

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka

RECENZJA DYSERTACJI DOKTORSKIEJ

mgr inż. Artura Kotarskiego

pt.

**”ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU ZBROJENIA POPRZECZNEGO NA
ZACHOWANIE MECHANICZNE SŁUPA BETONOWEGO”**

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zdzisława Więckowskiego

Podstawa opracowania: powołanie przez Radę ds. Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżyniera Lądowa i Transport oraz Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej z dnia 01.06.2021, a także umowa o dzieło pomiędzy Politechniką Łódzką a recenzentem.

1. Problem naukowy, przedmiot i charakter dysertacji

Problemem podjętym w recenzowanej dysertacji doktorskiej jest opis numeryczny zachowania słupa betonowego skrępowanego zbrojeniem poprzecznym.

Idea skrępowania betonu i wykorzystania „nadwyżki” nośności powstałej dzięki ograniczeniu odkształceń poprzecznych jest niemal tak stara jak żelbet. We współczesnych procedurach projektowych wzrost nośności słupów żelbetowych w wyniku aktywizacji zbrojenia poprzecznego nie jest jednak uwzględniany ze względu na stwierdzoną doświadczalnie niewielką jego wartość pod obciążeniami eksploatacyjnymi w stanach granicznych nośności. Jest natomiast często rozważany w analizach słupów poddanych obciążeniom sejsmicznym jako rezerwa plastyczna. I w takim ujęciu wybór przedmiotu dysertacji uznaję za trafny z punktu widzenia nie tylko poznawczego (budowanie modeli numerycznych różnych konstrukcji) ale i praktycznego. Zwrócić trzeba też uwagę, że obecnie zagadnienie skrępowania budzi zainteresowanie badaczy w aspekcie wzmacniania słupów przez owijanie matami kompozytowymi oraz ze względu na coraz szersze stosowanie słupów zespolonych CFST w postaci stalowej rury wypełnionej betonem.

Muszę jednak zwrócić uwagę na zbyt szeroki, w stosunku do wykonanych analiz, tytuł dysertacji, a konkretnie odniesienie do nie sprecyzowanego w tytule „słupa betonowego”. Doktorant zajmował się jedynie przekrojem słupa (płaski stan odkształcenia) nie uwzględniając wpływu smukłości. Takie podejście jest zrozumiałe, bowiem w przypadku słupów smukłych potwierdzono znikomy wpływ skrępowania. Doktorant w tekście wielokrotnie używa określenia „słup krępy”, ale w tytule pracy brakuje tego ograniczenia. Ponadto analizy przeprowadzone w dysertacji ograniczone są do obciążenia osiowego, co również nie jest odzwierciedlone w tytule.

Recenzowana dysertacja doktorska ma charakter analityczny. W jej ramach zbudowany został model numeryczny, zastosowany następnie do opisu zachowania pod obciążeniem osiowym słupów krępych o różnych kształtach, stopniach zbrojenia i sposobach skrępowania. Do rozwiązania problemu zastosowano metodę elementów skończonych w ujęciu przemieszczeniowym uwzględniając fizyczną nieliniowość materiału. Są to niewątpliwie analizy o charakterze naukowym, a ich wnioski mogą być aplikowane w praktyce stanowiąc wskazówki przy projektowaniu krępych słupów betonowych.

2. Zawartość i układ dysertacji

W pracy wyróżnić można następujące części:

1. Część wstępna zawiera informacje ogólne dotyczące zjawiska skrępowania betonu oraz sprecyzowaną tezę pracy (rozdział 1),
2. Część studialna (rozdział 2), w której:
 - zestawiono modele obliczeniowe stosowane do opisu zjawiska,
 - opisano wybrane badania eksperymentalne słupów skrępowanych,
 - przytoczono, relacjonowane w publikacjach, wyniki analiz numerycznych słupów skrępowanych.
3. Część stanowiąca istotę pracy i zawierająca własne rozwiązanie:
 - sformułowanie problemu oraz podstawy teoretyczne rozwiązania – rozdział 3;
 - rozwiązanie zagadnienia (opis stworzonego modelu numerycznego, zastosowanych algorytmów, danych materiałowych, stosowanego oprogramowania) – rozdział 4,
 - przykłady obliczeń z wykorzystaniem stworzonego modelu, dotyczące obciążonych osiowo słupów krępych o różnych kształtach przekroju, a w przypadku przekrojów prostokątnych dodatkowo o różnych stosunkach długości boków, o różnym stopniu i sposobie ukształtowania zbrojenia poprzecznego – rozdział 5,
 - podsumowanie – rozdział 6.
4. Dodatek stanowiący wyjaśnienie teoretyczne kilku przyjętych założeń (A1, A2, A3) oraz analizę wpływu wytrzymałości betonu i stopnia zbrojenia poprzecznego na efekt skrępowania betonu (A4) - dziwi nieco zamieszczenie tych ostatnich analiz w dodatku, a nie w części głównej pracy.
5. Spisy oznaczeń, rysunków i tablic.
6. Bibliografia zawierająca 136 pozycji literaturowych, w tym 7 norm. Zawarto tu głównie publikacje anglojęzyczne, ale także 12 pozycji polsko- 5 niemiecko- i 2 francuskojęzyczne.

