

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka

RECENZJA DYSERTACJI DOKTORSKIEJ

mgr inż. Igi Rewers

pt.

”ZARYSOWANIE ŻELBETOWYCH BELEK ZGINANYCH ZBROJONYCH STAŁĄ WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI SAS 670/800”

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Winnickiego

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 8.07.2022 i umowa o dzieło między recenzentką i Politechniką Krakowską.

1. Problem naukowy, przedmiot, i charakter dysertacji

Zarysowanie jest nieodłącznie związane z pracą elementów żelbetowych, w szczególności belek. Powstanie rys, choć naturalne, wiąże się ze zmniejszeniem trwałości elementów żelbetowych - rysy stanowią bowiem drogę przedostawiania się czynników agresywnych w okolice zbrojenia. Dlatego jednym z kryteriów w projektowaniu elementów żelbetowych jest warunek nie przekroczenia przez rysy szerokości dopuszczalnej w klasie ekspozycji, w której pracować będzie konstrukcja.

Sposób obliczania szerokości rys podany jest w normach projektowania. Jednak zakres stosowania norm ograniczony jest do stali zbrojeniowych o charakterystycznej granicy plastyczności w zakresie 400 – 600 MPa. Na rynku oferowane są stale zbrojeniowe o innych własnościach niż przewidziane tymi normami. Do takich należy stal SAS 670/800, której granica plastyczności wynosi 670 MPa. Z Europejskiej Aprobaty Technicznej tej stali wynika, że jest ona dedykowana do zbrojenia elementów ściskanych i rozciąganych. Dopuszczona została też do stosowania w elementach zginanych, ale przy ograniczeniu naprężeń w stanie granicznym nośności do 600 MPa oraz po sprawdzeniu stanu granicznego użyteczności.

Doktorantka, po stwierdzeniu, że w literaturze przedmiotu jest niewiele informacji dotyczących belek zbrojonych stalą SAS 670/800, postawiła sobie za cel zbadanie problemu zarysowania takich belek. W tekście rozprawy obok tego problemu głównego, wyartykułowanego w tytule, pojawia się drugi problem naukowy - problem zbrojenia przypowierzchniowego i jego wpływu na szerokość rys w belkach ze stalą SAS 670/800.

Dysertacja doktorska ma charakter doświadczalno-analityczny. W jej ramach przeprowadzone zostały zarówno badania laboratoryjne pełnowymiarowych belek, jak i analizy numeryczne przebadanych belek. Są to badania o charakterze naukowym, a ich wnioski mogą być aplikowane w praktyce stanowiąc pomoc dla projektantów konstrukcji stosujących stal SAS 670/800.

Wziąwszy powyższe aspekty pod uwagę, wybór przedmiotu dysertacji uznaję za trafny, aktualny i ważny z punktu widzenia praktycznego.

2. Zawartość i układ dysertacji

Praca liczy 196 stron tekstu podstawowego, do którego dołączono na początku spis treści, a na końcu bibliografię, streszczenie w języku polskim i angielskim, spisy oznaczeń, rysunków, fotografii i tabel oraz 7 załączników, w których zawarto dokumentację przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz szczegóły modeli numerycznych.

W pracy wyróżnić można następujące części:

1. Wprowadzenie (rozdział 1) podające genezę problemu oraz cel i zakres pracy, a także zawierające tezy pracy;

DEKANAAT
Wydziału Inżynierii Lądowej
7.2 WRZ. 2022
Wpłynęło dnia
L. dz. 10.310.412.2022
podpis

2. Studia literaturowe, których przedmiotem są:

- charakterystyka stali SAS 670/800 i przegląd dotychczasowych badań laboratoryjnych elementów zginanych zbrojonych tą stalą (rozdział 3),
- ogólny opis zjawiska zarysowania w elementach żelbetowych oraz przegląd modeli służących obliczaniu szerokości rys (rozdział 4),
- wytyczne stosowania zbrojenia przypowierzchniowego i opis wybranych badań belek ze zbrojeniem przypowierzchniowym;

3. Część badawczą zawierającą:

- opis programu badań laboratoryjnych wraz z relacją z badań materiałowych (rozdział 5),
- prezentację wyników badań laboratoryjnych (rozdział 6) i ich analizę (rozdział 7);

