

dr hab. inż. Paweł Lewiński,

Warszawa, 14 maja 2019 r.

prof. ITB

Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji

Budowlanych, Geotechniki i Betonu

ul. Filtrowa 1, 00-611 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Zychowicza
pt: „Badania doświadczalne i numeryczne belek betonowych zbrojonych
płaskimi siatkami o kratownicowym układzie prętów”**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi Umowa o dzieło nr 80/4000/501/19 zawarta w dniu 18.03.2019 r. pomiędzy Wojskową Akademią Techniczną im. Jarosława Dąbrowskiego ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa a dr hab. inż. Pawłem Lewińskim, prof. ITB.

2. Przedmiot i zawartość rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Zychowicza pt.: „Badania doświadczalne i numeryczne belek betonowych zbrojonych płaskimi siatkami o kratownicowym układzie prętów”, obejmująca zagadnienia dotyczące opracowania metody i przeprowadzenia badań doświadczalnych belek żelbetowych zbrojonych hiperstatycznymi układami kratownicowych siatek z prętów stalowych oraz opracowanie metody numerycznej analizy elementów ze zbrojeniem kratownicowym. Analiza ta wymagała przeprowadzenia badań doświadczalnych belek żelbetowych z zastosowaniem kratownicowego układu zbrojenia poprzecznego oraz belek zbrojonych tradycyjnie strzemionami przy założeniu jednakowego układu prętów podłużnych w obu rodzajach belek oraz opracowania modelu numerycznego i poszukiwania rozwiązań w zakresie nieliniowym, wraz z opracowaniem wyników i analizą porównawczą. Opisane zostały badania wstępne belek żelbetowych o przekroju prostokątnym zginanych pojedynczą siłą, a następnie badania belek żelbetowych również o przekroju prostokątnym zginanych dwoma siłami. Badania te posłużyły jako podstawa do weryfikacji zaproponowanej metody analizy numerycznej

belek zbrojonych w sposób kratownicowy. Praca składa się z pięciu rozdziałów i spisu literatury.

Rozdział 1 stanowi wstępny opis problematyki pracy w zakresie doświadczalnej i numerycznej analizy elementów żelbetowych, a ponadto obejmuje badania wstępne. W podrozdziale 1.1 przedstawiono analizę stanu wiedzy w zakresie obliczania elementów żelbetowych na podstawie analogii kratownicowej. W tej części rozprawy zawarto przegląd literatury dotyczący rozpatrywanego zagadnienia na tle metod obliczeniowych stosowanych w zadaniach z analogią kratownicową.

W podrozdziale 1.2 zawarto opis belek zbrojonych tradycyjnie strzemionami oraz belek żelbetowych z zastosowaniem kratowniczego układu zbrojenia poprzecznego przy założeniu jednakowego układu prętów podłużnych w obu rodzajach belek.

W podrozdziale 1.3 przedstawiono kratownicowy układ zbrojenia poprzecznego będący przedmiotem wniosku patentowego pt. „System płaskich siatek o kratownicowym układzie prętów do zbrojenia betonu”, na podstawie którego uzyskano patent w 2016 r.

Podrozdział 1.4 opisuje badania wstępne, które przeprowadzono na modelach belek ze zbrojeniem kratownicowym, o rozpiętości 1,0 m i o przekroju poprzecznym 0,1 m × 0,15 m. Uzyskano większą nośność niż w elementach zbrojonych tradycyjnie, mniejsze ugięcie przy równoważnej sile, bardziej równomierne zarysowanie o mniejszych szerokościach rozwarcia rys oraz większą „ciągłość” elementu przy zniszczeniu.

W podrozdziale 1.5 przedstawiono przedmiot, tezę i cel rozprawy. Na tej podstawie stwierdzono, że obliczenia numeryczne można przeprowadzić z wykorzystaniem oprogramowania systemowego metody elementów skończonych Abaqus, w którym można wprowadzić własny model obliczeniowy kratowniczego układu zastępczego.