Praca liczy 145 stron tekstu podstawowego, a wraz z dodatkiem - 163 strony.

3. Merytoryczna ocena pracy

Ocena dysertacji zostanie przedstawiona poprzez merytoryczne oceny cząstkowe wraz z uwagami do poszczególnych części dysertacji (p.3.1 – 3.5 recenzji), a następnie ich podsumowanie w formie sprecyzowania osiągnięć i mocnych stron pracy (p. 3.6 recenzji). W p. 3.7 zawarłam uwagi do strony redakcyjnej pracy.

3.1 Cel i teza pracy

Za cel pracy Doktorant uznał: *przedstawienie i przetestowanie modelu, który w przypadku betonu skrępowanego stalowym uzwojeniem pozwala określić nośność graniczną przekroju, jego sztywność oraz rozkład naprężenia na jego powierzchni. Prezentowane rozwiązanie ma łączyć prostotę i przejrzystość dwuwymiarowego zadania, swobodę projektowania kształtu przekroju i zbrojenia poprzecznego z zadowalającą dokładnością rozwiązania.*

Doktorant postawił następującą tezę: *Przyjęte i przedstawione założenia pozwalają w pełni zrealizować cel pracy, a wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem opracowanego modelu mogą być wiarygodnym źródłem informacji o nośności przekroju uzwojonego słupa betonowego.* Teza ta jest dość mało konkretna, ale wydaje się, że w przypadku prac, których istotą są obliczenia numeryczne – uzasadniona.

3.2 Studia na temat stanu wiedzy

Studia na temat stanu wiedzy podzielono na trzy części, odnosząc się do procedur obliczeniowych, dotychczasowych badań eksperymentalnych i analiz numerycznych zjawiska. Taki wybór zagadnień uznają za prawidłowy.

W pierwszej części zestawiono w tablicach 32 procedury normowe i procedury opracowane przez badaczy, pozwalające na obliczenie wytrzymałości betonu skrępowanego oraz naprężeń poprzecznych generowanych wskutek istnienia zbrojenia poprzecznego. Omówiono kilka z nich – trzy normowe i cztery pochodzące z publikacji. Moją podstawową uwagą jest to, że zestawione prace dotyczą różnych przypadków (różnych kształtów przekroju, skrępowania betonu i zwykłego i wysokowartościowego, i stałą i kompozytami) bez sklasyfikowania i wykazania cech wspólnych i różnic. Zwraca też uwagę, że ostatnie cytowane formuły pochodzą z roku 2013. Krótka kwerenda pozwoliła mi na stwierdzenie, że później rzeczywiście brak jest publikacji formułujących wyrażenia analityczne opisujące zachowanie betonu skrępowanego zbrojeniem, są natomiast publikacje podobne dotyczące skrępowania kompozytami.

Jeśli chodzi o procedury normowe to omówiono podejście EC2-1-1, ModelCode 2010 oraz ACI 318-8, ale nie wspomniano o starszej Polskiej Normie PN-B-03264, w której podano zarówno warunki, kiedy można uzwojenie uwzględnić, jak i wyrażenie pozwalające na obliczenie nośności zbrojonego słupa uzwojonego.

W części drugiej studiów literaturowych opisano 7 prac eksperymentalnych dotyczących słupów ze zbrojeniem krępującym odkształcenia poprzeczne. Opisy są, moim zdaniem, zbyt ogólnikowe, zwłaszcza badania *Yina, Wanga* i *innych*, które były przedmiotem analiz własnych Doktoranta powinny być opisane szerzej.

Bibliografia nie zawiera kilku istotnych prac na temat skrępowania betonu zamieszczonych w ACI Structural oraz Magazine of Concrete Research (szczególnie praca *Lokuge, Stunge* i *Sanjayan*, którzy uzależnili efektywność skrępowania od skoku uzwojenia).

W części trzeciej opisano pięć publikacji, w których dokonano analiz numerycznych słupów „skrępowanych” zbrojeniem i kompozytami. W większości były to analizy modeli trójwymiarowych.