4. Prezentację analiz numerycznych, którym poddano modele belek zbadanych uprzednio w laboratorium (rozdział 8);

5. Podsumowanie i wnioski (rozdziały 9.1÷9.8);

6. Sprecyzowanie kierunków dalszych działań (rozdział 9.9).

Spis literatury zawiera 96 pozycji literaturowych (w tym dokumentację programów Atena i Abaqus oraz aprobatę techniczną analizowanej stali i dwa biuletyny *fib* zawierające tekst ModelCode 2010) oraz 14 norm. Zawarto tu 70 publikacji angielskojęzycznych, 8 niemieckojęzycznych i 15 polskojęzycznych, a także po jednej francusko-, rosyjsko- i włoskojęzycznej. Zwraca uwagę, że większość publikacji jest dość stara - jedynie 13 pozycji ma 5 lat i mniej.

Bibliografia zawiera także prace Doktorantki - 4 autorskie i jedną współautorską. Trzy prace opublikowane zostały w ramach Studenckiego Koła Naukowego Konstrukcji Żelbetowych CONCRET, jedna w polskojęzycznym czasopiśmie *Przegląd Budowlany* i jedna w języku angielskim w materiałach konferencji międzynarodowej w Pradze.

3. Merytoryczna ocena pracy

3.1 Ocena ogólna dysertacji

Recenzowana dysertacja doktorska ma, jak już pisałam wyżej, charakter doświadczalno-analityczny. Praca jest oryginalna. Podjęty przez Doktorantkę problem naukowy został rozwiązany przy zastosowaniu współczesnych metod badań i analizy konstrukcji. Poziom i zakres analiz świadczy o opanowaniu przez Doktorantkę warsztatu naukowego. Zwraca uwagę staranność w dokumentacji i prezentacji wyników.

Poniżej przedstawione zostaną oceny częściowe poszczególnych części dysertacji. Zawarte tu uwagi, także dyskusyjne, mają na celu wskazanie zagadnień, na które należałoby zwrócić uwagę w dalszych badaniach i publikacjach.

3.2 Ocena celu i tezy pracy na tle genezy pracy

Doktorantka sformułowała dwa cele pracy (str. 11⁸⁻¹²):

- Zbadanie szerokości rozwarcia rys w stanie granicznym użytkowości belek zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800 wykonanych z betonu zwykłego i z betonu o wysokiej wytrzymałości,
- Zbadanie efektywności zbrojenia przypowierzchniowego w kontekście ograniczenia szerokości rozwarcia rys belek zbrojonych stalą SAS 670/800.

Moim zdaniem samo zbadanie nie powinno być celem pracy, celem powinno być np. dopełnienie wiedzy, ustalenie wpływu, albo sformułowanie wniosków dla zastosowań praktycznych.

Po drugie – zarówno w analizach wyników badań jak i w obliczeniach numerycznych nie należy wprost odnosić się do *stanu granicznego nośności i użytkowości* - są to stany

umowne używane w projektowaniu, a wprowadzone do obliczeń projektowych oddziaływania wynikają z kombinacji obciążeń adekwatnej do danego stanu granicznego. W pracach badawczych należałoby więc raczej używać sformułowania *szerokości rys badane pod obciążeniem, dla którego sprawdzany jest stan graniczny użytkowości* lub *szerokości rys pod obciążeniem odpowiadającym stanowi granicznemu użytkowości*. W formalnie zapisanych celach pracy znalazło się podane wyżej sformułowanie nieprecyzyjne, choć w tekście w kilku miejscach znajdują się zapisy prawidłowe (np. str. 61⁴, 156³). Do tego wątku powrócę w p. 3.3.2 recenzji.

Wreszcie uwaga dotycząca użytego sformułowania *szerokość rozwarcia rys*. Należy używać albo *szerokość rys* albo *rozwarcie rys*. Uwaga ta dotyczy całej pracy, choć miejscami w dysertacji używane było sformułowanie prawidłowe.

