

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka

RECENZJA DYSERTACJI DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Szczeciny

pt.

**”DOBÓR RACJONALNEGO ZBROJENIA WĘZŁÓW
PODDANYCH DZIAŁANIU MOMENTU OTWIERAJĄCEGO”**

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

Podstawa opracowania: umowa o dzieło nr XII/Dec-B/19/2018 z dnia 18 czerwca 2018 roku pomiędzy Politechniką Świętokrzyską a recenzentką.

1. Problem naukowy, przedmiot i charakter dysertacji

Dobór i konstruowanie zbrojenia jest jednym z podstawowych problemów projektowania konstrukcji żelbetowych. O ile zasady obliczania przekroju zbrojenia sprecyzowane są w normach dość jednoznacznie, o tyle rozkład tego zbrojenia jest, zwłaszcza w przypadkach bardziej skomplikowanych, pozostawiony do decyzji projektantowi. I to od jego doświadczenia i, często, intuicji zależy, czy rozwiązanie będzie prawidłowe i optymalne pod względem dystrybucji sił wewnętrznych, a w konsekwencji – nośności i rysoodporności.

Jednym w takich trudnych do zbrojenia miejsc są węzły i naroża, gdzie występuje złożony stan naprężeń, a reguła Bernoulliego nie jest możliwa do zastosowania. Węzły takie występują zarówno w ramach, jak i w konstrukcjach przestrzennych np. zbiornikach. Szczególnym przypadkiem są naroża, na które działa moment powodujący ich rozwieranie. Takie właśnie naroża są przedmiotem recenzowanej dysertacji. Na rys. 3 dysertacji pokazano przykłady naroży ram, zagięcia rygla, połączenie ściany i dna w zbiornikach oraz połączenie płyty pionowej i poziomej w ścianach oporowych. Wśród nich brakuje, ważnych praktycznie, pionowych naroży ścian zbiorników, a także schodów płytowych z narożem pomiędzy biegiem i spocznikiem.

O ile naroża, w których zbiegają się elementy o jednakowych wysokościach przekroju były przedmiotem badań i doczekały się zaleceń normowych, o tyle te łączące elementy o znacznie różniącej się wysokości przekrojów – są słabo rozpoznane. Autor skupił się właśnie na takich narożach.

Dobór rozkładu zbrojenia wspomagają modele obliczeniowe: modele ST (rekomendowane w normach projektowania konstrukcji żelbetowych), a także modele numeryczne. Te ostatnie jednak, dla uzyskania wiarygodnego rozwiązania wymagają przyjęcia nieliniowych zależności konstytutywnych opisujących materiał i stosowania bardziej zaawansowanych programów niż te, które używane są w większości pracowni projektowych.

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

Rozprawa doktorska ma charakter analityczny. W jej ramach przeprowadzone zostały pogłębione badania parametryczne wpływu sposobu ukształtowania zbrojenia na nośność naroży. Wykonano analizy zarówno modeli ST, jak i modeli numerycznych. Są to więc badania o charakterze naukowym, a ich wnioski mogą być aplikowane w praktyce stanowiąc istotną pomoc dla projektantów konstrukcji.

2. Zawartość i układ dysertacji

Praca liczy 254 strony tekstu podstawowego, do którego dołączono na początku spis treści i spis oznaczeń, a na końcu - krótkie streszczenia w języku polskim i angielskim.

W pracy wyróżnić można następujące części:

1. Część wstępna zawierająca informacje podstawowe na temat projektowania tzw. obszarów typu „D”, prezentująca przedmiot dysertacji, a także jej zawartość, cel i tezy (Wprowadzenie i rozdział 1);
2. Studia literaturowe, zawarte w rozdziałach 2, 3, 4 których przedmiotem są:
 - przegląd dotychczasowych badań laboratoryjnych naroży poddanych działaniu momentu otwierającego (rozdział 2.1 i 2.2) oraz przegląd zaleceń normowych i podręcznikowych dotyczących zbrojenia takich naroży (rozdział 2.3),
 - prezentacja modeli stosowanych w analizie obszarów typu „D” – modeli ST i modeli numerycznych (rozdział 3),
 - przegląd modeli materiałowych betonu i prezentacja metody regularyzacji w metodzie elementów skończonych (rozdział 4);
3. Wstępne analizy numeryczne (rozdział 5), których istotą było ustalenie parametrów materiałowych wprowadzanych później do modeli numerycznych naroży;
4. Obliczenia i analizy wybranych modeli ST i modeli numerycznych różnie zbrojonych naroży, otwieranych momentem (rozdziały 6 i 7);
5. Podsumowanie (rozdział 8), w którym Autor wyprowadził wnioski z przeprowadzonych analiz;
6. Spis literatury zawierający 100 pozycji literaturowych, w tym 5 norm i dwie instrukcje. Zawarto tu 69 publikacji angielskojęzycznych, 7 niemieckojęzycznych i 17 polskojęzycznych. Jest tu także 10 prac Doktoranta napisanych we współautorstwie z promotorem. Są to głównie prace konferencyjne, ale również artykuły w „Archives of Civil Engineering” oraz „Archives of Civil Engineering Environment”.