W rozdziale 2 opisane zostały badania belek żelbetowych o przekroju prostokątnym zginanych dwoma siłami. Wykonano badania nośności i ugięć belek o długości całkowitej 3,2 m i o rozpiętości w osiach podpór 3,0 m, zbrojonych zbrojeniem kratownicowym i masowo równoważnym zbrojeniem tradycyjnym. Belki wszystkich serii miały przekroje 150 × 250 mm. Przyjęto obciążenie w postaci dwóch walców obciążających o rozstawie 0,9 m tworząc schemat obciążenia parą sił. Przeprowadzono analizę rozkładu zarysowania belek zginanych ze zbrojeniem tradycyjnym oraz badania belek zginanych z zastosowaniem kratowniczego układu

zbrojenia o różnym stopniu zbrojenia podłużnego $2 \times 0,27 \%$ oraz $2 \times 1,07 \%$. Belki zbrojone kratownicowym układem zbrojenia charakteryzowały się bardziej równomiernym rozkładem naprężeń, równomiernym i rozproszonym zarysowaniem o mniejszych szerokościach rys oraz wyższą nośnością w porównaniu z elementami zbrojonymi zbrojeniem tradycyjnym. W przypadku belek o niskim stopniu zbrojenia podłużnego jw., zbrojenie kratownicowe zapewniło zwiększenie nośności o 95% . Dla belek o wyższym stopniu zbrojenia podłużnego zbrojenie kratownicowe umożliwiło zwiększenie nośności o 12% w stosunku do nośności belki zbrojonej tradycyjnie, z czego wynikało, że wpływ skratowania poprzecznego na nośność belek jest większy przy mniejszym stopniu zbrojenia podłużnego. Belki zbrojone kratownicowym układem zbrojenia charakteryzowały się mniejszymi ugięciami przy równoważnym obciążeniu w stosunku do belek zbrojonych tradycyjnie.

W rozdziale 3 zawarto opis superpozycji przyjętych w analizie modeli zachowania się materiałów konstrukcyjnych. Zaproponowano relatywnie prosty opis konstytutywny właściwości betonu i stali w celu jego późniejszego uwzględnienia w sposób właściwy w modelu obliczeniowym kratownicowego układu zastępczego dla poszczególnych przedziałów odkształceń. Mimo, że przyjęty model odkształcenia betonu jest uproszczony, zwłaszcza w odniesieniu do stref ściskanych, umożliwia on opis najistotniejszych właściwości nieliniowego zachowania się betonu w konstrukcji, w tym jego osłabienia materiałowego. Przy modelowaniu współpracy betonu ze zbrojeniem przyjęto związek sprężysto-idealnie plastyczny z osłabieniem, który opisuje przyczepność betonu do stali zbrojeniowej. Model betonu obejmuje: opis sprężysty osiągnięcia wytrzymałości przyczepności początkowej, opis idealnego płynięcia plastycznego przyczepności oraz opis osłabienia materiałowego przyczepności aż do osiągnięcia odkształcenia granicznego. Dla stali zbrojeniowej przyjęto model sprężysto – plastyczny z uwzględnieniem wzmocnienia liniowego. Następnie przedstawiono model materiału zastępczego powstającego w wyniku superpozycji przyjętych modeli zachowania się betonu i stali zbrojeniowej.

Rozdział 4 zawiera opis metodyki obliczania układu konstrukcyjnego, którą opracowano na podstawie założeń kratownicowego modelu obliczeniowego dla układu zastępczego oraz porównanie wyników z rezultatami badań doświadczalnych, co jest zasadniczym przedmiotem rozprawy.