Doktorantka sformułowała dwie tezy (str. 137-1):

- Teza 1: *Szerokość rozwarcia rys w żelbetowych elementach zginanych, zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800 przy poziomie obciążeń użytkowych nie różni się znacząco od szerokości rozwarcia rys elementów zbrojonych stalą zwykłą.*
- Teza 2: *Zastosowanie zbrojenia przypowierzchniowego w żelbetowych elementach zginanych ogranicza szerokość rys zarówno na poziomie zbrojenia głównego, jak i powyżej niego.*

Pierwsza uwaga dotyczy obydwu tez – powinno być jasno napisane, że tezy odnoszą się do rys prostopadłych od zginania, a nie rys ukośnych, które nie były w pracy analizowane.

W odniesieniu do tezy pierwszej nie mam uwag, choć przeczy ona stwierdzeniom podanym w p.1.1 opisującym genezę pracy: *podwyższona wytrzymałość na rozciąganie przy module sprężystości 200 GPa niesie za sobą ryzyko nadmiernego zarysowania elementów zginanych oraz dalej Wysoka wytrzymałość stali powoduje, że można jej stosować odpowiednio mniej przy zachowaniu tej samej nośności. Jednak zmniejszony procentowy udział zbrojenia skutkuje zmniejszeniem sztywności elementu. Z uwagi na zmniejszoną sztywność, belki zbrojone stalą SAS 670/800 mogą nie spełniać wymagań stawianych przez stan graniczny użytkowości*. Rozumiem to tak, że Doktorantka wyspecyfikowała w p. 1.1. wątpliwości, ale stawia tezę, że wątpliwości te nie potwierdzą się w badaniach.

Tu pojawia się pytanie, dotyczące cytowanych wyżej fragmentów – w projektowaniu wykorzystujemy jedynie naprężenia do poziomu granicy plastyczności, a nie wytrzymałości na rozciąganie. Dlaczego w tych fragmentach jest odniesienie do wytrzymałości?

Ponadto na str. 7¹²⁻¹⁰ podano, że zgodnie z Europejską Aprobata Techniczną stal SAS 670/800 można stosować w elementach zginanych, ale *pod warunkiem ograniczenia charakterystycznej granicy plastyczności do 600 MPa*. Chodzi raczej o ograniczenie dopuszczalnych naprężeń, a nie o ograniczenie granicy plastyczności, która jest określana na podstawie badań.

Teza druga jest właściwie potwierdzeniem definicji zbrojenia przypowierzchniowego. Jest ono stosowane właśnie po to, aby zmniejszyć szerokość rys (sama Doktorantka napisała to na str. 45³ wprowadzając pojęcie zbrojenia przypowierzchniowego). Ponadto, jeśli w tezie pierwszej napisano o tym, że szerokość rys w belkach zbrojonych stalą SAS 670/800 nie różni się od zbrojenia stalą zwykłą, to brakuje uzasadnienia dla zastosowania w badanych belkach zbrojenia przypowierzchniowego (żaden z przewidzianych w EC2-1-1 warunków stosowania takiego zbrojenia nie został w badanych elementach spełniony). Nie neguję zasadności podjęcia badań, ale zdecydowanie brakuje uzasadnienia ich podjęcia (nie ma go także w konkluzjach ze studiów literaturowych). Poza tym w tezie drugiej nie odniesiono się do gatunku stali – czy teza dotyczy tylko stali SAS 600/800, czy jest szersza?

3.2 Ocena studiów literatury

Studia literaturowe są dość skromne objętościowo (zajmują jedynie 38 stron). Obejmują one zagadnienia, które można uznać za właściwe, wybrane źródła są niewątpliwie związane z tematem i ważne.

Starannie przeanalizowano relacjonowane w literaturze nieliczne badania belek, w których zastosowana była stal SAS 670/800. Następnie podano podstawy obliczania szerokości rys klasycznymi wzorami opartymi na zależnościach teoretycznych i półempirycznych, stanowiących punkt wyjściowy metod EC2 i MC2010. Szczególną uwagę poświęcono wzorom empirycznym, będącym podstawą metod przyjętych w kolejnych edycjach normy ACI 318. Wreszcie w sposób szczegółowy zaprezentowano normowe metody obliczania szerokości rys.