3. Merytoryczna ocena pracy

3.1 Ocena ogólna dysertacji

Recenzowana dysertacja doktorska ma, jak już pisałam wyżej, charakter analityczny. Podjęty przez Doktoranta problem naukowy został rozwiązany w sposób oryginalny, przy zastosowaniu współczesnych metod analizy konstrukcji. Poziom i szeroki zakres analiz świadczy o opanowaniu przez Doktoranta warsztatu naukowego, zaś duża liczba różnorodnie zbrojonych naroży, poddanych analizie, świadczy także o umiejętnościach konstruktorskich. Szczególnie zwraca uwagę staranność w analizach numerycznych, polegająca na wykonaniu wstępnej kalibracji parametrów modelu numerycznego i badaniu ich wpływu na uzyskane wyniki.

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 tez pracy

Doktorant postawił cztery tezy:

- Pierwsza teza dotyczy możliwości racjonalnego doboru zbrojenia metodą ST, także w przypadku naroży elementów o różnych wysokościach przekroju. Moim zdaniem jest to teza dość oczywista. W normie EC2-1-1 zapisano, nie robiąc żadnych ograniczeń: *w obszarach, w których rozkład odkształceń jest nieliniowy.... można stosować modele ST*. Modele ST bardzo często używane są do elementów zróżnicowanych geometrycznie (np. strefy podporowe belek podciętych).

- Druga teza specyfikuje najlepsze, ze względu na współczynnik efektywności, układy zbrojenia w narożu. Tę tezę uznaję za sformułowaną prawidłowo.
- Trzecia teza mówi o możliwości doboru efektywnego zbrojenia na podstawie innych modeli ST, niż te, które rekomendowano w normie. Tu również uważam, że teza jest dość oczywista – norma podaje tylko rozwiązania przykładowe (patrz p.J.2.3 normy: *można stosować model ST przedstawiony na rysunkach J3(a) i J.4(a)*). Ukształtowanie modelu, co sam Doktorant napisał (str.52₁₈₋₁₇, 52₇₋₅) należy do projektanta.
- Czwarta teza zakłada, że dobór zbrojenia możliwy jest nie tylko na podstawie metody ST, ale także na podstawie obliczeń numerycznych realizowanych w programie Abaqus z zastosowaniem modelu plastycznego betonu z kontynualnym uszkodzeniem. W ramach tej tezy napisano ponadto, że metoda numeryczna pozwala oszacować rozwarcie rys w stanie granicznym użytkowania. To nie jest prawda – szerokość rys w stanie granicznym użytkowania (użytkowalności) jest określona i wynosi $w_{k,lim}$. Program natomiast pozwala na obliczenie szerokości rys przy danym obciążeniu, określonym przy konkretnej kombinacji obciążeń (EC2-1-1 zaleca kombinację quasi-stałą).

Analizując tezy rozprawy wyrażam opinię ogólną, że lepszym, niż formułowanie tez, rozwiązaniem jest formułowanie problemu badawczego. Taką rekomendację znajdujemy w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.....” Problemem podjętym w recenzowanej dysertacji jest po prostu analiza układów zbrojenia w narożach elementów o jednakowej i różnej wysokości przekroju, poddanych działaniu momentu otwierającego, oraz wybór układu najbardziej efektywnego.

3.2 Ocena studiów literatury

Zagadnienia poddane studiom literaturowym można uznać za właściwe, wybrane źródła są niewątpliwie związane z tematem i ważne.

W pierwszej części studiów literaturowych Doktorant zestawiał wyniki badań naroży rozginanych momentem, zbrojonych w różny sposób. Za parametr wiodący w ocenie rozwiązania zbrojenia uznał współczynnik efektywności naroża, a relacjonując badania podawał wartości tego współczynnika. Przyjęte w dysertacji definicje współczynnika efektywności naroża zostaną poddane dyskusji w dalszej części recenzji, stanowiły ona bowiem dla Doktoranta podstawę oceny nie tylko wyników badań relacjonowanych w części studialnej, ale przede wszystkim wyników obliczeń własnych.