Studia literaturowe zakończone są podsumowaniem, w którym podkreślono, że skrępowanie jest efektywne w jedynie w przypadku słupów krępych ściskanych osiowo. Moim zdaniem brakuje wniosków na temat warunków konstrukcyjnych - rozstawu zbrojenia poprzecznego zapewniającego efektywność skrępowania, wpływu mimośrodowego obciążenia oraz rozwinięcia podanej informacji: *w pewnych sytuacjach może dojść do zniszczenia elementu przed uzyskaniem oczekiwanej nośności.*

3.3 Założenia przyjęte do analiz numerycznych

W analizach numerycznych przyjęte zostały następujące założenia:

- Zasada de'Saint Venanta oraz rozmycie dyskretne zbrojenia poprzecznego wzdłuż długości słupa.

Założenia te stały się podstawą wykonania modelu dwuwymiarowego i założenia płaskiego stanu odkształcenia. Stwierdzono, że *obliczenia będą prowadzone dla przypadków, które można uznać za pozwalające na rozmycie zbrojenia*, nie podano jednak, jaki warunek dla rozstawu zbrojenia poprzecznego przyjęto jako *pozwalający na rozmycie zbrojenia* i z jakich przesłanek on wynika. Myślę, że należało wykonać ocenę stopnia uproszczenia polegającego na przyjęciu płaskiego stanu odkształcenia lub ocenę wpływu skoku uzwojenia na wyniki (*vide* – p.3.2 recenzji).

- Odrzucenie wpływu otuliny – w analizach nośności takie założenie jest dopuszczalne, jednak w tytule pracy jest *zachowanie mechaniczne słupa betonowego* i w takim kontekście założenie to jest dyskusyjne. Zwłaszcza, że analizując wyniki obliczeń Doktorant jednak ją w pewnym zakresie uwzględnił (tablice 5.3 – 5.6).
- Kryteria plastyczności przyjmowane wariantowo: dwuparametrowe kryteria *Coulomba-Mohra* i *Druckera-Pragera* z niestowarzyszonym prawem płynięcia oraz pięcioparametrowy model *Willama-Warnkego* (w pracy opisano więcej kryteriów, ale stosowano te trzy), przy warunku początkowym jakim jest zerowe pole naprężenia i przemieszczenia w przekroju oraz warunku brzegowym, jakim jest zerowy wektor naprężenia na brzegu słupa.
- Pominięcie zbrojenia podłużnego, którego wpływ, wedle deklaracji na str. 56, *został uwzględniony na etapie obróbki wyników*. Należałoby sprecyzować, jak to zostało zrealizowane, bowiem w opisach i analizach wyników nie znalazłam odpowiednich informacji.

To założenie uważam za zbyt duże uproszczenie, bowiem samo istnienie „niebetonowego” elementu przekroju zdecydowanie wpływa na nośność słupa, ponadto wskutek różnych odkształcalności zbrojenia i betonu powstają naprężenia na ich styku. Nierównomierny rozkład naprężeń osiowych w przekroju widoczny jest w modelach trójwymiarowych prezentowanych np. w publikacji oznaczonej w pracy numerem [44].

- Przemieszczeniowe ujęcie metody elementów skończonych - dyskretyzacja elementami skończonymi (zbrojenie – krzywoliniowy element prętowy 3-węzłowy, beton – trójkątny element 6-węzłowy); pole przemieszczeń wyrażone za pomocą funkcji kształtu oraz przemieszczeń węzłów; rozwiązanie równania macierzowego metodą przyrostowo-iteracyjną, oraz obliczenie składowych tensorów naprężenia i odkształcenia po uplastycznieniu zgodnie z algorytmem *return mapping*.
- Obciążenie kinematyczne w postaci skrócenia słupa.
Takie obciążenie jest uzasadnione i prawidłowe w przypadku uwzględnienia jedynie obciążeń doraźnych. Zachęcam Doktoranta, aby w swoich dalszych pracach uwzględnił także wpływ skurczu betonu skutkującego wstępnym stanem naprężeń.
- Parametry materiałowe:
 - Przyjęto dwuliniowy model zachowania betonu ściskanego i rozciąganej stali. Przyjęto zatem stałe wartości modułu sprężystości i współczynnika Poissona betonu oraz modułu Younga stali zbrojeniowej.
W kontekście tytułu pracy (*zachowanie mechaniczne słupa betonowego*), przyjęcie stałej wartości modułu sprężystości betonu równej E_{cm} , która według EC-2-1-1 jest wartością sieczną charakteryzującą zachowanie betonu w zakresie naprężeń równych 10 do 40% wytrzymałości średniej na ściskanie, jest zbyt dużym uproszczeniem.
 - Do opisu warunku plastyczności betonu przyjęto, po pogłębionej analizie, kąt tarcia wewnętrznego i spójność jako wartości zależne od jednoosiowych wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie betonu. Przyjęto także kąt dylatacji (niestety z podrozdziału na str. 77, zawierającego analizę parametru ψ , nie wynika jaką ostatecznie wartość przyjęto).
 - W modelu *Willama-Warnkego* przyjęto oryginalne wartości parametrów, zgodnie z zależnościami proponowanymi przez autorów modelu.
- Proces obliczeniowy:
Użyto programu FENAP (autorem programu jest promotor dysertacji), a także Maple 12 oraz LibreOffice Calc do „obróbki” wyników.
Stosowano siatkę o maksymalnym wymiarze 10% dyskretyzowanego pola, zmniejszaną o rząd wielkości w miejscach możliwych koncentracji naprężeń.