W drugiej części studiów literaturowych zajęto się problemem zbrojenia przypowierzchniowego. Zestawiono tu wytyczne normowe – EC2-1-1, MC2010 i ACI-318, a następnie omówiono jeden artykuł z roku 2008, relacjonujący badania belek ze zbrojeniem przypowierzchniowym. Cennym elementem studiów literaturowych na temat zbrojenia przypowierzchniowego jest przywołanie własnego opracowania zawierającego propozycję oryginalnego sposobu obliczania szerokości rys w belkach ze zbrojeniem przypowierzchniowym. Obliczone szerokości rys porównano z wynikami doświadczalnymi pochodzącymi z cytowanego artykułu. Jednak wobec tego, że nie podano szczegółowo zastosowanej procedury trudno mi odnieść się do niej dokładniej.

Na zakończenie studiów literaturowych brakuje, moim zdaniem, ich podsumowania z wyspecyfikowanymi problemami, wątpliwościami i brakami wiedzy, które Doktorantka zauważyła w wyniku studiów literaturowych i które postanowiła rozwiązać w swojej pracy.

3.3 Ocena własnych badań, obliczeń i analiz ich wyników

3.3.1 Osiągnięcia oraz mocne strony pracy

Przedmiotem badań i analiz własnych Doktorantki były żelbetowe belki o wymiarach przekroju poprzecznego 30x60 cm i długości 6,0 m, zbrojone stalą SAS 670/800, wariantowo bez zbrojenia przypowierzchniowego i z takim zbrojeniem, przy czym średnice zbrojenia przypowierzchniowego i jego układ były w poszczególnych belkach zróżnicowane. Belki wykonane były z betonu o średniej wytrzymałości 28-dniowej równej - około 48 MPa (beton A) i 73 MPa (beton B). Badaniom laboratoryjnym poddała Doktorantka 8 belek - po jednej każdego typu. Były to:

- dwie belki z betonu słabszego A zbrojonego stalą SAS 670/800: bez zbrojenia przypowierzchniowego i ze zbrojeniem przypowierzchniowym o średnicy 6 mm,
- cztery belki z betonu mocniejszego B zbrojonego stalą SAS 670/800: bez zbrojenia przypowierzchniowego oraz ze zbrojeniem przypowierzchniowym o średnicach wariantowo 4,5, 6 i 8 mm w różnych układach,
- dwie belki z betonu mocniejszego B5 zbrojonego stalą B500SP: bez zbrojenia przypowierzchniowego i ze zbrojeniem przypowierzchniowym o średnicy 6 mm.

Belki badane były w schemacie czteropunktowego zginania, a obciążenie sterowane przemieszczeniem zadawano etapami. W programie obciążania przewidziano dwukrotne odciążenie i ponowne odciążenie po uzyskaniu obciążenia uznanego za odpowiadające SG użytkowalności. Obserwowano obraz zniszczenia, odnotowywano wartość siły niszczącej, a na każdym etapie obciążenia mierzono: ugięcia belki za pomocą czujników indukcyjnych, odkształcenia betonu w strefie stałego momentu na bazach reperów za pomocą czujnika nasadowego, odkształcenia zbrojenia głównego i przypowierzchniowego za pomocą tensometrów elektrooporowych, szerokość rys za pomocą lupy Brinella oraz identyfikowano

poła przemieszczeń wykorzystując metodę korelacji obrazów cyfrowych DIC. Wykonano także badania cech materiałowych użytych stali i betonów. Program obciążenia i zakres pomiarów uznają za prawidłowy.

Analiza wyników badań jest szeroka, za wartościową uznają próbę porównania teoretycznych i uzyskanych w badaniach nośności i momentu rysującego (tu wartość podkreślenia poszukiwania rzeczywistego momentu rysującego na podstawie dwóch danych – przebiegu wzrostu naprężenia w zbrojeniu głównym i wyników obserwacji rys).

Następnie wszystkie przebadane belki zostały zamodelowane i przeanalizowane numerycznie, a wyniki analiz numerycznych porównane zostały wynikami eksperymentu. Porównywane były: siły niszczące, ugięcia, naprężenia w zbrojeniu, szerokości rys (szerokości rys w modelu numerycznym szacowano na podstawie modelu Červenki) i obrazy zarysowania.