W podrozdziale 4.1 podano parametry kratownicowego modelu belki wraz z opisem obciążeń i warunków brzegowych. Przyjęto dwa schematy ograniczeń brzegowych belki. Wariant pierwszy WP-1 odpowiada schematowi belki podpartej przegubowo na obu końcach, a wariant drugi WP-2 odpowiada schematowi belki

zamocowanej na obu końcach. Wariantowo przyjęto również obciążenia. Pierwszy wariant obciążenia WO-1 stanowiły pary sił przyłożone w węzłach pasa górnego kratownicy, zaś wariant drugi obciążenia WO-2 stanowiły 2 układy 4 sił przyłożonych w węzłach pasa górnego kratownicy.

W podrozdziale 4.2 określono parametry modelu materiału zastępczego, w tym parametry dla czterech modeli materiałowych obejmujące zróżnicowane wytrzymałości na ściskanie betonu oraz zróżnicowane średnice prętów krzyżulców i pasów kratownicy. W podrozdziale 4.4 opisano analizę numeryczną przeprowadzoną z wykorzystaniem oprogramowania systemu Abaqus, w którym zaimplementowano kratownicowy model belki oraz modele materiałów zastępczych prętów zbrojenia kratownicowego.

Najważniejszy jest podrozdział 4.5, który dotyczy wyników analizy porównawczej zależności całkowitej siły obciążającej w funkcji przemieszczenia pionowego w węźle A znajdującym się poniżej punktu usytuowania jednej z sił skupionych (na belce są 2 takie punkty). Na wykresach zależności $P - w_A$ można wyodrębnić odcinki wynikające z poszczególnych faz pracy materiału zastępczego. Zależności otrzymane w przypadku wariantu pierwszego (WP-1) warunków brzegowych, odpowiadające schematowi belki podpartej przegubowo na obu końcach, lepiej odzwierciedlają wyniki badań doświadczalnych, niż zależności otrzymane w przypadku wariantu drugiego (WP-2), odpowiadające schematowi belki zamocowanej na obu końcach (co raczej było do przewidzenia).

Rozdział 5 zawiera podsumowanie i wnioski, natomiast rozdział pt. Literatura – zestawienie literatury cytowanej w rozprawie. Z podsumowania wynika, że cel pracy został osiągnięty, ale pewne zagadnienia wymagają dalszych badań.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów

Recenzowana rozprawa obejmuje ważne problemy badawcze związane z zagadnieniami mechaniki elementów i konstrukcji żelbetowych, głównie zginanych. Analiza różnego typu elementów i konstrukcji żelbetowych przy zastosowaniu analogii kratownicowych jest z jednej strony powszechnie stosowanym narzędziem rozwiązania zagadnień konstrukcyjnych w budownictwie betonowym, a z drugiej strony stanowi przedmiot szybko w ostatnich latach rozwijających się narzędzi badawczych (co opisano we wstępie do rozprawy), aczkolwiek normy europejskie nakładają na tego rodzaju analizę elementów żelbetowych pewne ograniczenia,

których zakres można poddawać pod dyskusję. Tematyka rozprawy jest więc aktualna, ponieważ brakuje w przepisach normowych i w literaturze wystarczająco ścisłych metod projektowania elementów i konstrukcji żelbetowych zbrojonych gęstymi siatkami skratowań, będących przedmiotem rozprawy, przy czym kierunki siatek skratowań usytuowanych pod kątem 45° na dużych obszarach pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych. Stąd podjęty temat przez doktoranta jest ważny i w pełni wpisuje się w potrzeby praktyki budowlanej, o czym świadczy uzyskany patent. Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się więc w aktualne problemy badawcze.

