sprężających lub naprężonych materiałów FRP, jest dużym nieporozumieniem. Z uwagi na zachodzące zjawiska reologiczne musi być przeprowadzona analiza możliwości utrzymania wprowadzonej siły naciągowej. Zagadnieniem z tym związanym jest pewność i niezawodność stosowanych zakotwień i systemów kotwiących. Stosowanie cięgien oraz taśm FRP z przyczepnością czyli osadzonych za pośrednictwem zaprawy klejowej musi być poprzedzone odpowiednim przygotowaniem podłoża (jego wyprofilowaniem) i doświadczalnym określeniem wytrzymałości betonu na odrywanie. W przypadku gdy mamy do czynienia ze zginanymi elementami o dużym stanie wyężenia, znaczącej liczbie rys, a zatem małym ich rozstawie i bardzo zróżnicowanej szerokości, w projektowanym wzmocnieniu nie można ograniczyć się tylko do samego sprężenia elementu. Należy bowiem w pierwszej kolejności odtworzyć element konstrukcyjny, co może wymagać uzupełnienia powierzchni stali zbrojeniowej, wypełnienia mieszanką betonową ubytków a następnie iniekcji istniejących rys.

W prezentowanej rozprawie Doktorant udowodnił postawioną tezę i wykazał wpływ pozostałych rozważanych czynników na efektywność wzmocnienia. We wnioskach z badań doświadczalnych (punkt 8.1, str. 139) Doktorant stwierdził: „**najczęściej występującym sposobem**

zniszczenia było odspojenie taśmy rozpoczynające się w środkowej części elementu w sąsiedztwie pionowych rys od zginania". Wynika stąd jednoznacznie, że wpływ zarysowania elementu na efektywność wzmocnienia za pomocą naprężonych taśm FRP musi być podjęty w dalszych pracach badawczych.

Niezbędnym zatem jest wprowadzenie do przedstawionych przez Doktoranta (p.82., str. 141) kierunków dalszych badań, zagadnień związanych z iniekcją rys żywicami epoksydowymi. Planowane badania doświadczalne należałoby przeprowadzić na serii elementów wykonanych z betonu klasy C30/37 lub wyższej, przyjmując 3 stopnie zbrojenia, np: 0,5; 1,0 i 1,5 %. Do realizacji musi być zastosowany niezawodny system kotwiący taśmy węglowe. Wskazane jest wykonanie projektowanych elementów w jednym cyklu betonowania uwzględniając w nich elementy referencyjne. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych badań powinny dać w pełni jakościową ocenę zjawiska, a tym samym będzie podstawa do opracowania finalnej procedury dotyczącej projektowania i realizacji wzmocnień żelbetowych elementów za pomocą naprężonych taśm z włóknami węglowymi.

Pytania szczegółowe:

- W załączniku Z.0, w tabelarycznych zestawieniach parametrów i wyników poszczególnych badań obcych podano średnie wartości wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ctm} . W jaki sposób wartości te zostały wyznaczone?
- Na rysunkach 74 a, b, c, d, e (str. 134)porównano wyznaczone doświadczalnie z obliczonymi zależności obciążenie-krzywizna. Jakie parametry betonu przyjęto w modelu obliczeniowym dla kolejno analizowanych płyt?
- Wśród badanych płyt nie było elementu referencyjnego. W jaki sposób określono efektywności wzmocnienia poszczególnych płyt wyrażone współczynnikami η_u , η_{cr} , η_{sy} , $\eta_{v,uls}$?
- Z przeprowadzonych badań własnych wynika ze wygięcia płyt, silnie obciążonych ($0,76F_{u0}$), w wyniku naprężenia taśm z włóknami węglowymi są większe niż wygięcia płyt obciążonych tylko ciężarem własnym. Z czego to wynika?
- Jakie można osiągnąć korzyści iniekując rysy żywicami epoksydowymi przed wykonaniem wzmocnienia żelbetowych elementów naprężonych taśmami z włóknami węglowymi?

Poniżej zestawiono błędne sformułowania i usterki językowe dostrzeżone podczas studiowania recenzowanej pracy:

- str.7 – w spisie treści punkt 2.7.8 – winno być (...)bezkotwowy system(...)
- str. 22, 4d – Autor cytuje pracę Czarneckiego, której brak w spisie literatury
- str. 23, 9d – winno być (...)wyniki i ich analiza zostały opisane(...)
- str. 37, 5g – winno być (...)z blach stalowych grubości 20 mm oraz umieszczonych między nimi blach(...)
- str. 45, rys. 3.1 – oznaczenie liczby prętów zbrojeniowych - jest $3\phi 1$, nie wiadomo co powinno być wpisane
- str. 46, 7d – winno być (...)mogą być obarczone znacznym błędem.