Niewątpliwie mocną stroną pracy jest realizacja szerokich badań laboratoryjnych na elementach pełnowymiarowych. Były to badania trudne i pracochłonne, zwłaszcza przy wykonywaniu kilkudziesięciu pomiarów na każdym etapie obciążenia. W pracy widać staranność w przygotowaniu badanych elementów i samej realizacji badań, jak i pieczołowitość w opracowaniu i prezentacji wyników. Tę stronę pracy oceniam wysoko. Również dobrze oceniam użycie nowoczesnej techniki badawczej, jaką jest korelacja optyczna DIC. Ogólnie mogę stwierdzić, że Doktorantka opanowała warsztat prac laboratoryjnych. Za mocną stroną pracy uznają również to, że Doktorantka nie poprzestała na analizie wyników badań laboratoryjnych, ale wykazała się umiejętnością modelowania numerycznego.

Za pozytywny uznają krytycyzm w stosunku do uzyskanych wyników. W kilku miejscach Doktorantka to jawnie napisała (np. str. 170⁴⁻⁵ – *autorka ma wątpliwości co do reprezentatywności wyników uzyskanych z belki BS0* czy też str. 193⁴ *wyniki te nie są zgodne z przewidywaniami autorki*).

3.3.2 Uwagi merytoryczne

Podstawowe uwagi recenzentki dotyczą programu badań, analizy wyników badań i wnioskowania.

1. Uwagi do programu badań

- W programie badań przewidziano przebadanie 8 belek, przy czym wszystkie belki były różne. Wyniki są zatem jednostkowe, nie potwierdzone kolejnym wynikiem. Analizując szerokości rys Doktorantka zauważyła, że znalazły się belki, których szerokości rys odbiegały od wyników oczekiwanych (belki BS4 i BS8 - str. 164¹⁷ oraz belka BS0 – str. 170⁴⁻⁵). Myślę, że przy tej samej liczbie belek lepiej byłoby zrezygnować z jednego parametru – np. wytrzymałości betonu, czy też jednego z układów zbrojenia przypowierzchniowego i wykonać badania na co najmniej dwóch belkach o takich samych parametrach. Trzeba pozytywnie ocenić, że taki wniosek sformułowała Doktorantka na końcu pracy.
- Jak już pisałam w p. 3.2, badane były szerokości rys pod obciążeniem odpowiadającym stanowi granicznemu użytkowalności. Zaprezentowane analizy odnoszą się najwyraźniej do charakterystycznej kombinacji obciążeń. Świadczy o tym poziom naprężeń w stali, przy którym badano rysy i który utożsamiano z obciążeniem odpowiadającym SG użytkowalności (400 MPa w przypadku stali SAS 670/800 i 300 MPa w przypadku stali B500SP – str. 61⁸⁻¹⁰). O odnoszeniu się do charakterystycznej kombinacji obciążeń świadczy także zastosowanie w szacowaniu naprężeń jedynie współczynników częściowych dla obciążeń i parametrów materiałowych (wyrażenia 2.1, 2.2, 7.1). Tymczasem zgodnie z EC2-1-1 SG

zarysowania w konstrukcjach żelbetowych sprawdza się nie pod kombinacją charakterystyczną, ale pod kombinacją *quasi*-stałą. Doktorantka powołała się tu na pracę *Scheibe i innych* z roku 2014, ale to nie zmienia faktu, że występuje nieścisłość.

2. Uwaga do wyników badań towarzyszących

- Wątpliwości budzą wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie betonów zestawione w tablicy 5.13. Otóż stosunek wytrzymałości na rozciąganie osiowe do wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w poszczególnych przypadkach wynosi od 0,58 do 0,78. Tymczasem w EC2-1-1 ten stosunek jest określony wzorem (3.30) i wynosi 0,9. Jak Doktorantka interpretuje w tym świetle swoje wyniki?

