

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. Kamila Bacharza

pt.: „PROBLEM NOŚNOŚCI NA ŚCINANIE STREFY PRZYPODPOROWEJ BELEK
ŻELBETOWYCH W ASPEKcie BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH I NORM”

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 9 listopada 2016 oraz pismo nawiązujące do tej uchwały podpisane przez Dziekana WBiA Prof. dr hab. inż. Marka Iwańskiego z dn. 15.11.2016 (pismo BD-342/16).

2. Przedmiot, treść pracy i układ redakcyjny pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Bacharza pt. „Problem nośności na ścinanie strefy przypodporowej belek żelbetowych w aspekcie badań doświadczalnych i norm”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Barbara Goszczyńska, prof. PŚw.

Praca składa się ze zwartego opracowania w postaci jednego tomu, liczącego 193 strony, w tym 3 strony streszczenia w języku polskim i 3 strony streszczenia w języku angielskim oraz 4 strony wykazu stosowanych w tekście pracy oznaczeń. Spis literatury obejmuje 111 pozycji oraz 8 norm.

W rozdziale 1 zatytułowanym *Wstęp*, liczącym 18 stron, 7 rysunków i 16 wzorów, Autor wprowadza czytelnika do zagadnień związanych ze ścinaniem w żelbetowych elementach prętowych. Przywołuje fundamentalne prace z tego zakresu (*Ścinanie w żelbecie* - prof. T. Godyski Ćwirko, *Konstrukcje żelbetowe* - prof. B. Bukowski), odnosi się do przebiegu trajektorii naprężeń głównych w belce obciążonej równomiernie i siłą skupioną. Podaje przebieg naprężeń ścinających τ w zależności od faz pracy żelbetowego przekroju. Przeglądu prac związanych ze ścinaniem (r. 1.3) Autor dokonał omawiając wybranych dziewięć głównych parametrów, wpływających na nośność ścinania. Należą do nich m. in. wytrzymałość betonu i stali, wymiary i kształt przekroju poprzecznego, rodzaj i sposób przyłożenia obciążenia, rodzaj zbrojenia poprzecznego i jego zakotwienie. W dalszej części podrozdziału poszczególne parametry zostały zwięźle opisane. Rozdział kończy krótkie podsumowanie opisywanych zagadnień.

W kolejnym rozdziale 2 (29 stron, 15 rys., 54 wzory), Autor dokonał przeglądu ważniejszych modeli i metod obliczeniowych. Opisywane metody podzielono na trzy grupy. Pierwsza z nich to metody, które wykorzystują model kratownicowy, (analogia kratownicowa Mörscha, koncepcja Ahmada-Bakera, Leonhardta i Walthera, Kupfera i Dilgera, Rüscha oraz

Lipskiego). W drugiej grupie opisano metody wykorzystujące stan graniczny niszczenia (w tym Boriszańskiego, Gyengö, Visy, Baya, Wahltera, Kani). W trzeciej grupie znalazły się metody wykorzystujące założenia teorii pól ściskanych (lub jej modyfikacji), metoda Monte Carlo, MES, autorski tarczowy model ścinania S. Goszczyńskiego i A. Wójcickiego oraz propozycje związane z wykorzystaniem sieci neuronowych. Rozdział zakończono jednostronicowym podsumowaniem.

Metody normowe opisano w rozdziale 3 pracy doktorskiej. Rozdział liczy 28 stron, zawiera 2 rysunki i 59 wzorów. Autor opisał procedury normowe dotyczące ścinania zawarte w kilku najważniejszych normach. Przedstawiono następujące procedury: według polskiej normy żelbetowej (PN-B-03264) z roku 1984 opartej na metodzie Boriszańskiego i z roku 2002 wykorzystującej model kratownicowy, według normy PN-EN-1992-1-1 z 2008 r. wykorzystującą model kratownicowy, według normy CEB-*fib* Model Code 2010 (nazwaną przez Autora pre-normą konstrukcji betonowych), według niemieckiej normy DIN 1045-1: 2008 oraz normy amerykańskiej ACI 318-14. Rozdział zakończono półstronicowym podsumowaniem.