Rozprawa prezentuje nową metodę analizy numerycznej elementów ze zbrojeniem poprzecznym w postaci siatek kratownicowych, w której wykorzystano kratownicowy model belki i zastępczy model materiału. Układ dwóch tradycyjnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych: betonu i stali zbrojeniowej zastąpiono modelową kratownicę o cechach geometrycznych zgodnych z kratownicowym układem zbrojenia, której pręty zamodelowano jednorodnym materiałem zastępczym. Model ten w postaci jednorodnego materiału zastępczego dla prętów kratownicy stanowi modyfikację właściwości stali zbrojeniowej przez uwzględnienie naprężeń przyczepności w betonie współpracującym na obwodzie pręta zbrojeniowego. Przeprowadzając obliczenia numeryczne wykorzystano systemowe oprogramowanie metody elementów skończonych Abaqus, w którym zastosowano wyprowadzone parametry modeli obliczeniowych dla kratownicy i materiału zastępczego. Rezultaty analizy numerycznej porównano z wynikami badań doświadczalnych belek zbrojonych kratownicowo i uzyskano zadowalającą zgodność wykresów zależności $P - w_A$ oraz nośności w modelu numerycznym z wykresami tych zależności i nośnością belek uzyskanymi doświadczalnie.

Biorąc powyższe pod uwagę, ważną pozytywną cechą rozprawy jest postawienie przez doktoranta praktycznych i teoretycznych celów, które zostały osiągnięte nie tylko na drodze szeroko zakrojonych badań laboratoryjnych, ale także na drodze analiz teoretycznych, obliczeń numerycznych oraz porównania wyników badań eksperymentalnych i wyników analiz numerycznych, w których wykorzystano systemowe oprogramowanie metody elementów skończonych Abaqus wraz z wprowadzeniem własnych modeli obliczeniowych. Autor rozprawy jest bardzo dobrze przygotowany do prowadzenia badań naukowych i wykazał się dobrą znajomością trudnych problemów związanych z badaniami doświadczalnymi i obliczeniami numerycznymi skomplikowanych pod względem geometrii i opisu konstytutywnego elementów żelbetowych ze zbrojeniem poprzecznym w postaci siatek kratownicowych. Jednakże opracowana metoda obliczeniowa kratownicowego

modelu belki wymaga dalszych prac rozwojowych.

Reasumując ten fragment recenzji uważam, że podjęty przez doktoranta temat pracy zasługuje na pozytywną ocenę, bo jest on aktualny i praktycznie ważny tak z poznawczego, jak i z inżynierskiego punktu widzenia.

3.2. Ocena przeglądu stanu wiedzy, badań doświadczalnych i analiz numerycznych zrealizowanych przez doktoranta

Rozprawa ma charakter pracy badawczo - numerycznej i składa się z czterech zasadniczych części;

- pierwszej zawierającej opis aktualnego stanu wiedzy w zakresie rozważanych zagadnień oraz celowości wyboru metody rozwiązania problemu,
- drugiej zawierającej opis badań belek żelbetowych o przekroju prostokątnym zginanych dwoma siłami.
- trzeciej obejmującej sformułowanie zagadnienia numerycznego, w tym opisy konstytutywne materiałów konstrukcyjnych,
- czwartej części rozprawy obejmującej porównanie wyników analiz numerycznych belek zginanych z rezultatami badań doświadczalnych.

W opisie stanu istniejącego powołano literaturę polską oraz zagraniczną (32 pozycje).

W analizie stanu wiedzy wskazano, że dotychczasowe metody obliczeniowe elementów żelbetowych w zakresie nieliniowym przy zastosowaniu metody elementów skończonych nie obejmowały procedury rozwiązywania prostych układów ciągłych w postaci belek żelbetowych poprzez zastępowanie ich układami dyskretnymi w postaci kratownic wielokrotnie statycznie niewyznaczalnych. Na tej podstawie sformułowano tezę pracy, że możliwe jest takie ukształtowanie prętów poprzecznych zbrojenia w elementach zginanych, które w stosunku do zbrojenia tradycyjnego w postaci strzemion zapewnią wyższy stopień jednorodności elementu wyrażający się bardziej równomiernym rozkładem naprężeń, bardziej równomiernym zarysowaniem o mniejszych szerokościach rys oraz wyższą nośnością i mniejszym ugięciem przy jednakowym obciążeniu.