3.4 Analizy numeryczne i ich wyniki

3.4.1 Omówienie wykonanych analiz numerycznych

W pierwszym etapie pracy (rozdział 5.1) wykonano obliczenia słupów badanych przez *Yina, Wanga i innych*. Analizowano cztery sposoby kształtowania zbrojenia poprzecznego, pokazane na rysunku 5.1: klasyczne strzemiona czterocięte w obydwu kierunkach, cztery przenikające się uzwojenia obejmujące zbrojenie pionowe rozłożone równomiernie, cztery uzwojenia obejmujące zbrojenia pionowe zgrupowane w narożach i objęte dodatkowym uzwojeniem zewnętrznym oraz uzwojenie obejmujące pręty rozmieszczone na obwodzie, które dodatkowo były „zszyte” po przekątnej.

Jak napisano, *przekroje poprzeczne uzwojenia zostały dobrane tak, aby odpowiadały jednostkowej długości słupa*. Zważywszy wcześniejszą deklarację, że otulina została pominięta oznacza to, że analizowany był rdzeń betonowy o wysokości 1 m, otoczony lub/i „przecięty” pionowymi warstwami (blachami lub „opaskami”) stalowymi. Nie pokazano jednak rysunku modelowanych przekrojów z odrzuconą otuliną, na których podano by grubość tych warstw stalowych.

Wyniki obliczeń przedstawione zostały na rysunkach 5.3-5.9 w formie zależności „skrócenie – średnie naprężenie w rdzeniu” w porównaniu do wyników badań *Yina, Wanga i innych*. Uzyskane wykresy zostały starannie przeanalizowane, rozważano zależność wyników zarówno od sposobu uzwojenia, jak i od stosowanego kryterium plastyczności. Przebiegi uzyskanych wykresów uznano za satysfakcjonujące. W dalszych analizach dokonano interpretacji tych przebiegów rozróżniając trzy fazy pracy słupa „skrępowanego” i charakteryzując te fazy.

Pomimo zgodności przebiegu wykresów, w przypadku betonów wysokowartościowych ich wartości odbiegają od wyników doświadczalnych (dwukrotnie większa nośność niż uzyskana eksperymentalnie), co potwierdza wcześniejsze relacjonowane w literaturze wnioski z badań, że efekt skrępowania zanika ze wzrostem wytrzymałości betonu. Inne od wyników eksperymentów (przeszacowane) są też wyniki obliczeń słupów z klasycznymi strzemionami – tę różnicę Autor przypisuje nieefektywnemu zakotwieniu strzemion w badanych słupach.

W rozdziale 5.2 analizowano przekroje o różnym kształcie i stopniu zbrojenia: dwa przekroje kwadratowe 400 x 400 mm (z pojedynczym i podwójnym strzemieniem), prostokątny 400 x 1200 mm oraz kołowy o średnicy 30 mm uzwojony, przy czym rozważano różne stopnie zbrojenia poprzecznego – znów podobnie jak w przypadku poprzednich analiz dobrze byłoby podać, jak te stopnie zbrojenia przekładały się na grubości „opasek” modelujących uzwojenie.

Efektem obliczeń są wykresy obrazujące zależność *znormalizowanego średniego naprężenia w rdzeniu od stopnia zbrojenia poprzecznego*. Stwierdzono, że występuje tu liniowa lub prawie liniowa zależność. W komentarzu wyjaśniono różnice w wartościach uzyskanych z zastosowaniem poszczególnych kryteriów. Nie zdefiniowano natomiast znajdującego się w podpisie rysunku 5.14 i 5.15 pojęcia *efektywność* (czy jest to sama „efektywność”, która została zdefiniowana w tabelicy 5.2)?

Wreszcie pokazano rozkłady naprężeń głównych w płaszczyźnie przekroju i *plan warstwicy składowej poziomej wektora przemieszczenia* w stanie uplastycznienia rdzenia, nie podano jednak, która to jest składowa. Rysunki te szczegółowo skomentowano, wskazując na przyczyny różnic wynikających z użycia różnych kryteriów.

W rozdziale 5.3 analizowano przekrój prostokątny o różnych proporcjach boków: jeden z boków miał zawsze 400 mm, a drugi wymiar zmieniał się od 400 do 1200 mm. Analizy wykonano w dwóch seriach – w serii I zastosowano stały przekrój zbrojenia

poprzedniego i stały rozstaw (w efekcie uzyskano zmienny stopień zbrojenia), a w drugiej serii zmieniano rozstaw uzyskując stały stopień zbrojenia.

Wyniki zaprezentowano w tablicach i na wykresach, wskazujących na zależności *znormalizowanego średniego naprężenia w rdzeniu od stosunku długości boków*, uzyskane przy różnych kryteriach plastyczności. W tablicy 5.2, w wierszach dotyczących wariantu II, w którym zgodnie z deklaracją na str. 106 winna być stała wartość stopnia zbrojenia poprzecznego, podano wartości zmienne takie same jak w wariantcie 1. Co więcej, wyniki obliczeń są takie same jak w wariantcie pierwszym (wiersze 9, 10, 11) – skąd więc inne efektywności w stosunku do wariantu pierwszego (wiersze 12, 13, 14)?

Rozdział zakończony jest rysunkiem *efektywnie skrępowanego obszaru*, przywołanym za jedną z cytowanych publikacji. Oczekiwałoby się tu raczej analogicznego rysunku, ale wynikającego z analiz autora i porównania dwóch rysunków – cytowanego i autorskiego.

W rozdziale 5.4 analizowano 11 przekrojów kwadratowych z różnie ukształtowanym zbrojeniem poprzecznym o jednakowym jego stopniu (pięć z nich to przekroje, które były rozważane w rozdziale 5.1, natomiast 6 to różne układy strzemion). Analizy wykonywano stosując opisane wcześniej modele materiałowe. Zaobserwowano różnice wyników w zależności od zastosowanego modelu materiału.

W tablicach i analizach obok *siły osiowej w rdzeniu*, pojawia się tu pojęcie: *siła całkowita z otuliną*. Jak była obliczona ta wartość i co ona praktycznie oznacza? Na str. 41 napisano przecież: *pominięcie otuliny w rozważaniach nie powoduje zmiany końcowych wartości maksymalnej siły osiowej w przekroju, której wyznaczenie jest głównym celem analizy*. I dalej, co to znaczy: *najwyższe wartości siły osiowej tuż przed zniszczeniem mogą wystąpić w przekrojach zbrojonych 4 lub 5 zwojami, ale najwyższą nośność w stanie granicznym przedstawiają przekroje zbrojone strzemionami*. Jak definiowany jest w tym kontekście *stan graniczny*?

Uszeregowano przekroje *od najefektywniejszego do najmniej efektywnego*. Znowu pojawia się pytanie o definicję pojęcia *efektywności*. Stwierdzono, że największą nośność mają rdzenie przekrojów skrępowanych uzwojeniem, ale rdzeń w takich przypadkach jest najmniejszy w porównaniu do całego przekroju słupa. Może zatem najlepszym rozwiązaniem byłby przekrój o układzie prętów pionowych jak na rys. 5.25a, w którym strzemiona zastąpione byłyby uzwojeniem? Zwrócić też trzeba uwagę, że analizowane przekroje miały różną liczbę prętów pionowych – od 4 do 16. To musi wpływać na nośność słupów (*vide uwaga w p. 3.4 recenzji*).

Na zakończenie zaprezentowane zostały rozkłady naprężeń głównych w analizowanych przekrojach. Doktorant dokonał ich analizy identyfikując werbalnie *obszar efektywnie skrępowany*. Warto było pokusić się o ocenę ilościową, np. jaką część całego przekroju lub przekroju rdzenia stanowi *obszar efektywnie skrępowany*. Ponadto zaprezentowane zostały jedynie rozkłady uzyskane w założeniu modelu Coulomba-Mohra. Czy występują różnice *obszarów efektywnie skrępowanych* w przypadku zastosowania różnych modeli?

Na podstawie analiz wyników Doktorant wyprowadził wnioski co do sposobu kształtowania rdzenia przekroju i prowadzenia zbrojenia poprzecznego. Znalazły się tu także informacje ważne ze względu na możliwości wykonawcze (np. informacja o konieczności wykonywania długich zakotwień strzemion trudnych do realizacji w warunkach budowy).

W rozdziale 5.5 znajdują się obliczenia numeryczne słupów:

- o przekroju w kształcie litery L skrępowanych na trzy sposoby przy jednakowym stopniu zbrojenia poprzecznego. Tu również największe przyrosty nośności uzyskano dla uzwojenia, a nie dla strzemion. Stwierdzono wrażliwość wyniku na zastosowany model obliczeniowy.
- o przekroju pierścieniowym. Stwierdzono, że model numeryczny prawidłowo oddaje istotę zjawisk, ale w przypadku zastosowania kryterium Coulomba-Mohra prowadzi do zaniżenia nośności.

W prezentacji wyników tego rozdziału występuje pewna niespójność – wyniki dla przekrojów L-kształtnych zaprezentowano w postaci tablic i wykresów nie pokazujących rozkładów naprężeń głównych, a przypadku słupów pierścieniowych nie pokazano wykresów. Dlaczego?

3.4.2 Uwagi ogólne

Obok uwag szczegółowych dotyczących poszczególnych zagadnień, zaprezentowanych w p. 3.4.1 recenzji) sformułowałam także uwagi ogólne dotyczące całej pracy. Są one następujące:

- Nieprecyzyjnie używano pojęcia *stopień zbrojenia* w stosunku do definicji EC2-1-1. *Stopień zbrojenia* w rozumieniu normy to stosunek pola przekroju zbrojenia do całego przekroju, ale „przecinanego” przez to zbrojenie. Doktorant odnosi pole przekroju zbrojenia poprzecznego do poprzecznego przekroju słupa, ale taki „stopień zbrojenia” został zdefiniowany dopiero na str. 108 - to nieco utrudniało percepcję wcześniejszych fragmentów pracy.
- Czym jest *znormalizowane średnie naprężenie w rdzeniu*? Pojawia się ono w opisach osi pionowych na rys. 5.14, 5.18, 5.20, 5.21, 5.36, oraz 5.38-5.41, ale nigdzie nie zostało zdefiniowane wprost. Czy na wszystkich rysunkach jest to tak samo zdefiniowana wartość? Na czterech pierwszych skala osi pionowej zaczyna się od „1”, na piątym od „1,24”, a na pozostałych zaczyna się od zera. Dlaczego?
- Na rysunkach pokazujących *rozkład naprężeń* zaprezentowane jest jedynie $\frac{1}{4}$ przekroju (co nie zostało jawnie zapisane w podpisach rysunków). Czy było to tylko graficzne „wycięcie” ćwiartki z całego przekroju, czy też obliczenia realizowano dla $\frac{1}{4}$ przekroju korzystając z osiowej symetrii? Takiej informacji nie znalazłam w tekście.
- Rysunki pokazujące rozkłady naprężeń w przekroju podpisane są różnie: rys. 5.10 – *rozkład naprężeń osiowych*, rys. 5.16-5.18 – *rozkład naprężeń głównych*, rys. 5.22 – *rozkład naprężeń poprzecznych*, rys. 5.30-5.35 – *naprężenia główne*. Czy chodzi tu o te same, czy różne naprężenia? Ponadto w opisie tych rysunków na str. 120 stwierdzono, że *widoczny jest obszar o zdecydowanie większym gradiencie naprężeń poprzecznych*. Jak odczytywać z rysunków wartość tego gradientu?
- Ogólna uwaga dotyczy też braku jednoznacznej definicji pojęcia *efektywność*, o czym pisałam już w p. 3.4.1.

3.5 Ocena podsumowania i wniosków pracy

W pracy znajdują się dwa rozdziały - 5.6 i 6, zatytułowane *Podsumowanie*. Analizując ich treść odczuwa się niedosyt, co do sprecyzowania konkretnych końcowych wniosków, zwłaszcza w obliczu postawionej tezy, że *wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem opracowanego modelu mogą być wiarygodnym źródłem informacji o nośności przekroju uzwojonego słupa betonowego*. Informacji o nośności przekroju uzwojonego w podsumowaniu jest tu mało; myślę, że za mało w porównaniu do wniosków artykułowanych w kolejnych podrozdziałach rozdziału 5.

Rozdział 5.6 stanowi podsumowanie analiz numerycznych, dotyczące dwóch zagadnień. Najpierw sprecyzowano osiem *sposobów* (dlaczego nie wniosków?) stanowiących porównanie procesów obliczeń realizowanych z zastosowaniem różnych kryteriów plastyczności oraz wyspecyfikowano optymalne kryteria plastyczności dla konkretnego układu zbrojenia poprzecznego, wskazując na przypadki przeszacowania i niedoszacowania wyników. Następnie zestawiono sześć *obserwacji* (dlaczego nie wniosków?) dotyczących skrępowania. Niektóre z nich wymagają wyjaśnień:

- Nie znalazłam w tekście dowodu na stwierdzenie *Racjonalne zastosowanie zbrojenia poprzecznego przynosi wyższy przyrost nośności przekroju skrępowanego niż identyczna ilość zbrojenia podłużnego* – w analizach w ogóle nie uwzględniano zbrojenia podłużnego. Co rozumiane jest przez *identyczna ilość zbrojenia podłużnego* – na 1 mb długości słupa, czy stopień zbrojenia rozumiany według definicji ze str. 108?
- Na jakiej podstawie napisano, że w zakresie sprężystym $\Delta E_c \approx 0,4 \rho_l E_c$? Nie znalazłam w tekście takiego wyliczenia zaprezentowanego jawnie.
- Nie negując ogólnej prawdziwości obserwacji 6 muszę zadać pytanie, czy wynika ona z analiz Doktoranta.