Kolejne cztery rozdziały od czwartego do ósmego, dotyczą badań własnych Autora.

W rozdziale 4 (1,5 strony) Autor omówił cel i tezy pracy. Główny cel pracy to porównanie uzyskanych w badaniach wyników doświadczalnych z wynikami obliczonymi według procedur normowych. Autor sformułował sześć tez pracy.

Doktorant przyjął, że na nośność strefy przypodporowej belki żelbetowej ma wpływ rodzaj obciążenia (monotoniczne, cykliczne), schemat statyczny (elementy statycznie wyznaczalne i niewyznaczalne), kąt nachylenia betonowych krzyżulców ściskanych mieści się w granicach wyznaczonych normami i jest zależny od sposobu podparcia oraz od szerokości podpory a wartość $\text{ctg } \theta$ proponowana w normach uznał za parametr korygujący obliczeniowe wartości nośności na ścinanie. Kolejna teza dotyczy przyjęcia zbyt niskich wartości $\text{ctg } \theta$, co może zdaniem Autora skutkować niedoszacowaniem siły podłużnej w zbrojeniu i zbyt małą długością zakotwienia zbrojenia na podporze, powodując poślizg prętów. Całkowita nośność na ścinanie wynika z nośności zbrojenia poprzecznego i nośności betonu.

W rozdziale 5 (23 strony, 37 rysunków) przedstawiono opis własnych badań Autora, szczegóły dotyczące wymiarów i zbrojenia badanych belek. Łącznie badano 18 belek, z czego 17 analizowano szczegółowo. Belkę teową S2T1C-1 wyłączono z dalszych analiz, z uwagi na zbyt duże odchylenia belki pod działaniem obciążenia cyklicznego. Opisano stanowisko badawcze, rodzaj podpór, aparaturę użytą do przeprowadzenia badań. Podano schematy statyczne i schematy obciążeń badanych belek. Autor opisał również szczegóły dotyczące obciążenia monotonicznego (stały przyrost prędkości siły 0,4 kN/min) oraz schematy obciążania cyklicznego.

Dwie belki S2C (o przekroju prostokątnym) oraz belkę S2TC obciążano przez równocześnie działające dwie siły skupione w podanych zakresach obciążeń i częstotliwości. Dwie belki B3C (dwuprzęsłowe) obciążano trzema siłami (dwoma działającymi w jednym prześle i jedną na drugim). Obciążenie zmieniało się sinusoidalnie z przesunięciem fazy o 180°. Łącznie obciążeniu cyklicznie działającemu poddano 5 belek, a monotonicznie działającemu pozostałe 12 belek.

W rozdziale piątym podano szczegółowe dane materiałowe dotyczące wytrzymałości betonu i stali zastosowanej w badaniach. Belki wykonano z betonu klasy C 40/50, wytrzymałość na ściskanie określano na kostkach sześciennych 15×15×15 cm, wytrzymałość

walcową i wytrzymałość betonu na rozciąganie przeliczano ze wzorów normowych. Średnio beton uzyskiwał wytrzymałości na ściskanie kostkowe $56 \div 74$ MPa, co determinowało wytrzymałości walcowe rzędu $45 \div 59$ MPa.

Szczegółowe badania Autor przeprowadził dla stali zbrojeniowej w zakresie, wytrzymałości i modułu sprężystości. Stosowano stal o średniej wytrzymałości 550-650 MPa.