W drugiej części rozprawy opisano przeprowadzone przez doktoranta badania czteropunktowego zginania belek. Przedmiotem tych prac były badania nośności i ugięć oraz rejestracja mechanizmu zarysowania i zniszczenia belek. Porównano wyniki badań belek zbrojonych zbrojeniem tradycyjnym i masowo równoważnym zbrojeniem kratownicowym. Przygotowano stanowisko do badań i rejestracji procesu

zniszczenia belek żelbetowych. Wykonano również badania wytrzymałościowe materiałów konstrukcyjnych: betonu i stali zbrojeniowej. Wyniki badań materiałowych posłużyły do kolejnego etapu analizy obliczeniowej nośności belek, a następnie do porównania wyników doświadczalnych z wynikami symulacji komputerowej w trzeciej i czwartej części rozprawy.

W ramach analizy żelbetowych elementów zginanych największym problemem było ściśle wymodelowanie struktury materiałowo-konstrukcyjnej ze względu na jej złożoność. Z tego względu zastosowano model materiału zastępczego wykorzystując systemowe oprogramowanie metody elementów skończonych Abaqus, w którym wprowadzono parametry modeli obliczeniowych materiału zastępczego i kratownicy. W celu uzyskania wyników analiz nieliniowych żelbetowych elementów zginanych doktorant musiał wykorzystać autorskie oprogramowanie komputerowe w postaci procedury Umat w języku Fortran 77.

Ostatecznym wynikiem pracy jest otrzymanie i wykonanie wykresów przemieszczeń w funkcji obciążenia, według których można określać nośność i odkształcalność badanych elementów żelbetowych podlegających zginaniu. Oryginalnością rozwiązania **jest otrzymanie powyższych wykresów przy założeniu modelu współpracy betonu ze stalą zbrojeniową z gałęzią opadającą po przekroczeniu granicznych odkształceń przyczepności**, co umożliwia np. zobrazowanie chwilowych spadków nośności konstrukcji, mogących mieć miejsce przy niskim stopniu zbrojenia.

Badania numeryczne opisane w czwartej części rozprawy zostały zrealizowane według własnego programu opracowanego przez doktoranta. Sposób wykonania badań numerycznych można uznać za oryginalny.

Na podstawie badań doświadczalnych oraz wyników analitycznych autor rozprawy wykazał zbieżność pomiędzy wynikami analiz a wynikami badań, co zwłaszcza widoczne jest w przypadku analiz II serii belek, gdy zbrojenie podłużne jest bardziej kompatybilne z ich rozpiętością. Rozbieżności w przypadku obliczeń belek w schemacie zamocowanym WP-2 wynikają z odmiennego sposobu badania elementów w postaci czteropunktowego zginania belek, co jest zupełnie zrozumiałe.

Podsumowując stwierdzam, że badania doświadczalne i analizy numeryczne w poszczególnych etapach zaprogramowano i wykonano właściwie. Nie wnoszę zastrzeżeń do metodyki zrealizowanych badań i analiz numerycznych. Na wysoką ocenę zasługuje staranność doktoranta w prowadzeniu badań doświadczalnych wraz z porównaniami analiz numerycznych do wyników eksperymentów w skali 1:1, a

także bardzo dobre ich udokumentowanie. Sposób prezentacji wyników własnych jest przejrzysty.

3.4. Ocena wartości naukowej pracy

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy, za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe doktoranta można uznać, co następuje.