Bardzo cenne jest, że w efekcie studiów literaturowych Doktorant wyspecyfikował typy naroży, które poddał w dysertacji analizie (rys.41). Ten zestaw uzupełnił o własne propozycje (detale nr 7 i 8). Ważne jest także ustalenie, że w normach i podręcznikach znajduje się niewiele informacji o narożach otwieranych momentem, w których zbiegają się belki lub płyty o różnych wysokościach przekroju i zaleceń co do ich sposobu zbrojenia, podczas gdy takie informacje i zalecenia sformułowano dla naroży elementów o różnych wysokościach, ale zamykanych momentem. W ten sposób studia literaturowe stały się rzeczywistą bazą dla analiz własnych.

Drugim tematem opisanym w ramach studiów literaturowych są współczesne metody analizy konstrukcji, których Doktorant używa w swoich obliczeniach. Zestawiono tu podstawowe informacje o istocie metody ST i ograniczenia nakładane przez różne normy i opracowania na obliczeniowe wartości naprężeń w betonie i stali, obliczone tą metodą. Podano także rekomendacje do tworzenia schematów ST w narożach. Dalej zestawiono podstawowe założenia metody elementów skończonych wraz ze sposobami pozwalającymi iteracyjnie rozwiązać zadanie, w którym wraz z obciążeniem zmienia się macierz sztywności.

Wreszcie obszar trzeciej części studiów literaturowych to dość trudne zagadnienia analitycznego opisu zachowania się betonu w próbie ściskania i rozciągania. Doktorant zestawiał model

zachowania się sprężystego oraz plastycznego, model rys rozmytych i model kontynualnej mechaniki uszkodzeń. Ta część dysertacji świadczy o tym, że Doktorant zgłębiał założenia programu komputerowego stosowanego w analizach własnych. Pozwoliło mu to na świadomy wybór modelu materiałowego dostępnego w programie i świadomą interpretację uzyskanych wyników obliczeń.

Uwagi szczegółowe:

- Str. 16₁₆₋₁₄: Opis obrazu zarysowania naroża jest nieprecyzyjny. Które to są według Autora rysy ukośne, a które pionowe?
- Str. 52₉: Co oznacza *twierdzenie o dolnej granicy obciążenia*? Z dalszego tekstu wynika, że chodzi raczej o górną granicę obciążenia;
- Str. 66₇, 68₇: Należałoby wyjaśnić pojęcie: *sformułowanie słabe MES*;
- Rys.69: Rysunek podpisano *zależność σ - ϵ* , podczas gdy oś poziomą opisano $\delta\epsilon$ i podano, że jednostką jest mikrometr, podobnie rys. 71.
- Str. 75₅₋₄: Jak należy rozumieć *zależność szerokości rysy od wydłużenia próbki*? To przecież szerokość rysy wpływa na wydłużenie próbki betonu a nie odwrotnie.
- Str. 77₂: Jest - *naprężeniem ściskającym* winno być - *naprężeniem rozciągającym*.

3.3 Ocena własnych obliczeń i analiz Doktoranta

3.3.1 Osiągnięcia oraz mocne strony pracy

Przedmiotem analiz własnych Doktoranta były żelbetowe naroża otwierane momentem, zarówno takie, w których zbiegają elementy o jednakowej wysokości przekroju jak i o różnych wysokościach przekroju. Doktorant analizował różne rozwiązania zbrojenia takich naroży. W sumie wykonał analizy 7 typów zbrojenia (zwanymi przez niego *detalami*) w przypadku naroży łączących elementy jednakowe i 9 wariantów w przypadku naroży łączących elementy różne.

W pierwszym etapie Doktorant analizował naroża łączące elementy jednakowe, tworząc modele ST dla każdego typu zbrojenia. Obliczył naprężenia (ściskające i rozciągające) pojawiające się w prętach i węzłach modelu pod wpływem działania momentu otwierającego o wartości 30 kNm (uznając tę wartość za tzw. obliczeniową w stanie granicznym nośności) i porównał uzyskane wyniki z naprężeniami dopuszczalnymi w stanie granicznym nośności. Analiza ta pozwoliła na wyspecyfikowanie nieefektywnych typów zbrojenia naroży (oznaczonych jako 1, 2, 3) oraz rekomendowanych typów zbrojenia (numery 4, 5, 6, 7).