- str. 46, 11 d – należy połączyć tekst
- str. 54, 7g – zdanie niejasne, (...)do którego końców przyklejony, zakotwiony był kompozyt.
- str. 55, 1g – winno być (...)poziom naprężenia mat (...)
- str. 56, 2g – winno być (...)na obecność zakotwienia(...)
- str. 56, 11g – winno być (...)z nielicznych badań doświadczalnych(...)
- str. 56, 2d – winno być (...)wynosiło 10 ‰(...)
- str. 63, 1g – winno być (...)elementy wstępnie obciążone i odciążone(...)
- str. 63, 7g – winno być (...)techniką czynną(...)
- str. 63, 8g – winno być (...)i rozpiętości 7500 mm(...)
- str. 63, 2d – winno być (...)wzmocnionej taśmą o wstępnym odkształceniu 6‰(...)
- str. 65, 7g – winno być (...)poziom naprężenia mat wynosił(...)
- str. 65, 3g – winno być (...)skuteczne, niemetalicznym(...)
- str. 65, 1d – winno być (...)przedstawiono na rysunku 3.30(...)
- str. 69, 3d-1d – zdanie nie jest zrozumiałe
- str. 73, 1d – winno być (...)stanu ugięć jak i zarysowania elementu(...)
- str. 74, 1g – winno być (...)3.1.13 Yang i inni, 2009.
- str. 74, 3g – winno być (...) osiem elementów wzmocniono(...)
- str. 74, 8g – winno być (...)poprzez ściśnięte dwie blachy stalowe(...)
- str. 78, 6g – winno być (...)dwie lub cztery wstępnie naprężone taśmy(...)
- str. 79, 1g – winno być (...)Parametrami zmiennymi oprócz(...)
- str. 80, 4g – winno być (...)przytrzymywana była poprzez ściśnięte dwie blachy(...)
- str. 81, 7g – winno być (...)Wzrost obciążenia przy uplastycznieniu zbrojenia tradycyjnego wyniósł od 28%(...)
- str. 81, 9g – winno być (...)który osiągnął wartość(...)
- str. 81, 6d – winno być (...)które osiągnęło(...)
- str. 87, tab. i – winno być (...)Historia elementu przed wzmocnieniem.
- str. 89, 6d – winno być (...)który rośnie wraz ze zmniejszeniem się(...)
- str. 101, 2d – winno być (...)osiągniętego przemieszczenia szczęki(...)
- str. 119, 11d – winno być (...)dla odpowiadających płyt z przyklejonym kompozytem(...)
- str. 129, 3d – winno być (...)obecność zakotwienia nie miała wpływu. Wartości przyrostów(...)
- str. 132, 4d – winno być (...) ε_{s20} i ε_{s10} (...)
- str. 133, 2g – winno być (...)na skutek silnego naprężenia taśm(...)
- str. 133, 5d – winno być (...)pomierzonymi na dwóch poziomach odległych od siebie o wartość h' (m).
- str. 136, wzór 7.16 – winno być M_{RK}
- str. 141, 5g – winno być (...)Badania strat siły sprężającej w taśmie dla dwóch

przypadków: taśmy przyklejonej i taśmy nieprzyklejonej do powierzchni betonu.

W Załącznikach zamieszczono tablice w których zestawiono wartości odkształceń betonu pomierzone za pomocą czujników nasadowych (pomiar ręczny) i przetworników przemieszczeń liniowych z ciągłą rejestracją danych. Określenie „pomiary komputerowe” w tym drugim przypadku nie jest właściwe. Proponuję wprowadzić sformułowanie np. pomiary z ciągłą rejestracją danych.

W Załączniku Z.7 na str. 272 nie opisano tablic Z.7.8 i Z.7.9. Ponadto w tablicy Z.7.7 powinny być zamieszczone odkształcenia betonu w strefie ściskanej, a w tablicy Z.7.8 odkształcenia betonu w strefie rozciąganej.


5. Wnioski końcowe

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Laska rozwiązuje postawione zadanie naukowe. Pracę oceniam bardzo wysoko. Zarówno teza pracy jak i metodyka rozwiązywania wielu problemów oraz wnioski wynikające z dokonanych analiz mają walory naukowe i poznawcze. Uzyskane wyniki mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce inżynierskiej, co jest znaczącym osiągnięciem Autora pracy.

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w rozważanej tematyce oraz odpowiednimi umiejętnościami dotyczącymi planowania i prowadzenia trudnych technicznie badań doświadczalnych. W świetle opisanych faktów stwierdzam, iż Doktorant posiada predyspozycje i odpowiednie przygotowanie do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnośnie do prac doktorskich zawarte w Ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zmianami Dz. U. z 2005 roku, Nr 164, poz. 1365) w części dotyczącej warunków, które musi spełniać rozprawa doktorska (art. 13, us.1) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Laska do publicznej obrony.

Ponadto, uwzględniając osiągnięcia naukowe Doktoranta wyrażające się 25 publikacjami oraz zgłoszeniem patentowym, stawiam wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Laska.



Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK

