

Recenzja

Pracy doktorskiej mgr inż. Moniki Kaszubskiej pt. „Analiza wpływu zbrojenia głównego na nośność ścinania betonowych belek bez zbrojenia poprzecznego”.

Podstawa opracowania: Pismo Pana Prodziekana ds. Nauki Politechniki Łódzkiej dr hab. nt. Artura Zaguły z dnia 05.09.2018r. z prośbą o opracowanie recenzji.

1. Wstęp

Opiniowana praca doktorska składa się z 2 części: Części I – „Zasadniczej” i Części II – „Załącznika”. Część I liczy 208 stron tekstu plus 6 stron „Piśmiennictwa”, obejmującego 150 pozycji w większości cytowanych w tekście oraz 7 stron „Spisu” 300 rysunków (197+103) i 2 stron „Spisu” 49 (36+13) tablic, dotyczących obu części rozprawy.

Część I – „Zasadnicza” rozprawy zawiera 10 rozdziałów plus Streszczenie, Spis i Wykaz podstawowych oznaczeń. Rozdziały pracy to: Wstęp (R1), Stan wiedzy w dziedzinie badań na ścinanie elementów zbrojonych prętami kompozytowymi bez zbrojenia poprzecznego (R2), Program badań własnych (R3), Wyniki i analiza badań doświadczalnych (R4), Analiza wyników badań własnych (R5), Teorie ścinania (R6), Analiza wybranych modeli obliczeniowych na podstawie badań własnych (R7), Procedury normowe (R8), Analiza wytycznych normowych (R9) oraz Wnioski i kierunki dalszych badań (R10).

Część II – „Załącznik” liczy 222 strony i zawiera: Bazę danych (Z1), Szczegółowe wyniki badań materiałowych (Z2), Obrazy zarysowania na podstawie systemu „Aramis” (Z3), Odształcenia betonu (Z4), Przemieszczenia pionowe belek (Z5) oraz Wartości nośności na ścinanie obliczone według wytycznych normowych (Z6).

Rozprawa jest teoretyczno-doświadczalna i dotyczy jednego z ważnych problemów konstrukcji betonowych, a to pracy statyczno-wytrzymałościowej na ścinanie stref przypodporowych belek z betonu, zbrojonych podłużnie prętami stalowymi oraz prętami kompozytowymi GFRC. Takich prac porównawczych wykonano w świecie niewiele a mają

one istotne znaczenie dla szerszego wprowadzenia nowoczesnych materiałów kompozytowych do budownictwa.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Ocena doboru tematu

Temat pracy jest bardzo aktualny. Zagadnienie nośności na ścinanie stref przypodporowych belek żelbetowych, obciążonych siłą poprzeczną V i momentem zginającym M jest zagadnieniem złożonym, trudnym do jednoznacznego opisu, chociaż dla celów praktycznych wystarczająco rozwiązany.

Natomiast wprowadzenie jako zbrojenia podłużnego betonu prętów kompozytowych zamiast prętów stalowych stawia szereg problemów wynikających ze znacznie niższego modułu sprężystości podłużnej E prętów kompozytowych, ich anizotropii i bardzo niskiego modułu sprężystości poprzecznej E_T oraz gorszej przyczepności do betonu.

W rozprawie zastosowano do zbrojenia betonu pręty kompozytowe GFRC, wykonane z włókien szklanych zatopionych w żywicy epoksydowej, pokrytych na powierzchni opłotem z włókna szklanego w postaci żeberk. W porównaniu z innymi materiałami kompozytowymi jak pręty z włókien węglowych CFRC czy aramidowych AFRC są one ekonomicznie uzasadnione. Poza tym w ostatnich latach zbrojenie niemetaliczne FRP zyskuje duże znaczenie z uwagi na wysoką trwałość, znaczną wytrzymałość zmęczeniową i na rozciąganie oraz mały ciężar. Odpowiedź na pytanie czy pręty z kompozytów GFRC mogą stanowić zbrojenie elementów betonowych nie wymagających zbrojenia poprzecznego takich jak płyty, ściany oporowe, pomosty, fundamenty czy stropy tuneli podziemnych jest zatem pilnym wyzwaniem dla nauki i takiemu wyzwaniu służy opiniowana rozprawa.

2.2. Tezy pracy

Tezy pracy są jasno sformułowane w rozprawie, jako:

1. Rodzaj zbrojenia podłużnego wpływa na nośność i sposób zniszczenia belek teowych bez zbrojenia poprzecznego,
2. Stopień zbrojenia podłużnego wpływa na nośność na ścinanie elementów bez zbrojenia poprzecznego,
3. Warunki przyczepności prętów do betonu mogą mieć wpływ na sposób zniszczenia i nośność elementów bez zbrojenia poprzecznego.

Tezy te są oryginalne, ale sformułowane dość ostrożnie z uwagi na wiele czynników niewiadomych, które mogą mieć wpływ na badane zjawiska. W szczególności należy do nich udział poszczególnych składników w nośności betonu na ścinanie bez zbrojenia poprzecznego jak: efekt zazębienia kruszywa i zaczynu cementowego w rysie ukośnej, udział ściskanej strefy

betonu czy efekt siły klockującej. Należy zaznaczyć, że Autorka podeszła do problemu bardzo poważnie i udało się Jej powyższe tezy udowodnić tak na drodze eksperymentalnej jak i teoretycznej.

2.3. Ocena merytoryczna rozprawy

Praca stanowi bardzo logiczny, sekwencyjny i konsekwentny ciąg elementów, które krok po kroku prowadzą Autorkę do udowodnienia tez rozprawy. Oprócz udowodnienia tez Autorka poczyniła też wiele spostrzeżeń dodatkowych, które znacznie pogłębiają naszą wiedzę o mechanizmach ścinania stref przypodporowych w teowych belkach betonowych bez zbrojenia poprzecznego. W rozdziale drugim pracy z szerokiej bazy danych obejmujących 234 badania obce (od 1995r.) wyodrębniła ona 30 programów badań, z których do szczegółowej analizy wzięto tylko elementy belkowe bez zbrojenia poprzecznego. Przytoczyła obszernie opisy 19. z tych programów badawczych, dla których przeprowadziła analizę wpływu na nośność ścinania takich parametrów jak:

- smukłość ścinania a/d ,
- stopień zbrojenia podłużnego $\rho_{l,E}$,
- moduł sprężystości tego zbrojenia,
- wytrzymałość betonu na ściskanie f_c .

Głównym efektem tej analizy jest stwierdzenie, że ważnym czynnikiem tej nośności nie jest stopień ale osiowa sztywność $\rho_{l,E}$ zbrojenia głównego, a także że udział zbrojenia podłużnego i parametrów zmiennych w strefie przypodporowej jest zdominowany wpływem smukłości ściskania $a/d < 2,8$, która decyduje o łukowo-ściągowym charakterze pracy strefy przypodporowej. W belkach o $a/d \geq 2,8$ wyraźnie ujawnia się wpływ wzrostu osiowej sztywności zbrojenia $\rho_{l,E}$ na wyższą nośność na ścinanie. **Wnioski te ukierunkowały częściowo dalsze badania Autorki.**

Badania własne przeprowadziła Autorka na 33 jednoprzęsłowych, swobodnie podpartych belek o przekroju teowym. Belki te jak na warunki badawcze – miały dość duże rozmiary, a to długość 2200 mm i rozpiętość w osiach podpór 1800 mm, szerokość b_{eff} i h_{tot} 400 mm, szerokość środnika $b_w = 150$ mm i wysokość półki $h_f = 60$ mm. Były to zatem belki o przekroju większym niż wynikało to z poprzedniej analizy, gdzie najliczniejszą grupę stanowiły belki o wysokości użytecznej z przedziału 100÷300 mm.

Belki obciążano 1. siłą skupioną w odległości 1100 mm od osi podpory, co zapewniło smukłość ścinania w granicach 2,9÷3,0, i brak efektu łukowo-ściągowego w badanej strefie przypodporowej bez zbrojenia poprzecznego. Druga ze stref przypodporowych, nie

podlegająca szczegółowym badaniom, była silnie zbrojona zbrojeniem poprzecznym na ściskanie. **Taki rodzaj belek i badań zapewniał znaczne poszerzenie wiedzy na temat będący przedmiotem rozprawy.**

W założeniach belki podzielono na 2 serie o zróżnicowanej wytrzymałości betonu na ściskanie, klas C25/30 i C50/60. Na skutek pomyłki w dostawie betonu klasy C50/60 okazało się, że oba betony mają podobną klasę i wytrzymałość walcową na ściskanie odpowiednio $f_{cm} = 31,8$ MPa (klasa C25/30) i 35,9 MPa (klasa C30/37) a różnią się zawartością frakcji piaskowej w kruszywie. Punkt piaskowy w betonie belek I serii wynosił aż 42,3%, natomiast w betonie II serii go nie zbadano, przestając w pracy na lakonicznym stwierdzeniu, że beton ten był „bardziej piaszczysty”. Stwierdzenie to posłużyło potem do wyciągania pewnych, uogólniających wniosków, co uważam za pewien mankament rozprawy, gdyż skład betonu serii II można było dokładnie odtworzyć na podstawie laboratoryjnych badań fizyko-chemicznych.

W serii I wykonano 18 belek (11 zbrojonych prętami GFRC i 7 zbrojonych stalą), w serii II zaś 15 belek (9 zbrojonych prętami GFRC i 6 zbrojonych stalą). W badanych belkach zastosowano 3 różne stopnie zbrojenia podłużnego $\rho_l=1,0\%$, 1,4% i 1,8%, 2 grubości betonowej otuliny (15 mm i 35 mm), a także częściowo: liczbę i średnicę prętów zbrojenia oraz układ zbrojenia (w 1. lub 2. warstwach). Uzyskano w ten sposób bogaty materiał badawczy, który poddano szczegółowej analizie.

Stało się to możliwe dzięki bardzo precyzyjnej metodologii pomiarów, w której zastosowano system pomiarowy SAD 256 współpracujący z czujnikami indukcyjnymi do pomiaru odkształceń betonu oraz system cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS, który rejestrował deformacje powierzchni belek na przeciwległej do zmontowanych na przeciwległej stronie środka rozet, z czujnikami indukcyjnymi.

Do analizy procesu zarysowania i mechanizmów ścinania w badanych belkach podeszła Autorka bardzo metodycznie, rozpoczynając od wyróżnienia 8 typów rys, które powstają w strefie przypodporowej belek bez zbrojenia poprzecznego w trakcie kinetycznego procesu ich niszczenia (wg Cawagnisa i innych, 2015). Pomogło to bardzo Autorce w identyfikacji poszczególnych etapów niszczenia tych stref oraz ich mechanizmów zniszczenia.

Osiągnięciem tej analizy jest stwierdzenie, że **w belkach zbrojonych prętami GFRP wystąpiły 2 rodzaje zniszczenia na ścinanie:** typowe zniszczenie ścinająco-rozciągające oraz zniszczenie na skutek utraty przyczepności zbrojenia do betonu. W tym drugim przypadku, pomimo dezintegracji strefy przypodporowej na skutek odspojenia się prętów od betonu wystąpił na odcinku o smukłości ścinania $a/d=2,9$ efekt łukowo-ściągowy, który (na skutek

dobrego zakotwienia prętów w partii czołowej belek (poza podporą) dał nośność o ok. 40% większą niż w przypadku zniszczenia ścinająco-rozciągającego.

Drugim bardzo ważnym spostrzeżeniem jest, że zniszczenie ścianjąco-rozciągające belek ze zbrojeniem GFRP – na skutek czterokrotnie niższego modułu sprężystości – przebiegało znacznie łagodniej niż w bardzo gwałtownie niszczących się belek ze zbrojeniem stalowym. Oznacza to większą sygnalizacyjność zniszczenia stref przypodporowym ze zbrojeniem kompozytowym.

Badaniami swymi Autorka udowodniła również, że (x):

- stopień zbrojenia podłużnego ma wpływ na nośność ścinania badanych belek, zarówno tradycyjnych belek żelbetowych jak i zbrojonych prętami GFRP,
- zwiększenie stopnia zbrojenia podłużnego ogranicza rozwój zarysowania i redukuje szerokość powstałych rys, ponadto zwiększa sztywność elementów po zarysowaniu, zmniejszając ugięcie badanych belek,
- elementy żelbetowe osiągają znacznie wyższą nośność (średnio o 45%) niż odpowiadające im elementy zbrojone prętami GFRP o tym samym stopniu zbrojenia,
- parametrem, który pozwala na jednolitą analizę wpływu stopnia zbrojenia na nośność i odkształcalności belek jest osiowa, sztywność zbrojenia $\rho_l E$.

Aby dokonać analizy teoretycznej wybranych modeli obliczeniowych na podstawie badań własnych przytoczyła Autorka w rozdziale szóstym 6 teorii ścinania przypodporowych stref belek żelbetowych w ujęciu historycznym oraz obecne teorie ścinania tych stref, wśród których wyróżniła zmodyfikowaną teorię pola naprężeń ściskających (MCFT), teorię ścinania według mechaniki pękania (FMT) oraz modele Mariego, Zhanga, Muttoniego i Yanga, przydatne do analizy nośności na ścinanie elementów ze zbrojeniem kompozytowym a także - model Mariego – do analizy również przekrojów teowych. Mimo różnic w założeniach, wszystkie te modele uwzględniały położenie osi obojętnej przy zginaniu, które zależy od modułu sprężystości zbrojenia podłużnego oraz stopnia tego zbrojenia. Jedynym modelem uwzględniającym zbrojenie kompozytowe oraz teowy kształt przekroju był model Mariego.

Z porównania analizy teoretycznej z wynikami badań własnych uzyskano interesujące wnioski, a mianowicie, że (xx):

- w uogólnionej ocenie modeli obliczeniowych bez podziału na rodzaj zastosowanego zbrojenia podłużnego najlepszą zgodność uzyskały model

Mariego i Muttoniego, dla których wartość współczynnika $\eta = V_{max}/V_{cal}$ jest bardzo bliska 1,0,

- z analizy typu zbrojenia (kompozytowe/stalowe) wynika, że: o ile w przypadku elementów żelbetowych modele Muttoniego, Mariego i Yanga wykazują zbliżone i dość niebezpieczne wyniki (przeszacowanie nośności - $\eta \cong 0,75 < 1,0$), to w wypadku belek zbrojonych prętami GFRP modele Muttoniego oraz Yanga są bardziej zachowawcze (niedoszacowanie nośności - $\eta \cong 1,2 > 1,0$),
- znaczne zbliżenie teoretycznej wartości nośności obliczeniowej dla belek zbrojonych prętami GFRP do wartości doświadczalnych uzyskano w modelu Zhanga ($\eta = 0,8$),
- dla wszystkich stopni zbrojenia uzyskano podobne wartości η w ramach jednego wybranego modelu,
- porównanie modeli Mariego i Yanga wykazało, że różnią się one znacznie w podziale nośności na ścinanie poszczególnych czynników; o ile w modelu Mariego liczą się tylko efekty udziału betonu na ścinanie w niezarysowanej strefie ściskowej betonu oraz zazębiana się kruszywa i szczątkowych naprężeń rozciągających w rysie ukośnej, o tyle model Yanga dużą rolę w nośności przypisuje efektowi zazębiana się kruszywa oraz efektowi siły klockującej, który wg Mariego w elementach nie zbrojonych poprzecznie, nie wystąpi.

Powyższe wnioski (x) i (xx) są istotnymi osiągnięciami opiniowanej rozprawy doktorskiej.

W końcowych dwu rozdziałach pracy zajęła się Autorka jeszcze wybranymi procedurami normowymi do obliczania nośności na ścinanie elementów bez zbrojenia poprzecznego z podłużnym zbrojeniem stalowym (3 procedury) oraz z podłużnym zbrojeniem GFRP (7 procedur). Przeanalizowała te wytyczne w ujęciu badań własnych dla elementów żelbetowych i zbrojonych prętami GFRP oraz w ujęciu badań obcych dla zbrojenia prętami CFRP (99 belek) i GFRP (101 belek). Ta część pracy ma ważne znaczenie dla praktyki projektowej elementów betonowych zbrojonych prętami GFRP (i częściowo CFRP). Wyprowadziła tu Autorka pewne modyfikacje związane z uwzględnieniem niższego modułu sprężystości prętów FRP w porównaniu ze stalowymi oraz co do położenia tzw. przekroju kontrolnego (w odległości d od osi podpory i w odległości a od osi podpory (pod siłą skupioną). W trzech przeanalizowanych wypadkach położenie przekroju kontrolnego pod siłą skupioną okazało się bardziej wiarygodne ($\eta_m \cong 0,9 \div 1,0$).

Wyniki tych analiz są następujące (xxx):

- w wypadku elementów z badań własnych ze zbrojeniem kompozytowym wartość nośności na ścinanie została najlepiej odwzorowana przez fib Bulletin dla normy brytyjskiej oraz normę włoską, dla których średni stopień zgodności wyniósł odpowiednio $\eta_m=1,03$ oraz $\eta_m=0,96$; dla elementów z badań obcych najlepszą zgodność uzyskano dla projektu normy Eurokod 2 (CEN, 2014) - $\eta_m=0,96$ dla prętów CFRP i $\eta_m=1,02$ dla prętów GFRP,
- wśród analizowanych procedur obliczeniowych dla elementów ze zbrojeniem kompozytowym najbardziej zachowawcze okazały się wytyczne amerykańskie (ACI 440), dla których $\eta_m=1,49$ – z badań własnych i $\eta_m=1,76$ (CFRP) i $\eta_m=2,00$ (GFRP) – z badań obcych,
- dla elementów żelbetowych najlepszą zgodność z wynikami badań własnych uzyskano dla podejścia zaproponowanego w drugim poziomie przybliżenia prenormy model Code 2010 - $\eta_m=0,98$ pod warunkiem obliczenia odkształcenia podłużnego ε_x pod siłą a nie w odległości d od osi podpory.

Jak wynika z powyższego opisu Autorka zrealizowała w swojej rozprawie założone cele i udowodniła 3 główne tezy rozprawy. Głównym osiągnięciem recenzowanej pracy doktorskiej jest wszechstronna analiza stanu zarysowania i nośności na ścinanie stref przypodporowych belek zbrojonych stalą oraz prętami kompozytowymi GFRP. Analiza ta pozwoliła na sprecyzowanie wniosków (x), (xx) i (xxx), które są istotnymi osiągnięciami pracy doktorskiej. Osiągnięcia te znacznie poszerzają zakres wiedzy na temat będący przedmiotem rozprawy i mogą służyć praktycznym zastosowaniom zbrojenia kompozytowego z prętów GFRP w polskim budownictwie.

Pracę Autorki, Jej poziom wiedzy oraz wnikliwość i skrupulatność w wykonaniu i analizie badań oceniam bardzo wysoko.

2.4. Metodyka badań i zastosowana aparatura badawcza

Nie budzą one żadnych zastrzeżeń. Powszechnie znany jest wysoki poziom badań naukowych w Laboratorium Badawczym Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej i stosowanie najnowocześniejszej aparatury naukowej.

3. Ocena strony formalnej pracy

Praca napisana jest starannie, czytelnym i dobrym językiem. Rysunki i tablice są opracowane bez zarzutu, ułatwiając śledzenie i zrozumienie pracy, Załączniki dokumentują ogrom prac zrealizowanych przez Autorkę.

