

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczman
Instytut Budownictwa
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań

Poznań, 03.04.2023r.

kom.: 662 14 00 73
e-mail: mieczyslaw.kuczma@put.poznan.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Łukasza JARNO

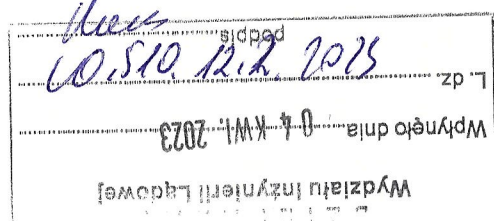
pt.: **Interface model influence on simulated behaviour of concrete-concrete
composite pre-stressed girder with insight into time effects and cracking**

(Wpływ modelu interfejsu na symulowane zachowanie się zespolonego dźwigara sprężonego
typu beton-beton z uwzględnieniem efektów reologicznych i zarysowania)

Podstawą opracowania jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki
Krakowskiej – prof. dr. hab. inż. Andrzeja Szaraty informującego o powołaniu na recenzenta
przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

1. Przedmiot i ogólna ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Jarno napisana jest w języku angielskim. Przedmiotem rozprawy są zagadnienia modelowania i numerycznego wyznaczenia rozwiązań zagadnień początkowo-brzegowych dla zespolonego sprężonego dźwigara typu beton-beton z uwzględnieniem efektów reologicznych, spękań betonu i skutków podatności i nieliniowych zjawisk (tarcia, poślizgu, odrywania) w obszarze zespolenia betonowej płyty z dźwigarem sprężonym. Doktorant rozpatruje poszczególne etapy wykonania prefabrykowanego sprężonego dźwigara mostowego wytworzonego z betonu wysokiej wytrzymałości i następnie zespolonego na budowie z płytą pomostową wylewaną na miejscu z betonu o zwykłej wytrzymałości. Tak więc, rozpatrywane zagadnienie wynika z potrzeb praktyki inżynierskiej i jego prawidłowe rozwiązanie jest ważne. Sposób i wynikająca z niego efektywność połączenia dwóch części dźwigara ma zasadniczy wpływ na zachowanie się połączenia nie tylko lokalnie w miejscu interfejsu, ale także na globalne zachowanie się dźwigara. Ważnym aspektem przeprowadzonych badań jest wyznaczenie parametrów nośnych obszaru połączenia obu betonów, które mają istotny wpływ na zachowanie się całego dźwigara pod



obciążeniem celem maksymalizacji jego nośności. Doktorant sformułował problem w ujęciu metody elementów skończonych, w szczególności stosując różne warianty elementów skończonych (element punktowy, element liniowy, element powierzchniowy) w modelowaniu interfejsu, tj. obszaru powierzchniowego połączenia dwóch różnych betonów, ułożonych z przesunięciem w czasie. Sformułowany problem matematyczny bazuje na liniowym opisie przemieszczeń i odkształceń oraz liniowo sprężystym zachowaniu się zbrojenia i cięgien sprężających, staje się jednak nieliniowy wskutek użytego przez Doktoranta modelu tarcia Coulomba i dwufazowego modelu Walravena. Do opisu właściwości lepkosprężystych Doktorant użył uogólnionego modelu Maxwella oraz dla porównania modele zalecane przez przepisy normowe (Eurokod, ACI, fib Model Code 2010).

Oceniana praca doktorska ma charakter teoretyczny, ale zawiera też porównanie otrzymanych wyników obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych przedstawionych w dysertacji Wonchang Choi pt. *Flexural behavior of prestressed girder with high strength concrete* (North Carolina State University, Raleigh, 2006). Bazując na znanych już modelach teoretycznego opisu zachowania się ciał wykazujących właściwości reologiczne (plastyczne, lepko-sprężyste), rozprawa stanowi oryginalną propozycję rozwiązania ważnego problemu inżynierskiego. Symulacje numeryczne przeprowadził Doktorant w programie obliczeniowym Midas FEA wykorzystującym metodę elementów skończonych, uzupełniając ten program o procedurę obliczeniową uogólnionego modelu Maxwella.

Rozprawa liczy 175 stron, podzielona jest na 11 rozdziałów oraz zawiera Wykaz cytowanych prac, 4 Dodatki, Summary i Streszczenie. Układ pracy jest klarowny i logicznie poprawny. Ogólnie, praca zredagowana jest starannie i napisana poprawnym językiem angielskim. Zawiera bardzo liczne ilustracje będące graficznym obrazem otrzymanych wyników obliczeń programem komputerowym.