Kolejny rozdział 6 (28 stron, 31 rys., 10 tabel) zawiera wyniki przeprowadzonych przez Autora badań udokumentowane wykresami i zdjęciami elementów po zniszczeniu. Podano eksperymentalne wartości obciążeń niszczących belek, pomierzony kąt θ , siły tnące V i moment zginający M przy zniszczeniu. Podano też naprężenia ścinające uzyskane na podstawie badań. Wyniki obliczeń nośności na ścinanie badanych belek według normy PN-EN-1992-1-1:2008, ACI 318-14 oraz normy CEB-fib Model Code 2010 (poziom I, II i III aproksymacji) podano w podrozdziale 6.2.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono obwiednie sił rozciągających w zbrojeniu podłużnym. Obrazy zarysowania zamieszczone w r. 6.4 uzyskane zostały z optycznego systemu pomiarowego ARAMIS. Autor przedstawił je na tle zbrojenia poszczególnych belek. W ostatnim podrozdziale Autor przedstawił uzyskane wyniki doświadczalne w aspekcie rodzaju zniszczenia, wyodrębniając zniszczenie od zginania, ścinanie ze zginaniem, ścinanie ze ściskaniem i zniszczenie ścinająco-poślizgowe.

Wielokryterialną analizę porównawczą wyników doświadczalnych z uzyskanymi obliczonymi według procedur poszczególnych norm zamieszczono w rozdziale 7 (47 stron, 40 rys., 8 tabel). Analizowano wpływ rodzaju obciążania, szerokości podparcia, długości zakotwienia, kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego na nośność ścinania. Szeroką analizę dotyczącą wpływu kąta θ na nośność strefy przypodporowej z uwagi na nośność zbrojenia poprzecznego, podłużnego a także szerokości rys ukośnych Autor przeprowadził w r. 7.3. Rozważania i dokonane wszelkie porównania zostały udokumentowane wykresami i obrazami zarysowania.

Rozdział 8 (5,5 strony) zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań i analiz. Sformułowane przez Autorkę wnioski końcowe dotyczą oceny wpływu poszczególnych parametrów zmiennych w przeprowadzonych badaniach na nośność strefy przypodporowej i mechanizm niszczenia oraz oceny zgodności analizowanych procedur normowych z wynikami eksperymentalnymi. Autor sformułował trzy praktyczne aspekty uzyskane w wyniku realizacji pracy jak również nakreślił kierunek dalszych badań uzupełniających.

Pracę kończy spis literatury - cytowanych artykułów i książek – 111 pozycji oraz wykorzystanych norm – 8 pozycji.

3. Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana praca doktorska ma charakter eksperymentalno-teoretyczny. Treść pracy ściśle odpowiada jej tytułowi.

Przyjęty temat pracy jak i kierunek jego realizacji uważam za ważny i aktualny. Problem ścinania żelbetowych elementów prętowych, pomimo intensywnie prowadzonych prac w różnych ośrodkach badawczych pozostaje kontrowersyjny. Czego dowodem mogą być wielokrotne zmiany w procedurze wymiarowania podczas opracowywania ostatecznej wersji

normy europejskiej (w zmieniających się draftach normy EN) jak również zróżnicowane założenia, na których oparto procedury w cytowanych przez Autora normach.

Układ pracy jest merytorycznie poprawny. Z tematem pracy doktorskiej są ściśle skorelowane, dobrze sformułowany cel naukowy oraz tezy badawcze. Wszystkie części rozprawy doktorskiej są merytorycznie spójne. Dotyczy to rozdziałów przedstawiających przegląd literatury, modeli obliczeniowych i procedur normowych jak i rozdziałów dotyczących własnych badań oraz analiz Autora.

Na uwagę zasługuje zastosowanie w badaniach doświadczalnych nowoczesnych metod badawczych.

Cel badań został osiągnięty, a sformułowane przez Autora tezy zostały udowodnione. Jednoznacznie też stwierdzam, że opiniowaną rozprawę oceniam jako bardzo dobrą. Poniżej wymienione argumenty stanowią uzasadnienie tej oceny.