1. Opracowanie nowej metody analizy numerycznej elementów ze zbrojeniem poprzecznym w postaci siatek kratownicowych, z wykorzystaniem kratowniczowego modelu belki i zastępczego modelu materiału, przy zastosowaniu nowoczesnych narzędzi informatycznych, wraz z uruchomieniem algorytmu numerycznego. W przeprowadzonej analizie kompozycję dwóch tradycyjnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych: betonu i stali zbrojeniowej zastąpiono przez modelową kratownicę o cechach geometrycznych zgodnych z kratownicowym układem zbrojenia, której pręty zbudowane są z jednorodnego materiału zastępczego.
2. Opracowanie modelu jednorodnego materiału zastępczego prętów kratownicy stanowiącego modyfikację właściwości stali zbrojeniowej przez uwzględnienie naprężenia przyczepności w betonie współpracującym na obwodzie pręta zbrojeniowego.
3. Opracowanie symulacji numerycznych deformacji i zniszczenia belek żelbetowych z wykorzystaniem oprogramowania systemowego metody elementów skończonych Abaqus, w którym wprowadzono parametry modeli obliczeniowych – kratownicy i materiału zastępczego. W ramach tej symulacji uzyskano opis narastających naprężeń i przemieszczeń w kolejnych krokach obciążenia elementu konstrukcyjnego.
4. Oryginalnym elementem jest także opracowanie i zrealizowanie własnego programu badań doświadczalnych, co pozwoliło na porównanie wyników analiz numerycznych wykonanych przy użyciu własnego algorytmu numerycznego z wynikami powyższych badań.

4. Uwagi o pracy

Uwagi recenzenta o pracy można pogrupować następująco:

4.1. Uwagi recenzenta o pracy o charakterze merytorycznym

Nasuwają się dwie uwagi o pracy o charakterze merytorycznym.

Pierwsza uwaga dotyczy zaproponowanego modelu jednorodnego materiału zastępczego prętów kratownicy w postaci modyfikacji właściwości stali zbrojeniowej przez uwzględnienie naprężenia przyczepności w betonie współpracującym na obwodzie pręta zbrojeniowego. Zarówno punkt wyjścia – równanie równowagi sił wypadkowych naprężeń w materiale zastępczym oraz z drugiej strony naprężeń w stali zbrojeniowej pręta i naprężeń przyczepności betonu, jak i wynik końcowy rozważań, którym jest model materiału zastępczego w postaci zależności naprężenie-odkształcenie przedstawiony na rys. 3.4 – nie budzą zastrzeżeń. Natomiast sposób wyznaczenia tzw. „współczynnika homogenizacyjnego” prowadzi do wniosków o charakterze polemicznym. Z równania równowagi sił wokół pręta zbrojeniowego, jak i z zawartości pozycji literaturowych ostatnich lat, w tym „*fib Model Code for Concrete Structures 2010*” (Jan. 2013) wynika, że wartość „współczynnika homogenizacyjnego” powinna być odwrotnie proporcjonalna do efektywnego stopnia zbrojenia, zaś wprost proporcjonalna do współczynnika β_t . Jest to współczynnik charakteryzujący przyczepność prętów do betonu, zależny od rodzaju i kształtu prętów zbrojeniowych, czasu trwania obciążenia, rodzaju konstrukcji itp. Z drugiej strony recenzent zdaje sobie sprawę, że w rozpatrywanym przypadku poprawne wyznaczenie efektywnego stopnia zbrojenia mogłoby natrafiać na pewne trudności. Kiedy jednak doktorant stwierdza, że opracowana metoda obliczeniowa kratownicowego modelu belki wymaga dalszego rozwoju, to należy zaznaczyć, że (poza kwestią rozważań teoretycznych) do modelu materiału zastępczego należałoby wprowadzić współczynnik β_t i wartość jego poddać kalibracji na specjalnych elementach próbnym, tak aby sam model materiału zastępczego znalazł silne oparcie w wynikach badań doświadczalnych.