3. Uwagi do obliczeń teoretycznych nośności i momentu rysującego

- Na str. 154¹⁶ napisano, że *przy obliczaniu nośności belek wykonanych z betonu B posłużono się interpolacją liniową średnich wyników badań wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzonych przed i po badaniu belek*. Tymczasem zależność *wytrzymałość – czas* nie jest liniowa, a exponencjalna – opisana wzorem (3.1) normy EC2-1-1.
- Nośność teoretyczną belek obliczono w Załączniku E w założeniu prostokątnego rozkładu naprężeń ściskających. Rozumiem, że Doktorantka przyjęła takie założenie jako najprostsze odniesienie do projektowania, ale w pracach naukowych można byłoby zastosować model dokładniejszy.
- W oszacowaniu nośności w Załączniku E występują nieścisłości. Po pierwsze w przypadku betonów o wytrzymałości charakterystycznej większej niż 50 MPa do wytrzymałości na ściskanie należy stosować współczynnik η (rys. 3.5 i wzór 3.22 EC2-1-1). Po drugie – jeśli w obliczeniu nośności uwzględnia się zbrojenie przypowierzchniowe (a uczyniono to dla obliczenia pola powierzchni zbrojenia) to również należało to zbrojenie uwzględnić w obliczeniu wysokości użytecznej przekroju (powinna ona być obliczona z uwzględnieniem nie tylko położenia poszczególnych prętów, ale także różnic parametrów wytrzymałościowych stali SAS 670/800 i B500SP). Proszę Doktorantkę o przedstawienie skorygowanych obliczeń.
- W załączniku E zamieszczono obliczenia momentu rysującego belki. Dokonano tego w dwóch wariantach – przyjmując jako wytrzymałość na rozciąganie raz - wytrzymałość na rozciąganie osiowe, a raz - wytrzymałość przy rozłupywaniu. Dlaczego? Przecież wytrzymałość przy rozłupywaniu jest tylko modelem badawczym. W konstrukcji nie ma stanu naprężeniowo-odkształceniowego takiego jak przy rozłupywaniu. Moment rysujący obliczamy zawsze uwzględniając wytrzymałość na rozciąganie osiowe, a Autorka tę zasadę sformułowała jako własną obserwację po przeanalizowaniu wyników badań.

4. Uwagi dotyczące skurczu

- Na str. 155 napisano o próbie obliczenia szerokości rys z uwzględnieniem skurczu zgodnie ze starą Polską Normą PN-76/B-03264 pisząc, że próba zakończyła się uzyskaniem bardzo małych wartości momentu rysującego. Czy mogłaby Autorka przedstawić tok postępowania?
- Za miarodajną wartość skurczu, którą, jak rozumiem, przyłożono do modelu belki, przyjęto wartość zbadaną na beleczkach. Belecзки najpierw znajdowały się na zewnątrz budynku, później w hali. Czy próbki były okrywane geowłókniną i pielęgnowane tak jak belki podstawowe? Gdzie mierzona była wilgotność pokazana na rys. 5.19-5.21 i 5.28-5.30 - w powietrzu atmosferycznym, czy pod przykryciem polewanych wodą beleczek?