2. Opis i ocena pracy

Rozdział 1, *Introduction*, jest wstępem zawierającym uzasadnienie wyboru przedmiotu badań i omówienie treści pracy. Autor wskazuje, że motywacją do podjęcia badań była chęć analizy efektywności różnych sposobów połączenia dwóch betonów, z których wykonuje się w praktyce prefabrykowane sprężone dźwigary z betonu o wysokiej wytrzymałości z wylewaną na miejscu płytą z betonu zwykłego. Doktorant definiuje tutaj główny cel pracy:

„Głównym celem pracy jest ocena wpływu numerycznego modelu interfejsu na zachowanie przy zginania i ścinaniu oraz na nośność zespolonego dźwigara sprężonego wykonanego z betonu o wysokiej wytrzymałości połączonego z betonem o normalnej wytrzymałości.”

“The main purpose of the thesis is to evaluate to influence of the interface numerical model on the flexural and shear behaviour and on the load-bearing capacity of the composite prestressed girder made of high-strength concrete connected with normal strength concrete.”

oraz formułuje trzy stwierdzenia (hipotezy badawcze):

Stwierdzenie 1 – Uwzględnienie etapów budowy w analizie MES ma znaczący wpływ na wyniki analizy zespolonych sprężonych belek betonowo-betonowych.

Stwierdzenie 2 – Nośność zespolonych dźwigarów mostowych (HSC-NSC) zależy w dużym stopniu od rodzaju konstrukcji strefy styku.

Stwierdzenie 3 – Aby dokładnie zbadać zachowanie sprężonego betonu zespolonego z dwóch różnych rodzajów betonu, zaleca się stosowanie zaawansowanego reologicznego modelu konstytutywnego (na przykład uogólnionego modelu Maxwella opartego na teorii lepkośćprężystości) zamiast używania prostej funkcji pełzania, opartej na normach (standardach).

“

Statement 1 – The consideration of construction stages in the FEM analysis has a significant influence on the analysis results of pre-stressed concrete-concrete composite beams.

Statement 2 – The load bearing capacity of composite (HSC-NSC) bridge girders depends strongly on the type of contact zone construction.

Statement 3 – To accurately examine the behaviour of the pre-stressed concrete composite of two different types of concrete it is advisable to implement an advanced rheological constitutive model (for instance, Generalized Maxwell model based on visco-elasticity theory) rather than use a simple function for creep, based on standards.

“

Rozdział 2, *Experiments on concrete-concrete composite girders*, zawiera omówienie wyników badań eksperymentalnych betonowo-betonowych belek (dźwigarów) zespolonych. Doktorant omawia tu zalety stosowania betonów wysokich wytrzymałości w mostownictwie, które pozwalają na zwiększenie rozpiętości belek lub redukcję ich przekroju poprzecznego oraz zwiększenie trwałości. Przywołuje tu badania eksperymentalne przeprowadzone przez prof. Annę Halicką i jej współpracowników, oraz szczególnie szeroko omawia wyniki badań, które przeprowadził W. Choi w ramach swojego doktoratu w Stanach Zjednoczonych [Choi, W. (2006). *Flexural behavior of prestressed girder with high strength concrete*. Ph.D. dissertation, A&T State University, Raleigh, North Carolina]. Wyniki tych badań stanowią punkt odniesienia do rezultatów badań własnych doktoranta. Choi zbałał 9 belek zespolonych o długości całkowitej 12,50 m (41 ft.) i rozpiętości między podporami 12,20 m (40 ft.) po trzy belki o różnej szerokości płyty górnej, tj. bez płyty, 0,305 m (1 ft.) i 1,525 m (5 ft.). Dźwigary badanych belek wykonane były z 3 betonów o wysokiej wytrzymałości: 69 MPa, 97 MPa i 124 MPa, natomiast wszystkie płyty zostały wykonane z betonu normalnego o wytrzymałości 28 MPa. Wyniki empirycznie wyznaczonych zależności siła-przemieszczenie i nośność graniczna belek są tu przywołane.

W rozdziale 3, *Physical phenomena in contact zone*, dotyczy zjawisk fizycznych zachodzących w strefie kontaktu (zespolenia) betonowej płyty z betonowym dźwigarem. Doktorant omawia zjawisko adhezji między dwoma warstwami betonu i poziomymi siłami tarcia na ich powierzchni kontaktu w przypadku zbrojenia zszywającego, oraz ujęcie tych zjawisk przez Eurocode 2, fib Model Code 2010, i ACI Code.