Główne osiągnięcia pracy

Za najważniejszy oryginalny dorobek poznawczy Autora uważam:

- Przeprowadzenie doświadczalnych badań belek jedno i dwuprzęsłowych obciążonych monotonicznie i cyklicznie w aspekcie nośności strefy przypodporowej. W literaturze naukowo-badawczej zdecydowanie przeważają badania ścinania na statycznie wyznaczalnych elementach żelbetowych pod obciążeniem monotonicznym. Badania belek statycznie niewyznaczalnych (dwuprzęsłowych) umożliwiło ocenę wpływu schematu statycznego na nośność ścinania belek, zwłaszcza przy obciążeniu cyklicznym, dla którego zaobserwowano najniższe wartości nośności na ścinanie.
- Zastosowanie w badaniach doświadczalnych nowoczesnej metody badawczej polegającej na rejestracji odkształcenia i zarysowania za pomocą bezstykowego optycznego systemu pomiarowego *Aramis* wraz z przetwarzaniem cyfrowych danych wykorzystujących zasady fotogrametrii dwuobrazowej. Umożliwiło to Autorowi na uzyskanie doświadczalnych precyzyjnych map odkształceń wraz z ich kumulacją obrazującą powstawanie i rozwój zarysowania. Uzyskano w ten sposób doświadczalne wartości kąta nachylenia rys ukośnych odzwierciedlających kąt nachylenia krzyżulców ściskanych.

Wprowadzenie do badań kilku zmiennych parametrów (rodzaju obciążenia, schematy statyczne, wymiar przekroju poprzecznego, szerokość podpory) umożliwiło poznanie wpływu tych parametrów na zmianę kąta θ .

- Przeprowadzenie obliczeniowej analizy porównawczej procedur normowych według najważniejszych norm i odniesienie obliczeniowych wyników do wyników doświadczalnych. Wyniki tej weryfikacji są szczególnie cenne w odniesieniu do obciążenia cyklicznego działającego na badane belki. Wyniki analizy pozwalają także ocenić trafność proponowanych w normach procedur.

Uwagi o charakterze dyskusyjnym, pytania

Uwagi ogólne

1. W literaturze naukowo badawczej dotyczącej zagadnienia ścinania podkreśla się wpływ smukłości ścinania na zachowanie się strefy przypodporowej i jej nośność. Autor sam podkreśla dużą wrażliwość: „belki BL-02 na przesunięcie punktu przyłożenia siły, powodujące 34% spadek nośności”

Czy zdaniem Autora można to łączyć ze zmianą smukłości ścinania, czy jest to parametr wpływający na nośność i mechanizm niszczenia?

2. Z badań Leonhardta i Walthera wynika wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego ρ_{sw} na nośność strefy przypodporowej. Czy Autor potwierdziłby ten wniosek? Opis wpływu tego parametru na str. 30 jest bardzo lakoniczny.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano wartości stopnia zbrojenia poprzecznego raczej zbliżone do minimalnych a w dwóch rodzajach belek (BL-02 i B3) stopień zbrojenia był mniejszy od minimalnego. Co było przyczyną takiego doboru zbrojenia poprzecznego?

3. Zastosowanie przez Autora nowej metody badawczej – optycznego systemu pomiaru odkształceń ARAMIS umożliwiło ciągły pomiar odkształceń i pośrednio uzyskanie kształtowania się zarysowania oraz kąta nachylenia rys ukośnych (i udokumentowanie jego zmienności pod wpływem narastającego obciążenia lub obciążenia cyklicznie zmiennego).

Na rysunkach 6-21 do 6-27 podano obrazy zarysowania (oraz kąty nachylenia rys), prawdopodobnie dla obciążenia niszczącego.

Jörg Schlaich w swoich badaniach stwierdził, że kąt nachylenia krzyżulców ściskanych po zarysowaniu zmienia się o około $12\div 15^\circ$ w stosunku do tzw. fazy I, niezarysowanej.

Czy Autor może to potwierdzić?

Taka informacja byłaby przydatna w aspekcie kształtowania modelu kratownicowego.

4. Dokonany przez Autora wybór pozycji literatury z bogatego, sięgającego setek prac dotyczących ścinania można uznać za trafny i przemyślany. Autor sięgnął do podstawowych uznanych dzieł z zakresu ścinania (np. Bukowski, Godycki-Ćwirko, Leonhard, Kani), ale również cytuje najnowsze badania z zakresu ścinania.