- Z tablicy 8.3 wynika, że dla większości belek do modelu przyłożono ochłodzenie aż o niemal 40°. Moim zdaniem ta wartość obarczona jest znacznym błędem i rzeczywista wartość skurczu betonu w belkach pełnowymiarowych jest mniejsza, bowiem:
 - Wysychanie elementu o przekroju 10x10 cm zachodzi inaczej niż wysychanie elementu o przekroju 30x60 cm (patrz: *miarodajny wymiar przekroju* w EC2-1-1).
 - Element przebywał na zewnątrz przez 28 dni – był to koniec września, kiedy z pewnością spadała także temperatura powietrza, co musiało mieć wpływ na pomierzone skrócenia. Czy mierzono także temperaturę otoczenia?
 - Skurcz w konstrukcji podlega pełzaniu zmniejszającemu wartości odkształceń (patrz prace prof. K.Flągi).
5. Uwagi do analizy naprężeń w zbrojeniu:
- Na str. 154¹³⁻¹⁰ napisano, że za miarodajną do obliczenia momentu rysującego przyjęto wartość obciążenia, przy którym doszło do odchylenia krzywej *siła-odkształcenie* sporządzonej dla zbrojenia dolnego. Od czego było to odchylenie? Czy chodzi o początek poziomego odcinka krzywej? Na rysunku 7.1 pokazano wartość tego obciążenia przerywaną linią niebieską. Jest to pozioma linia przebiegająca na poziomie ok. 75 kN. Czy ona ma odpowiadać któremuś konkretnemu tensometrowi? Na żadnym z wykresów przy tej wartości nie dostrzegam „odchylenia” ani odcinka poziomego.
 - Co oznacza druga (dolna) grupa krzywych na rys. 7.1? Nie jest opisana w podpisie rysunku.
 - Nie można, moim zdaniem, z wykresów dla tensometrów umieszczonych w różnych miejscach na długości belki sporządzać jednego wykresu wartości średnich (rozumiem, że tak zostały sporządzone wykresy na rys. 7.3). Rysa przy danym obciążeniu powstaje bowiem w konkretnym miejscu, a więc w strefie jednego tensometru, podczas gdy w strefie drugiego tensometru - niekoniecznie. O ile można mówić o średnich wartościach naprężeń dla konkretnego obciążenia, o tyle w przypadku wykresów, których odcinki poziome są różnej długości i występują przy różnych obciążeniach – nie można sporządzać „wykresów średnich”. Jeśli już szukana była wartość średnia odpowiadająca momentowi rysującemu należało wyszukać odpowiednie wartości na poszczególnych wykresach i z nich policzyć wartość średnią.
 - Ponadto: Czy momentowi rysującemu daną belkę nie powinno odpowiadać najmniejsze, a nie średnie z obciążeń przy której zaobserwowano kolejne rysy?
 - Nie wyjaśniono precyzyjnie, jak uzyskano wykres 7.5.
6. Pytania do analiz numerycznych:
- Podstawowe pytania dotyczące modelu numerycznego związane są z uwzględnieniem skurczu w modelu numerycznym.
 - Czy zadając ochłodzenie modelu przykładano je do całej belki, czy tylko betonu, wyłączając zbrojenie?
 - Do jakiego modelu przykładano ochłodzenie – do modelu belki w czasie badania (schemat 4-punktowy), czy belki podpartej na podkładkach, jak widać to na fot. 5.3? Z rys. 8.9 i opisu na str. 176²-1-177¹⁻² wynika, że był to ten sam model obciążenia czteropunktowego. A przecież skurcz zachodził, gdy belki dojrzewały spoczywając na około 10 podkładkach (trudno odczytać konkretną liczbę z fotografii), zatem nie mógł spowodować zwiększenia ugięcia, a wręcz przy niesymetrycznym zbrojeniu dolnym i górnym mógł nawet powodować wygięcie „do góry” (oczywiście przeciwdziała temu ciężar własny). Belka znalazła się na stanowisku badawczym i była poddawana obciążeniu już w stanie naprężonym, powstałym wcześniej i dopiero do tej naprężonej belki przykładano obciążenie.
- Analizując wyniki pomiarów tensometrami elektrooporowymi i nasadowymi w rozdziale 6 i 7, na wykresach w pokazywano *de facto* różnicę między odczytem

przy danym obciążeniu, a odczytem bazowym. A odczyt bazowy zawierał „zamrożone” efekty skurczu, więc wyprowadzane wnioski powinny dotyczyć porównania wyników eksperymentu i obliczeń numerycznych bez skurczu. Jeśli chciałoby się uwzględnić skurcz należało zamodelować stan pierwotny z naprężeniami powstałymi w wyniku skurczu w okresie przed badaniem.

Myślę, że to nie fakt uwzględnienia przeszacowanej wartości skurczu lub nieuwzględnienia skurczu decydował o stopniu dokładności odwzorowania wyników eksperymentu przez model.

- Jak w modelu uwzględniono ciężar własny belki? Belka była pełnowymiarowa (30x60x600 cm) i ciężar własny miał z pewnością wpływ na wyniki eksperymentu.
- Porównując wyniki badań i analiz numerycznych w zakresie ugięć na str. 179²⁻¹ napisano: *dla wartości odpowiadającej stanowi granicznemu użyteczności zgodność jest dobra*. Na podstawie jakiego kryterium stwierdzono, że zgodność jest dobra?
- W czym upatruje Doktorantka przyczynę tego, że *nie udało się uzyskać zadowalającej zgodności szerokości rys z analizy numerycznej i badań doświadczalnych* (str. 183⁷⁻⁸)?

3.6 Ocena podsumowania i wniosków pracy

W ostatnim rozdziale Doktorantka zamieściła podsumowanie pracy i zestawione w kolejnych podpunktach wnioski. Są one zaprezentowane w sposób czytelny i spójny. Cenne jest formułowanie wniosków nie tylko w zakresie osiągnięć, ale także wniosków wynikających z niepowodzeń (np. stwierdzenie konieczności wykonywania badań powtarzalnych na większej liczbie elementów o tych samych parametrach, o sposobie przygotowywania mieszanki betonowej, czy też o konieczności modelowania kontaktu stal-beton).