Przy czytaniu pracy znaleziono szereg drobnych błędów literowych i stylistycznych, które zaznaczono w tekście. Ponadto mam następujące uwagi:

Str. 11⁸ – jest: M_z/J , ma być: M_z/J ,

Str. 12³ – jest: wagi, lepiej: masy,

Str. 24 rys. 2.9. – jest: płaszczyzna, powinno być: powierzchnia,

Str. 25₄, 29₅, 43₈ – różnie zdefiniowano znormalizowaną nośność na ścinanie, raz jako

$$V_{\max}/(b_w d), \text{ drugi raz jako } V_{\max}/(\sqrt{f_c} b_w d), \text{ trzeci raz jako } V_{\max}/\sqrt{f_c} b_w d (\rho_l)^{1/3},$$

Str. 30² – zdanie niedokończone,

Str. 35_{13,14} – rysa ukośna nie mogła przekazywać naprężenia,

Str. 45₂₀ – o jaki przekrój brutto chodzi?

Str. 77⁷ – wprowadzono nie używane już określenie: wytrzymałość słupowa f_c ,

Str. 77 tabela. 4.3 – obliczenie odchylenia standardowego i wariancji dla 2 próbek, to chyba przesada,

Str. 79₁₆ – chodzi chyba o średnią wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu, a nie: zginaniu?

Str. 123⁷ – a także: zarysowalnością betonu zbrojonego,

Str. 126, 127 – wydaje się, że podano za daleko idące wnioski, na podstawie nielicznych badań,

Str. 153⁶ – zdanie niejasne,

Str. 155₄ – czyje jest autorstwo tej adaptacji?

Str. 165 wzory (6-133) i (6-134) – wydają mi się nierealne (rzęd wielkości!),

Str. 166¹²⁻¹³ wzory (6-137) i (6-138) – nie wiadomo czy chodzi tu o wielkość Δ , czy Δ_{cr} ?

Str. 182¹⁻³ – zdanie niejasne.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Główna uwaga krytyczna dotyczy niedopatrzenia, związanego z jakością betonu II serii badań. Zniweczono w ten sposób możliwość oceny wpływu wytrzymałości na ściskanie betonu na nośność strefy przypodporowej badanych belek. Stwierdzenie w pracy, że dzięki temu niedopatrzeniu udało się zaobserwować inny niż przewidziano sposób zniszczenia na ścinanie belek ze zbrojeniem z prętów GFRP (przez utratę przyczepności) jest ważną obserwacją, ale nigdzie w pracy nie udowodniono, że beton serii II miał gorszą przyczepność do zbrojenia, ani że był „bardziej piaskowy”.

4.2. Uwagi budzi sposób określenia odkształcenia $\varepsilon_{cr} = f_{ctm}/E_{cm}$, na podstawie wartości z normy PN-EN 1992-1-1, 2008, a nie na podstawie badań własnych (tu wykorzystano

tylko doświadczalną wartość wytrzymałości betonu na ściskanie). Stąd dane na rysunku 5.3 określające procentowy (b. mały) udział naprężeń rysujących τ_{cr} w wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ctm} nie wydają mi się wiarygodne.

5. Wniosek końcowy

Opiniowaną pracę oceniam bardzo pozytywnie. Autorka wykazała w niej dużą wiedzę, umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, uzdolnienia w kierunku analizy badań własnych i obcych, dużą pracowitość i skrupulatność oraz wręcz pedanterię w opracowaniu wyników badań. Praca ma ważne znaczenie teoretyczne i praktyczne i stanowi ewidentny wkład w dyscyplinę naukową budownictwo, specjalność naukowa konstrukcje betonowe ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania nowoczesnych materiałów kompozytowych jako zbrojenia w konstrukcjach z betonu. Moim zdaniem, z uwagi na trudny temat i jego wielowątkowe rozwiązanie, a także świetne analizy porównawcze wyników badań z istniejącymi w skali światowej modelami, wytycznymi i procedurami obliczeniowymi, praca zasługuje na wyróżnienie.

Uważam zatem, że praca doktorska Pani Moniki Kaszubskiej pt. „Analiza zbrojenia głównego na nośność ścinania betonowych belek bez zbrojenia poprzecznego” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. (Dz. U. Nr 65 z późniejszymi zmianami) i Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018r. i wnoszę dopuszczenie do jej publicznej obrony.