W kolejnym podpunkcie rozdziału 5.6 w tabelicy 5.8 obliczono różnymi metodami, zestawionymi wcześniej w tablicach 2.1-2.3, *średnie naprężenia osiowe w stanie granicznym*, porównując je z uzyskanymi we własnych analizach numerycznych. Ta tablica jest, moim zdaniem, kluczowym efektem pracy. Wyniki Doktoranta nie odbiegają istotnie od wartości naprężeń uzyskanych metodami normowymi oraz opracowanymi na podstawie danych eksperymentalnych. Rozrzut wyników eksperymentalnych w odniesieniu do naprężeń osiowych to 32,27 – 46,66 MPa (wydaje się, że pojedynczą wartość 62,82 MPa można z analiz odrzucić), a Autor uzyskał, w zależności od modelu, od 33,92 do 43,65 MPa. Jeśli chodzi o naprężenia poprzeczne, to Autor uzyskał przy zastosowaniu trzech kryteriów spójny wynik 2,9 MPa, podczas gdy według procedur literaturowych wynoszą one od 1,43 do 3,18 MPa (wydaje się, że pojedynczy wynik 5,31 MPa można odrzucić). Pozostaje tylko kolejne pytanie „nomenklaturowe”: co rozumiane jest tu pod pojęciem *stanu granicznego*? W tabelicy 2.1 używano sformułowania *wytrzymałość rdzenia*.

W rozdziale 6 stanowiącym, jak rozumiem, ostateczne podsumowanie pracy znowu nie ma jasno wyartykułowanych wniosków. Zapisano raczej ogólne stwierdzenia np. *bardziej optymalne prowadzenie zbrojenia poprzecznego pozawala uzyskać do 20% lepsze efekty skrępowania niż przy zastosowaniu najprostszycy rozwiązań*. Tu powinny być konkretne wnioski co do analizowanych typów zbrojenia. Poza tym jest to stwierdzenie nieprecyzyjne wobec tego co napisano na str. 117: *najefektywniejszy ... jest kształt pojedynczego zwoju* - czy to on nie jest najprostszycy?

Wartościowa jest natomiast rekomendacja, aby w analizach skrępowania betonu stosować kryterium plastyczności Druckera-Pragera w wariacie stożka opisanego na ostrosłupie Coulomba-Mohra.

Na zakończenie Autor zestawil *główne cechy pracy*, charakteryzując tu zarówno zawartość pracy jak i cechy zastosowanego modelu numerycznego. Moim zdaniem brakuje jasnego sprecyzowania, czym rozwiązanie przedstawione w pracy jest lepsze od dotychczasowych (tych prezentowanych w ramach studiów literaturowych), w czym tkwi jego oryginalność i nowość.

3.6 Osiągnięcia oraz mocne strony pracy

Recenzowana dysertacja doktorska ma, jak już pisałam wyżej, charakter analityczny. Podjęty przez Doktoranta problem naukowy został rozwiązany w sposób oryginalny. Za osiągnięcia i mocne strony pracy uznaję

- stworzenie modelu numerycznego dwumateriałowej konstrukcji, uwzględniającego sprężysto-plastyczne zachowanie betonu i stali, który daje wyniki nie odbiegające od danych eksperymentalnych;
- przeprowadzenie analiz numerycznych przy trzech różnych kryteriach plastyczności i rekomendowanie jednej z nich do zastosowania w przypadku analiz betonu skrzepowanego,
- analizy wielu różnych sposobów zbrojenia poprzecznego słupów o różnorodnych kształtach (w tym nietypowych), choć w podsumowaniu pracy brakuje konkretnych wniosków w tym zakresie.

Doktorant nie ustrzegł się dyskusyjnych uproszczeń oraz nieścisłości, które wyspecyfikowałam w p. 3.1 – 3.5 recenzji. Powinny one być przedmiotem dyskusji w czasie publicznej obrony.

3.7 Ocena układu i strony redakcyjnej pracy

Układ pracy jest tradycyjny – najpierw część studialna, następnie sformułowanie zagadnienia z opisem założeń, następnie prezentacja kolejnych rozwiązywanych zadań obliczeniowych z analizą poszczególnych rozwiązań (poza analizą wpływu parametrów wytrzymałościowych betonu i stali, która została zamieszczona w załączniku), wreszcie uogólnienie wyników w formie podsumowania.