Jednakże w aspekcie dyskusji Autora związanej z efektem skali zabrakło ważnych pozycji z badań Leonharda i Walthera (D.A.f.Stb. H.151, 1962) oraz pracy Collinsa (ACI Structural Journal 1-2/1966). Dyskutując natomiast model kratownicowy Mörscha warto sięgnąć do pracy T. Godyckiego –Ćwirko zatytułowanej „Za i przeciw analogii kratownicowej Mörscha” (inż. i bud. 10/1965 przetłumaczonej na język niemiecki w Bautechnik 4/1966).

Uwagi szczegółowe (w kolejności czytania tekstu pracy)

s.20 – rys. 1-3b, przebieg trajektorii naprężeń pod siłą skupioną nie jest taki regularny, odchylenie trajektorii naprężeń ściskających zaczyna się chyba już od działającej siły

s. 21- rys. 1-4 faza Ia, czy rzeczywiście w wykresie naprężeń τ w fazie przed zarysowaniem ingeruje już zbrojenie rozciągane?

s. 53, 13w. od dołu powinno być *clamping*

s. 79, 12 w. od góry – może lepiej ten efekt nazwać klockującym a nie kołkującym?

- s. 84-85 Dla zwiększenia czytelności programu badań lepiej było podać zbrojenie wszystkich belek wraz z podporami
- s. 88, rys. 5-9 w podpisie należy zmienić b) na a)
- s. 107, rys. 6-1 na wykresie naprężeń τ dla belki S2T1-1 podano wartość 5,7 MPa, zaś w tab. 6-2 na tej samej stronie $\tau = 4,3$ MPa? Podobna niezgodność dotyczy belki S2T-1 (na wykresie 6,0 w tab. 5,7 MPa) oraz belki S2TC-1 (na wykresie 4,3 w tab. 6,0 MPa)
- s. 143, na rys. 7-2 są podobne niezgodności dla belek teowych w podanych na wykresie wartości naprężeń τ .
- s. 146, rys. 7-3 dla zwiększenia czytelności przy normie ACI 318 należało podać nr wzoru zgodnie z cytowaniem w tekście pracy (a nie kolejny nr 1,2,3,4)
- s. 159, rys. 7-10, w podpisie pod rysunkiem błąd w słowie przekroju (podobnie w podpisie rysunków 7-11 i 7-12).
- s. 186, poz. literatury 14 – powinna być spacja po słowie pri
- s. 189, poz. literatury 53 – powinno być Degradation

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościową pracą teoretyczno-eksperymentalną o znaczeniu praktycznym w zakresie ścinania żelbetowych elementów prętowych.

Autor podjął własne badania eksperymentalne, zastosował nowoczesne metody pomiarowe, wnikliwie przeanalizował uzyskane wyniki, co umożliwiło poznanie wpływu poszczególnych czynników na nośność strefy przypodporowej oraz na kąt nachylenia rys ukośnych.

Przeprowadzona teoretyczna analiza porównawcza wyników uzyskanych według najważniejszych procedur normowych opartych na zróżnicowanych założeniach merytorycznych (model kratownicowy, metoda stanów granicznych nośności, założenia oparte na teorii pól ściskanych) w konfrontacji z wynikami doświadczalnymi Autora stanowi ważny element poznawczy pracy. Równie ważne znaczenie poznawcze ma weryfikacja zróżnicowanych zaleceń normowych w aspekcie przyjmowania kątów nachylenia betonowych krzyżulców ściskanych.

Cel pracy został osiągnięty a sformułowane przez Autora tezy badawcze zostały udowodnione.

Zasygnalizowane uwagi w niczym nie umniejszają merytorycznej wartości pracy i bardzo dobrej oceny rozprawy doktorskiej.

Podsumowując niniejszą opinię stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Bacharza pt. „Problem nośności na ścinanie strefy przypodporowej belek żelbetowych w aspekcie badań doświadczalnych i norm” spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne, którym powinna odpowiadać rozprawa doktorska określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 – oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 22.09.2011 w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora wraz z późniejszymi zmianami.

Na podstawie powyższego wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Kamila Bacharza do publicznej obrony pracy doktorskiej.

K. Niegrodzko - Godynie