Następnie zamodelował te same naroża, ze wszystkimi typami zbrojenia, w programie Abaqus i wykonał obliczenia numeryczne. Bardzo pozytywnie oceniam fakt, że świadomie wybrał modele materiałowe, a wyboru parametrów tych modeli dokonał na podstawie pogłębionej analizy. W szczególności wybór wartości kąta dylatacji w próbie jednoosiowego i dwuosiowego ściskania i czasu relaksacji w próbie rozciągania zrealizowany został poprzez kalibrację na podstawie prostych prób wytrzymałościowych. Autor szukał najlepszego dopasowania modelu numerycznego do wyników wybranych badań laboratoryjnych (szkoda, że pojedynczych). Sformułował bardzo ważny, moim zdaniem, wniosek, że przyjmowane przez wielu badaczy wartości kąta dylatacji większe od 30° prowadzą do błędnych wyników (dodatnie odkształcenie objętościowe w próbie ściskania). Podobnie ważne jest stwierdzenie, że czas relaksacji powinien być przyjmowany o wartości nie większej niż 0,0001s. Następnie, w podobny sposób Autor sprawdził wpływ rozmiaru elementu skończonego, nie obserwując różnic w wynikach przy zastosowaniu rozmiaru 1, 2 i 5 mm.

Obliczenia naroży za pomocą MES wykonał zarówno w płaskim stanie naprężenia jak i w płaskim stanie odkształcenia. W efekcie uzyskał mapy ekwiwalentnych odkształceń plastycznych oraz mapy parametru zniszczenia, a także określił zasięg stref uplastycznienia stali zbrojeniowej przy różnych poziomach obciążenia. Następnie te mapy analizował. Za

najważniejszy wynik analizy, uznając rysunki 186 i 187, na których wykazał, że przemieszczenia węzła leżącego na granicy naroża są zdecydowanie większe w przypadku zastosowania typów zbrojenia 1, 2 i 3 niż typów 4, 5, 6 i 7, co pozwala na rekomendowanie tych czterech ostatnich jako bardziej efektywnych. Podobnie ważne są rysunki 195 i 196, gdzie wykazał, że szerokości rys, w zakresie od 0 do 0,3 mm, są mniejsze dla naroży zbrojonych zbrojeniem oznaczonym numerami 4, 5, 6 i 7 niż dla naroży oznaczonych numerami 1, 2 i 3, co potwierdza wcześniejszą rekomendację. Następnie Autor sprawdził, jak wielkość elementu skończonego wpływa na wyniki obliczeń (stwierdził niewrażliwość obliczeń na ten parametr). Na zakończenie analiz naroży łączących elementy jednakowe Doktorant wykonał obliczenia numeryczne przestrzennego modelu naroża zbrojonego zbrojeniem typu pierwszego. Stwierdził, że przemieszczenia węzła są mniejsze niż w modelach płaskich, a szerokość rys w zakresie od 0 do 0,3mm pokrywa się z wynikami PSN (PSO dało szerokości rys większe). Ważnym stwierdzeniem jest także i to, że strefy uplastycznienia prętów były większe niż w analizach płaskich.

Kolejny rozdział dysertacji dotyczy rozginanych momentem naroży łączących elementy o różniących się wysokościach przekroju. Sposób analiz był taki jak poprzednio – najpierw modele ST, a następnie modele numeryczne. Znow, Doktorant wyspecyfikował najkorzystniejsze modele – modele oznaczone numerami 7 i 8.

Fakt, że analizie poddana została duża liczba naroży – łącznie 16, oraz to, że analizy MES wykonywano zarówno w stanach płaskich, jak i przestrzennych jest niewątpliwie mocną stroną pracy. Mocną stroną pracy jest również kompetentna analiza modeli ST, które są co prawda obecne w Eurokodzie, ale stosowane dość rzadko.

W pracy opisywano szczegółowo obraz zarysowania uszkodzenia modeli numerycznych, natomiast porównania z wynikami badań laboratoryjnych dotyczyły jedynie nośności. Moim zdaniem słabszą stroną pracy jest brak porównań obrazów zarysowania z dostępnymi wynikami badań laboratoryjnych (np. rys. 1 i 22 rozprawy oraz rys. 13.40 i 13.45 pracy W.Stasolskiego (wydanie z roku 2012)).

3.3.2 Uwagi merytoryczne

Podstawowe uwagi recenzentki koncentrują się wokół trzech zagadnień: konieczności rozróżnienia sytuacji projektowych od analiz fizykalnych, współczynników efektywności przyjętych do oceny typów zbrojenia oraz zagadnienia przyczepności i zakotwienia prętów zbrojeniowych.