Rozdział 4, *Finite element formulation of interface elements*, dotyczy modelowania w ujęciu metody elementów skończonych obszaru połączenia betonowej płyty z betonowym

dźwigarem. Należy tu dodać, że połączenie betonowej płyty z betonowym dźwigarem jest podstawowym czynnikiem (poza klasą zastosowanych betonów), który decyduje o efektywności pracy mechanicznej i nośności granicznej betonowo-betonowych belek zespolonych. Również z obliczeniowego punktu widzenia, zachowanie się układu w obszarze połączenia ma duży wpływ na efektywność a także zbieżność algorytmów numerycznych. Doktorant wyróżnia dwie klasy elementów skończonych (tzw. elementów interfejsowych) stosowanych w warstwie łączącej płytę z dźwigarem: ciągłe elementy (liniowe lub powierzchniowe) oraz węzłowe (punktowe) elementy. Przyjęta zależność między siłami a zmianą względnego przemieszczenia obu powierzchni płyty i dźwigara ma postać rozprzężoną z podziałem na składową normalną i składową styczną (dwie składowe styczne w przypadku 3D). Komentarzem należałoby opatrzyć wzór (4.8) dotyczący punktowego elementu interfejsowego. Czy istnieje ustalona zależność między punktami x_1^b a x_2^t ? Dlaczego użyto różnych indeksów dolnych na oznakowanie tych punktów? W przypadku nieliniowego zachowania w obszarze połączenia, macierz sztywności i wektor sił węzłowych wyznaczono z równania pracy wirtualnej, tj. pierwszej wariacji energii wewnętrznej. W rozdziale tym nie podano jednak, jakiego typu nieliniowości rozpatrywany model ujmuje i gdzie w modelu są uwzględnione. Drugie zdanie z poniższych (str. 47): „For an element which has the local coordinate system defined at the integration points that coincides with the global coordinate system, the transformation is not necessary. In any other case the interface element matrix B_I should be transformed to the local [...]” wymaga komentarza.

W rozdziale 5, *Interface behaviour – benchmark and calibration*, przedstawia wyniki testów obliczeniowych (w programie Midas FEA) dla różnych modeli interfejsowych oraz kalibracji modelu numerycznego na przykładzie regularnego obiektu w postaci prostopadłościanu składającego się z dwóch sześciennych kostek o wymiarach 30x30x30 cm połączonych płaskimi ścianami. Zastosowano metodę elementów skończonych, ale brakuje informacji jakie trójwymiarowe elementy skończone zostały użyte w testach obliczeniowych. Rozpatrzono 4 modele interfejsu: (1) model tarcia Coulomba, (2) model zazębającego się kruszywa przy wykorzystaniu dwufazowego modelu Walravena, (3) model połączenia wciętego, oraz (4) zbrojenia zszywającego. Doktorant stwierdza (str. 52): „It is recommended to keep the difference between ϕ and ψ not higher than 20 degrees, otherwise the analysis may fail to converge.”, ale w analizowanych przykładach (z wyjątkiem połączenia na wcięcie) ta różnica wartości między kątem tarcia ϕ i kątem dylatacji ψ była o 50% większa, bo wynosiła 30 stopni. Czym było podyktowane przyjęcie $\phi = 30$ stopni i $\psi = 0$ stopni? Opisy i liczbowe wartości kolorów skali na rys. 5.3-5.11, 5.13-5.25 są trudno czytelne. Rysunki 5.8-5.11 przedstawiają poślizg w płaszczyźnie połączenia i wzajemne oderwanie się kostek wskutek działania poziomego obciążenia na kostkę górną prostopadłościanu. Czego wynikiem jest wzmocnienie na końcu procesu płynięcia plateau, które występuje na rys. 5.10-5.11? Dla modelu uwzględniającego efekt zazębiania się ziaren kruszywa wartość rozwarcia w płaszczyźnie zespolenia wynosząca 1,43 m jest bardzo duża i świadczy (abstrahując od jej praktycznego znaczenia) o efektywności zastosowanego programu komputerowego. Odnośnie modelu z połączeniem na wcięcie, ciekawość budzi zygzak na wykresie siła-przemieszczenie pionowe na rys. 5.25. Wyniki otrzymane dla kostek połączonych zbrojeniem zszywającym (jeden pręt o średnicy 8 mm) są zgodne z jakościowymi przewidywaniami co do przebiegu

procesu odkształcenia się układu, w którym wystąpiła separacja kostek i charakterystyczne duże odkształcenie pręta w miejscu połączenia kostek, gdzie działała duża siła ścinająca.