Druga uwaga recenzenta dotyczy sposobu obciążenia elementów próbnym, które we wszystkich przebadanych przypadkach zniszczyły się z uwagi na zginanie w strefie zerowych sił poprzecznych, podczas gdy w belkach poddanych jednoczesnemu zginaniu i ścinaniu trajektorie naprężeń głównych na dużych obszarach pokrywają się z kierunkami siatek skratowań usytuowanych pod kątem 45°. Gdyby więc w części elementów próbnym siły skupione usytuowano bliżej podpór, o nośności elementów próbnym zadecydowałoby ścinanie lub zginanie ze ścinaniem. W przypadku tak przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz

numerycznych ujawiłyby się rzeczywiste efekty i korzyści płynące z zastosowania zbrojenia hiperstatycznymi układami kratownicowych siatek z prętów stalowych usytuowanych pod kątem 45°. Stąd pewien niedosyt recenzenta.

4.2. Uwagi redakcyjne

4.2.1. Uwagi redakcyjne w odniesieniu do tekstu rozprawy

Tekst rozprawy napisany został dobrym językiem polskim, ale we wstępie do rozprawy jest kilka niezręcznych sformułowań. Podaję 2 przykłady:

1. Str. 8.: „Dla takiego procesu przekształcenia kluczowym założeniem jest koncepcja układu sieci, tj. dyskretnego zbioru ciągłych krzywych, który zachowuje topologię charakterystyki powłoki, co umożliwi wykorzystanie rachunku różniczkowego do wnioskowania o strukturach zbliżających do granic nośności”. Nie wiadomo, czym są owe „struktury zbliżające do granic nośności”.
2. Str. 9.: „Problematyka ta zajmuje znaczące miejsce we współczesnych badaniach i praktyce projektowej, Konferencja (2018)”. Nie podano, o jaką konferencję chodzi.

Ponadto są pewne usterki dotyczące cytowań. Na tronie 17 doktorant pisze, że „Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metodyki określonej w pracy *Zagrodzkiej-Godyckiej* (1999)”. Podobnie na stronie 4 i konsekwentnie w spisie literatury. W rozdziale Literatura na pozycji 5 mamy: „Eurokod 2 PN EN 1991”. Po pierwsze normy z serii Eurokod 1: PN-EN 1991 to jeden zestaw norm, a normy z serii Eurokod 2: PN-EN 1992 to drugi zestaw norm, a po drugie normy PN-EN 12390-3 (na poz. 20) i norma PN-EN 206 (na poz. 21) zacytowane zostały (w przeciwieństwie do EC2) w całości i prawidłowo.

4.2.2. Uwagi redakcyjne do rysunków

Na rysunku 1.26, który przedstawia porównanie ugięć dla przykładowych belek I, II i III serii, opisy wykresu są omyłkowo zamienione. Wykres na rysunku 1.26 oznaczony kolorem niebieskim przedstawia przykładowy wynik belki I serii, a wykres oznaczony kolorem zielonym oznacza przykładowy wynik belki III serii.

Zamiany krzywych dokonano także na rysunkach od rys. 4.8. do rys. 4.11. W opisie rysunków zamieszczonych w punkcie 4.5 doktorant pomyłkowo zamienił opisy oznaczeń wariantu z przesuwem (WP-1) odpowiadającemu schematowi przegubowego podparcia belek i wariantu nieprzesuwanego (WP-2), odpowiadającemu schematowi utwierdzenia belek na podporach.

Ponadto we wstępie niezbyt trafne są podpisy pod rysunkami 1.2 i 1.3. Cytuję: „Przykładowe rodzaje struktur Michella 2D” pokazane na rys. 1.2 to w rzeczywistości projekty budynków wysokich inspirowane strukturami Michella 2D, a „Przykładowe rodzaje struktur Michella 3D” pokazane na rys. 1.3 to w rzeczywistości potencjalne zastosowania struktur Michella 3D (zdjęcia te nie przedstawiają struktur Michella).

4.4. Uwagi recenzenta co do kierunków dalszych badań

Ważne stwierdzenie we wnioskach z pracy jest następujące: „Opracowana metoda obliczeniowa kratownicowego modelu belki wymaga dalszego rozwoju”.