Doktorant w swych analizach na równi traktuje modele ST, stosowane w projektowaniu konstrukcji żelbetowych i modele numeryczne przypisując im te same parametry materiałowe i porównując zdefiniowane przez siebie współczynniki efektywności uzyskane tymi dwiema metodami.

Tymczasem metoda ST w rozumieniu EC2-1-1 jest projektową metodą sprawdzenia stanu granicznego nośności, a jej istota leży w porównaniu naprężeń powstałych w modelu w wyniku oddziaływania obciążenia o wartości wynikającej z podstawowej kombinacji obciążeń w stanie granicznym nośności z naprężeniami dopuszczalnymi w stanie granicznym nośności. Te ostatnie zależą od obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych – obliczeniowej granicy plastyczności stali i obliczeniowej wytrzymałości betonu na ściskanie (na marginesie – na str. 124¹⁰ napisano, że wartości naprężeń dopuszczalnych przyjmowano zgodnie z rozdziałem 3; ale w tym rozdziale jest kilka rekomendacji - EC2-1-1, ACI, pozycja literaturowa [73]; którą zastosowano?). Oczywiście można policzyć naprężenia przy innych wartościach obciążeń, ale taka potrzeba w projektowaniu nie występuje, chyba, że odwracamy sytuację – poszukujemy obciążenia, przy którym osiągnięty zostanie stan graniczny nośności.

Natomiast MES, przy zastosowaniu fizykalnych opisów materiałowych pozwala na śledzenie zmian zachowania się modelu w miarę wzrostu obciążenia, z czego Doktorant skrzętnie i ze znanstwem korzystał, wprowadzając parametr λ . Wśród obciążeń są te odpowiadające stanowi granicznemu nośności i te odpowiadające stanowi granicznemu użytkowalności (na marginesie nieprawdą jest stwierdzenie na str. 182₁₂ i 261⁹, że *do obliczeń zarysowania stosuje się wielkości charakterystyczne*, bowiem do sprawdzania stanu granicznego zarysowania według EC2-1-1 stosuje się quasi-stałą, a nie charakterystyczną kombinację obciążeń).

Jeśli zastosuje się dane materiałowe rzeczywiste (zbadane w laboratorium) uzyskuje się bliską rzeczywistości wartość obciążenia niszczącego model. Można go oczywiście porównać z obciążeniem obliczeniowym. W projektowaniu jednak, w stanie granicznym nośności musimy uzyskać wynik z zapasem bezpieczeństwa również po stronie materiału i dlatego wprowadzane są obliczeniowe wielkości parametrów materiałowych. Można korzystać z nich także przy tworzeniu modelu numerycznego i poszukiwaniu sił wewnętrznych w stanie granicznym nośności. Jednak przy obliczeniach przyrostowych i stosowanej przez Doktoranta kontynualnej mechanice uszkodzeń nie są one w pełni adekwatne. Zależności σ - ε podane przez Eurokod operujące wytrzymałością obliczeniową nie mają części opadającej. Osłabienie widoczne jest tylko na wykresie 3.2, charakteryzowanym wytrzymałością średnią. Podstawowe zatem uwagi do parametrów przyjmowanych w analizach MES są następujące:

- Tabela 2 i tabela 4: Jako jeden z parametrów materiałowych betonu wyspecyfikowano *moduł Younga E*. Nieścisłe jest stwierdzenie, że może on być ustalony na podstawie Eurokodu. Eurokod operuje nazwą *moduł sprężystości* – z dodatkową cechą *styczny* lub *sieczny*, podobnie ModelCode. Zatem należało sprecyzować, która z wartości jest tu adekwatna. Podobnie str.113₁₅.
Odpowiadający deklarowanej w tabeli 4 wytrzymałości charakterystycznej 40 MPa moduł sprężystości równy 35GPa to moduł sieczny (patrz tablica 3.1 Eurokodu). Jak określono (tabela 5 i rys. 91) granicę między odkształceniami sprężystymi i plastycznymi (skąd jest wartość 13,70 MPa)?
- Na 182^{9,10} napisano: *właściwości materiałowe oraz obciążenie zdefiniowano jako obliczeniowe*, co jest niezgodne z tablicą 4, gdzie podano, że przyjmowane były charakterystyczne wytrzymałości na ściskanie.
- Pomimo deklaracji na str. 105³, że współrzędne punktów wykresu σ - ε zostały wyznaczone według Eurokodu, nie użyto, wymaganej wzorem 3.14 Eurokodu, wartości średniej f_{cm} . Na rys.91 widoczna jest maksymalna wartość naprężeń (wytrzymałość na ściskanie) równa 34,30 MPa i odpowiadające jej odkształcenie 1,75 promila. Dla deklarowanej w tablicy 4 wartości charakterystycznej $f_{ck} = 40$ MPa, winno to być 48 MPa i 2,3 promila.
- W Tabeli 4 przyjęto współczynnik Poissona równy 0,167, pomimo, że w tabeli 2 napisano, że zalecany, według EC2-01-1 i MC2010 jest 0,2 (podobnie str.113₁₅).