Praca napisana jest poprawnym językiem, ale z pewnym brakiem konsekwencji w kolejności prezentowanych treści (najpierw używanie przyjętego założenia, pojęcia czy rysunku, wiele stron dalej wyjaśnienie, definicja czy interpretacja rysunku). To zdecydowanie utrudnia czytanie pracy i uniemożliwia bezpośrednią ocenę czytanych kolejno fragmentów. W szczególności:

- „Stopień zbrojenia” został zdefiniowany dopiero na str. 108, choć pojęcie było używane wcześniej.
- Zasadę przyjętą dla odrzucenia otuliny w czwartym przekroju znajdującym się na rys. 5.1 na str. 85 (uzwojenie + „szpilki”) podano dopiero na str. 116 przy omawianiu kolejnej serii analiz.
- W tekście już od strony 93 pojawiają się rysunki *rozkładu naprężeń osiowych* (rys. 5.10), ale dopiero na str. 135, przy opisie ostatniej serii analiz wyjaśniony jest sposób ich tworzenia i interpretacji.
- Przyjęta w pracy definicja *stopnia zbrojenia* pojawia się dopiero na str. 108.
- Przekroje opisywane na str. 97 pokazane są na rysunkach dopiero na str. 112.

Zauważyłam także pewne inne uchybienia redakcyjne, zestawione poniżej. Nie mają one wpływu na merytoryczną ocenę pracy i nie wymagają odpowiedzi podczas obrony dysertacji. Nieścisłości i nieprecyzyjne sformułowania są następujące:

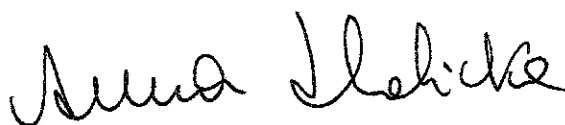
- Nieprecyzyjnie (zamiennie) używano wyrażen *wytrzymałość* (która jest cechą materiałową) i *nośność* (która jest cechą elementu konstrukcyjnego).
- W pracy znajduje się kilka rysunków nie przywołanych w tekście np. rys. 2.3, 4.10, 5.2, 5.3-5.10.
- Na rysunku 5.1 pokazano cztery analizowane przekroje bez oznaczenia ich np. symbolami. Na rysunku 5.2 pokazano fragmenty siatek wykorzystanych do obliczeń w tych czterech przypadkach również bez oznaczenia i na dodatek są one ustawione w innej kolejności jak przekroje pokazane na rysunku 5.1. Utrudnia to czytanie i analizę tekstu.
- Kilukrotnie pojawia się kryterium *Wilama-Warnkego* zamiast *Willama-Warnkego* (np. str. 83, 93).

- W podpisach rysunków 5.16 - 5.18 nie napisano, którego z analizowanych przekrojów rysunki dotyczą.
- Wykresy byłyby łatwiejsze do analiz, gdyby wykonane były w tej samej skali, przynajmniej dla poszczególnych serii.
- Po co wartości na osi pionowej rysunku 5.20 podane są do czwartego miejsca po przecinku, skoro różnica między nimi jest 0,05?
- Podpis rysunku 5.23 powinien być uzupełniony: *stopień zbrojenia przy stałym przekroju zbrojenia.*
- Na str. 117 napisano, że wybrano model Druckera-Pragera, który *dał średnie wyniki spośród zastosowanych modeli materiałowych.* Z wykresów w rozdziałach 5.1-5.3 wynika jednak, że nie były to wartości *średnie* tylko *pośrednie.*
- Na rysunkach 5.30-5.35 powinny zostać pokazane przekroje, których dany rysunek dotyczy, byłoby to czytelniejsze niż opisy w podpisach.
- Na str. 120 napisano: *co widać na planach warstwicznych, rys. od 5.30 do 5.35,* tymczasem na rysunkach 5.30-5.35 nie ma planów warstwicznych.
- Na str. 141 napisano *wpływa w zakresie około 20%.* Jeśli w zakresie to powinny być dwie liczby.
- Na str. 144 znajduje się sformułowanie *bardziej optymalne prowadzenie zbrojenia.* Czy przysmotnik *optymalny* może być stopniowany?
- W pozycji 44 bibliografii nie podano czasopisma, z którego artykuł pochodzi.
- W bibliografii wymienionych kilka prac, których przywołania nie znalazłam w tekście (np. 60 i 106).

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona praca jest niewątpliwie dziełem oryginalnym. Doktorant podjął zagadnienie naukowe, które konsekwentnie rozwiązał. Wykazał się wiedzą teoretyczną z zakresu podjętej tematyki, swobodą w obliczeniach numerycznych dotyczących zagadnień fizycznie nieliniowych, umiejętnością analiz uzyskanych wyników. Dysertacja świadczy o opanowaniu przez doktoranta warsztatu badań naukowych. Zawarte w p. 3.1-3.5 recenzji uwagi i pytania nie osłabiają powyższego wniosku, proszę natomiast Doktoranta o odniesienie się do nich w czasie publicznej obrony.

Ostatecznie stwierdzam, że dysertacja doktorska Artura Kotarskiego pt. *Analiza numeryczna wpływu zbrojenia poprzecznego na zachowanie mechaniczne słupa betonowego* spełnia wymagania Ustawy Ustawą o z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Lublin dn. 1.08.2021