W tej sytuacji warto rozważyć celowość kilku kierunków dalszych badań.

1. Warto przeanalizować zachowanie się elementów próbnych przy obciążeniach wywołujących ścinanie lub zginanie ze ścinaniem (o czym wspomniano w p. 4.1 recenzji), a także skręcenie elementów, gdyż właśnie w takich przypadkach ujawniłyby się istotne korzyści wynikające z zastosowania zbrojenia w postaci siatek z prętów usytuowanych pod kątem 45° .
2. Istnieje potrzeba dokonania kalibracji tzw. „współczynnika homogenizacyjnego”, przy uwzględnieniu uwag w tym zakresie podanych w p. 4.1 recenzji.
3. Ciekawe zastosowanie płaskich siatek o kratownicowym układzie prętów do zbrojenia betonu w konstrukcjach żelbetowych może stanowić dodatkowe zbrojenie płyt na ścinanie przy przebiciu. W tym miejscu należałoby jednak zwrócić uwagę, że norma Eurokod 2: PN-EN 1992-1-1 w p. 6.4.5 (5) postanawia, iż „jeżeli jako zbrojenie na ścinanie stosuje się wyroby zastrzeżone (przez patenty), to wartość $V_{Rd,cs}$ należy określić na podstawie badań, zgodnie z odpowiednią Europejską Aprobata (obecnie Ocena) Techniczną”. W Polsce może to być także Krajowa Ocena Techniczna, którą wydają jednostki notyfikowane, takie jak Instytut Techniki Budowlanej. Wydanie Krajowej Oceny Technicznej wymaga przeprowadzenia badań doświadczalnych z udziałem jednostki notyfikowanej. W przypadku, gdy uda się już pozyskać odpowiednie środki finansowe na ten cel, badania takie znacznie poszerzają naszą wiedzę w omawianej dziedzinie.

5. Wnioski końcowe

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Zychowicza pt: „Badania doświadczalne i numeryczne belek betonowych zbrojonych płaskimi siatkami o

kratownicowym układzie prętów " rozwiązuje sformułowane w tezie pracy oryginalne zadanie naukowe, dotyczące opracowania nowej metody analizy numerycznej elementów ze zbrojeniem poprzecznym w postaci siatek kratownicowych z wykorzystaniem kratowniczego modelu belki i zastępczego modelu materiału. Opracowanie symulacji numerycznych deformacji i zniszczenia belek żelbetonowych z wykorzystaniem oprogramowania systemowego metody elementów skończonych Abaqus, w którym wprowadzono parametry modeli obliczeniowych – kratownicy i materiału zastępczego, umożliwiło opis narastających naprężeń i przemieszczeń w kolejnych krokach obciążenia elementu konstrukcyjnego. Walidacja tej metody analizy była możliwa dzięki stworzeniu podbudowy doświadczalnej w postaci własnego programu badań elementów próbnych. Zarówno metodyka rozwiązywania problemów, jak i opracowane wnioski mają z jednej strony walory naukowe i poznawcze, a z drugiej strony mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce inżynierskiej. Jest to moim zdaniem ważna zaleta rozprawy.

Autor pracy wykazał się odpowiednimi umiejętnościami prowadzenia badań doświadczalnych, analiz teoretycznych i numerycznych oraz programowania. Doktorant otrzymał oryginalne wyniki tych badań i analiz, które krytycznie ocenił i wyciągnął trafne wnioski. Świadczy to o predyspozycjach i odpowiednim jego przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie umniejszają wartości naukowej rozprawy, która wnosi w przedmiotowym temacie istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie budownictwo.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnoszące się do prac doktorskich zawarte w Ustawie o tytule i stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 roku (Dz. U. Nr 65 z 2003 r., poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. i stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony tej rozprawy.