Druga grupa uwag merytorycznych dotyczy przyjętego przez Doktoranta współczynnika efektywności, który posłużył do porównania analizowanych typów zbrojenia. Pomimo jednej nazwy są to *de facto* trzy różne współczynniki. Są one różne nie tylko między sobą ale niespójności występują także w poszczególnych definicjach.

- Pierwszy współczynnik efektywności został zdefiniowany wzorem (1) jako stosunek momentu M_{Ed} , który w badaniach laboratoryjnych powoduje zniszczenie naroża do M_{Rd} , *stanowiącego teoretyczną nośność elementów tworzących węzeł*. Wielkość M_{Ed} nie została jasno zdefiniowana. Co oznacza to pojęcie, jeśli zbiegające się w narożu elementy (belki lub płyty) mają różne nośności (różne wysokości przekroju lub różne zbrojenie)? Ponadto - czy chodzi tu o nośność łączonych elementów jedynie na zginanie (obok momentów mogą występować siły osiowe)?

Rodzi się też pytanie, dlaczego przyjęto jako rzeczywistą nośność tę zbadaną w badaniach laboratoryjnych, podczas gdy wielkość M_{Rd} przyjęto jako teoretyczną. *Efektywność* oznacza porównanie dwóch wielkości, ale uzyskanych tą samą metodą, a więc w tym przypadku winien to być albo stosunek teoretycznej nośności naroża do teoretycznej nośności łączonych elementów, albo stosunek tych dwóch wielkości zbadanych laboratoryjnie. Stosunek wartości zbadanych i obliczonych to wskaźnik, który z jednej strony zawiera w sobie z jednej strony niedopasowanie modelu teoretycznego a z drugiej przypadkowe błędy podczas badań.

- Drugi współczynnik efektywności wprowadził Doktorant dla modeli ST jako stosunek naprężeń dopuszczalnych do naprężeń obliczonych przy założonym momencie obciążającym naroże w stanie granicznym nośności (wzór 87). Jest to zatem odwrotność stopnia wykorzystania nośności węzła. Nie powinien być on mniejszy od 1,0, bo oznaczałoby to nie spełnienie stanu granicznego, wartość równa 1,0 to stan graniczny, a wartości większe od jedności pokazują zwiększone zapasy bezpieczeństwa. Projektantowi, (a jemu przecież służą metody normowe) wystarcza stwierdzenie, że warunki stanu granicznego zostały spełnione.

Ponadto nieuprawnione jest stwierdzenie na str.128₃, że jeśli taki współczynnik większy od jedności oznacza to, że nośność naroża jest większa od nośności elementów łączących się w nim, bowiem w definicji w ogóle nie ma parametrów elementów składowych.

- Kolejny współczynnik efektywności definiowany jest wzorem 95 jako stosunek maksymalnego momentu uzyskanego w MES (nośności modelu naroża) do nośności prętów składowych, obliczonej ze wzoru 97.

Wątpliwości dotyczą obliczenia nośności elementów składowych. Dlaczego obliczono ją w sposób uproszczony, nie uwzględniając we wzorze 97 strefy ściskanej betonu, a jedynie nośność zbrojenia? Zastosowane uproszczenie jest dopuszczalne algorytmami projektowymi przy $x_{eff} < 2a_1$, ale po pierwsze – nie pokazano, że ten warunek jest spełniony, a po drugie zestawiono w ten sposób stosunek wyników obliczeń dwóch różnych elementów wykonanych dwiema różnymi metodami (elementy składowe – uproszczona metoda „analityczna”, naroże – MES). Można zestawiać wyniki MES i wyniki „analityczne” ale jedynie wykonane dla tego samego elementu (cel zestawienia jest wtedy inny).

Reasumując - moim zdaniem należało poszukać bardziej uniwersalnego miernika np. stosować odniesienie do tak zwanego przez Autora *mechanicznego stopnia zbrojenia*, ale odnoszonego się konsekwentnie do odpowiednich dla danej metody wartości wytrzymałości betonu.