Pewien niepokój budzi stwierdzenie o zweryfikowaniu tezy 1 (*Szerokość rozwarcia rys w żelbetowych elementach zginanych, zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800 przy poziomie obciążeń użytkowych nie różni się znacząco od szerokości rozwarcia rys elementów zbrojonych stalą zwykłą*) w świetle stwierdzenia we wniosku w p.9.2, że *pomierzone szerokości rys belki BS0 wydają się być zaniżone* (belka z betonu mocniejszego zbrojona stalą SAS 670/800). W tej sytuacji porównywanie do niej belki BE0 (belka z betonu mocniejszego zbrojona stalą B500SP), w ramach wnioskowania mającego na celu potwierdzenia tezy, jest dyskusyjne.

Po lekturze pracy, a zwłaszcza programu badań przewidującego badanie belek o różnych średnicach i układach zbrojenia przypowierzchniowego odczuwam niedosyt związany z brakiem wniosku i rekomendacji dotyczących tego zagadnienia. Byłoby to bardzo cenne dla praktyki.

Na zakończenie Doktorantka sformułowała dalsze kierunki badań, w których planuje doskonalenie modelu numerycznego.

4. Ocena układu i strony redakcyjnej pracy

Układ pracy jest tradycyjny – najpierw część studialna, następnie relacja z badań laboratoryjnych poprzedzona prezentacją programu badań i zakończona analizą ich wyników, wreszcie opis analiz numerycznych. Praca jest czytelna - napisana jest jasnym, poprawnym językiem. Recenzentka zauważyła nieliczne uchybienia, zestawione poniżej. Nie mają one wpływu na merytoryczną ocenę pracy i nie wymagają odpowiedzi podczas obrony dysertacji.

Nieścisłości i nieprecyzyjne sformułowania:

- W wielu miejscach pracy użyte jest sformułowanie *szerokość rozwarcia rysy*; winno być albo *szerokość rysy* albo *rozwarcie rysy* (pisałam już o tym w p. w p. 3.2. recenzji).

- Praca pisana jest w języku polskim, więc cytując rysunki należałoby przetłumaczyć opisy (np. rys. 2.4, 2.5 i inne).
- Podpisy rysunków wykonano kapitalikami, w związku z tym odniesienia do rysunków składowych zapisane są wielkimi literami np. A), B), C) podczas, gdy na rysunkach są one podpisane a), b), c). Na rysunku 3.6 znajdują się nawet obydwa typy oznaczeń: a) i b) oraz A), B), C) itd. Jest to mylące.
- Rys. 2.7 jest nieczytelny.
- Nie stosowano znaków interpunkcyjnych po wzorach np. po wzorze 3.11 brak kropki, po wzorach 3.12, 3.13 i 3.14 brak przecinków, a po wzorze 3.15 – kropki; po wzorze 3.20 brak kropki, a po wzorze 3.21 – brak przecinka. Podobnie w całej pracy.
- Str 34¹⁴ jest *ilości* winno być *liczby*, bowiem badania doświadczalne są policzalne.
- Str. 36⁷ – niejasne: *odpowiednik ze wzoru 3.24*.
- Na rys. 7.14 nie podpisano jawnie, które z wykresów powstały w wyniku obliczeń.
- W podpisie rysunku 8.1 odniesiono się jedynie do belki BS0, podczas, gdy na rysunku znajdują się dwie krzywe dla betonu BS0 i BS0C.
- W Excelu jest funkcja PERCENTYL.PRZEDZ.ZAMK, a nie, jak napisano na str. 163 PERCENTYL.PRZEDZ.ZAM.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona praca jest niewątpliwie dziełem oryginalnym i samodzielnym. Doktorantka podjęła ważne zagadnienie, które konsekwentnie rozwiązywała. Wykazała się wiedzą teoretyczną z zakresu podjętej tematyki, umiejętnością realizacji eksperymentów i wykonywania obliczeń numerycznych. Dysertacja świadczy o opanowaniu przez Doktorantkę warsztatu badań naukowych.

Ostatecznie stwierdzam, że przedłożona praca mgr inż. Igi Rewers pt. „Zarysowanie żelbetowych belek zginanych zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Lublin dn. 14.09.2022