Trzecia wątpliwość podstawowa dotyczy zamodelowania zbrojenia rozmytego w matrycy betonowej, co oznacza pełną przyczepność betonu do stali. Nie pozwala to na obserwację modelu zniszczenia naroża polegającego na zerwaniu przyczepności. O możliwości takiego mechanizmu zniszczenia pisał Autor na str. 33₃₋₁ (dotyczy szczególnie zbrojenia typu 1, 2 i 3). Pamiętać też trzeba, że konstruując zbrojenie trzeba przedłużyć go poza strefę, gdzie jest obliczeniowo potrzebne o długość zakotwienia.

Inne uwagi i pytania:

- Do kalibracji modelu betonu przy ściskaniu wykorzystano wyniki badań Kupfera z 1973 roku. Czy nie były w literaturze dostępne badania nowsze (z użyciem dokładniejszych nowoczesnych metod pomiarowych)? W tabeli 2 podano za Kupferem, że stosunek wytrzymałości na ściskanie dwuosiowe do wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe wynosi 1,16. Czy nie zależy on od klasy betonu (taką zależność podaje Eurokod dla ściskania trójosiowego)?

- Czy, zdaniem Doktoranta, nie ma potrzeby kalibrowania wartości „sztywno” podanych w instrukcji programu Abaqus (ϵ , K , d_c , d_t)?
- Na str. 120-121 zrelacjonowano obliczenia w założeniu pierwszego (rys.110) i czwartego (rys.111) wariantu modelowania betonu przy rozciąganiu. Dlaczego do dalszych analiz wybrano wariant czwarty, choć wystąpiły tu dużo większe różnice w stosunku do wyników badań laboratoryjnych niż w wariancie pierwszym (np. rozwarciu rysy 0,02 mm odpowiada naprężenie 2,8 MPa w modelu numerycznym, podczas gdy w badaniach laboratoryjnych uzyskano niemal 2 razy mniejsze 1,6 MPa - w wariancie pierwszym nie obserwowano takich różnic).
- Jeśli wielkość λ została zdefiniowana jako współczynnik obciążenia (krotność momentu 30 kNm) to nie może on zależeć od współczynnika efektywności jak zapisano we wzorze 98, jest bowiem zmienną niezależną,
- Na str. 195⁶ napisano, że naroża można z powodzeniem analizować w płaskich stanach, gdyż rezultaty *w tych stanach nie różnią się znacząco od wyników zaprezentowanych dla stanu przestrzennego*, ale jest to stwierdzenie dyskusyjne, jeśli spojrzymy na rys.210, zwłaszcza dla PSO.

3.6 Ocena podsumowania i wniosków pracy

W ostatnim rozdziale Doktorant zamieścił podsumowanie pracy. Niepotrzebnie powtórzono tu zawartość poszczególnych rozdziałów. Na tym tle zbyt słabo, moim zdaniem, wyartykułowane zostały ważne wnioski, a brak odniesienia wprost do wszystkich postawionych na początku tez potwierdza opinię wyrażoną w p. 3.2.

Brakuje także określenia kierunków dalszych badań.

3.6 Ocena układu i strony redakcyjnej pracy

Układ pracy jest tradycyjny – najpierw część studialna, następnie założenia do analiz, i wreszcie - analizy. Praca jest czytelna - napisana jest jasnym, poprawnym językiem. Recenzentka zauważyła pewne uchybienia, zestawione poniżej. Nie mają one wpływu na merytoryczną ocenę pracy i nie wymagają odpowiedzi podczas obrony dysertacji.

Nieścisłości i nieprecyzyjne sformułowania:

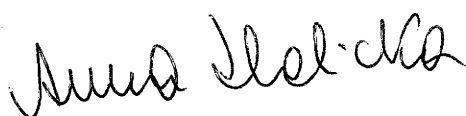
- Str. 13¹³: napisano, że przykładami obszarów „D” są *większe otwory w tarczach*, tymczasem obszarem „D” jest obszar wokół otworu, a nie otwór;
- Str. 14¹²⁻¹³: napisano, że rozdział zakończono definicją współczynnika efektywności, a w rzeczywistości rozdział rozpoczęto tą definicją;
- Str. 28² : jest - *detale ... osiągają niskie wartości*, winno być - *w analizach naroży z detalami uzyskano niskie wartości*; podobnie 28^{5,6};
- Str. 39⁸, 52^{1,2,5} i w wielu innych miejscach używano pojęcia *regiony konstrukcji* (to prawdopodobnie dość niefortunne tłumaczenie z angielskiego), winno być: *obszarów* lub *stref*;
- Str. 56¹⁰: jest *ilości prętów* winno być *liczby prętów*; podobnie w kilku innych miejscach (słowo *pręty* jest rzeczownikiem policzalnym), podobnie str. 117⁴: *ilość elementów skończonych*, str. 136¹⁰: *ilość kroków*;
- Str. 75⁵, 77⁴, 181³, 244² i w wielu innych miejscach użyte jest sformułowanie *szerokość rozwarcia rysy*; winno być albo *szerokość rysy* albo *rozwarcie rysy*;
- Rys.69 jest cytowany; powołano się na prace [94, 95], winno być [96, 97];
- Rys.71: podpis nieprecyzyjny – tylko część tego rysunku to *zależność σ - ϵ* ;
- Str. 91⁹⁻⁸: bardzo niezgrabne zdanie *założeniem w tym modelu jest zakaz malenia parametru* (chyba znów niefortunne tłumaczenie z angielskiego);

- Str. 103¹⁴⁻¹³: stwierdzenie czasu, w jakim obciążenie zostało przyłożone do badanego elementu sugeruje jedynie chwilę czasową. Tu, jak rozumiem chodzi o przedział czasowy. Czytelniej byłoby: czasu, w jakim obciążenie było przykładane do badanego elementu. Podobnie str.113⁵, 114³, 114⁵, 116⁴ – lepiej obciążania a nie obciążenia;
- Str. 108^{2,5}: zamiast wymuszenia kinematycznego o wartości 0,75 mm raczej powinno być wymuszenia kinematycznego o wartości od 0 do 0,75mm;
- Str. 179⁶: Napisano, że analizowano siatki 5, 15, 20 mm, podczas, gdy na rysunkach pokazano siatki 5, 10 i 20 mm;
- Str. 182⁷: Napisano sprawdzania dopuszczalnej szerokości rysy, tymczasem dopuszczalnej szerokości rysy się nie sprawdza – jej wartość się przyjmuje dla określonych warunków środowiskowych. Sprawdza się natomiast, czy obliczone szerokości rysy nie są większe od dopuszczalnych;
- Literówki: 50²: jest udowodnia winno być udowadnia, 92₁ jest parametru winno być parametr, rys.95: jest ddkształcenie zamiast odkształcenie, str.117 jest Rys.1053 winno być Rys. 153, 122¹³: jest dobrano winno być dobrane, 132¹: jest zbrojeniowych winno być zbrojeniowy, 158₂: jest zagięte winno być zagiętego, 162₈: jest kilku winno być kilku, 72⁹: jest -tego” winno być i-tego;
- Str. 80¹: brakuje od, 88₂: niepotrzebne słowa odkształcenia rozciągające, 108₉ i 141₁₃: niepotrzebne słowo w zależności, 162⁴: jest zlokalizowanie stref zarysowania winno być strefy zarysowania;
- Uchybienia interpunkcyjne, szczególnie braki kropek i przecinków po wzorach;
- Nie ujednolicono czcionek, a zwłaszcza ich wielkości na poszczególnych rysunkach np. czcionka opisów na rysunkach 12, 14, 16, 20, 36 jest zbyt mała i w ogóle nie czytelna, a na rys. 7-11, 13, 72, 73, 84, 91, 121, 194, 197 – kuriozalnie duża
- Praca pisana jest w języku polskim, więc cytując rysunki należałoby przetłumaczyć opisy (np. rys. 13, 17, 19-29, 65-67).
- 77₁₃₋₉ i rys.71: Jeśli już rysunek cytujemy to należało opisać w tekście wszystkie zawarte tu informacje dla czytelnika nie znającego pracy [94], np. jakie jest Eq.(27)?; podobnie na rys. 51-53 nie opisano, czym jest l_b , h_a i d_a , a na rys.2 db.

Wniosek końcowy

Przedstawiona praca jest niewątpliwie dziełem oryginalnym. Doktorant podjął ważne zagadnienie, które konsekwentnie rozwiązywał. Wykazał się wiedzą teoretyczną z zakresu podjętej tematyki, umiejętnością rozwiązywania problemów naukowych. Dysertacja świadczy o opanowaniu przez doktoranta warsztatu badań naukowych. Przedstawione uwagi krytyczne mają w zamyśle recenzentki służyć doskonaleniu tego warsztatu i dalszym publikacjom.

Ostatecznie stwierdzam, że przedłożona praca mgr inż. Michała Szczeciny pt. „Dobór racjonalnego zbrojenia węzłów poddanych działaniu momentu otwierającego” 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. 1.08.2018