Rozdział 6, *Generalized Maxwell model for creep*, zawiera krótkie wprowadzenie do podstawowych koncepcji liniowej teorii lepko-sprężystości i ich rozszerzenie na uogólniony trójwymiarowy model lepko-sprężysty Maxwella. Porównawcze testy numeryczne pokazały, że uogólniony model Maxwella daje mniejsze wartości przemieszczeń i odkształceń niż model obliczeniowy według Eurokodu, który jest bardziej konserwatywny. Opisy i liczbowe wartości kolorów skali na rys. 6.7-6.12 są trudno czytelne.

Rozdział 7, *Numerical model and cracking analysis*, dotyczy bezpośrednio analizowanego zespolonego dźwigara typu beton-beton. Doktorant przeprowadził numeryczną analizę belki zespolonej wykonanej z betonu o wytrzymałości na ściskanie 69 MPa i rozpiętości 12,20 m, składającej się z dwuteowego dźwigara sprężonego o wysokości 91,44 cm i szerokości półki dolnej 45,72 cm a górnej 30,48 cm, oraz płyty o szerokości 152,4 cm i wysokości 20,32 cm. Belka była swobodnie podparta na końcach i poddana 4-punktowemu zginaniu. Do dyskretyzacji konstrukcji i pola przemieszczeń użył w obliczeniach 8-węzłowy prostopadłościenny element skończony z liniowymi funkcjami kształtu, oraz elementy prętowe do dyskretyzacji stalowego zbrojenia (strzemion o średnicy 4 mm, sprężających kabli o średnicy 12,7 mm). Symulacje numeryczne obejmują liniową analizę statyczną, analizę pęknięcia oraz analizę procesu budowy belki wyróżniającą pięć etapów budowy oraz dodatkowy etap, aby uwzględnić wpływ pełzania betonu także w długim okresie czasu (10 000 dni). Autor przedstawia graficznie wyznaczone numerycznie strefy powstałych rys w sprężonym dźwigarze oraz zależność siła-ugięcie w środku belki.

Wobec następujących stwierdzeń Doktoranta:

- 1) „The model does not predict the experimental failure mode due to reaching the yield stress of the strands after extensive softening of concrete, since elastic reinforcement is assumed.”
- 2) „The ultimate load-carrying capacity of the model could be reduced by changing the model of reinforcement from elastic to elastic-plastic.”

powstaje pytanie “Dlaczego w obliczeniach Doktorant nie uwzględnił sprężysto-plastycznego zachowania się stali, które jest widoczne w wynikach eksperymentów Choi?

W rozdziale 8, *Construction stage analysis results*, i rozdziale 9, *Construction stage analysis with time-dependent effects*, Doktorant przedstawił wyniki analizy etapów budowy badanej belki zespolonej, zakładając pełne (idealne, sztywne) zespolenie dźwigara i płyty. Obliczona 21% różnica (rozd. 8) ugięcie belki w przypadku sukcesywnej analizy poszczególnych etapów budowy i obciążania belki a jednoetapowej analizy tej belki wymagałaby głębszego wyjaśnienia. Co jest powodem powstałej różnicy: który etap budowy i który element modelu obliczeniowego jest źródłem tej różnicy? Przeprowadzone obliczenia uwzględniające wpływ czasu (rozd. 9) pokazały m.in., że długoterminowe (10 000 dni) efekty pełzania betonu spowodowały 7% spadek siły sprężającej. Warto tu także odnotować autorską procedurę definiującą pięcio-członowy uogólniony model Maxwella, który Doktorant użył w obliczeniach za pomocą oprogramowania Midas FEA. Doktorant

konkluduje, że wyniki obliczeń według użytego modelu Maxwella są jakościowo zgodne z przewidywaniami zaleceń Eurokodów, przy czym zastosowany model Maxwella prowadzi do bardziej ekonomicznych rozwiązań, ale zalecenia normowe prowadzą do bezpieczniejszych projektów. Dodam, że wniosek ten wymagałby sprawdzenia także w przypadku konstrukcji zewnętrznie statycznie niewyznaczalnych.

Rozdział 10, *Construction stage analysis with interface elements*, obejmuje analizy numeryczne belki zespolonej poprzez uwzględnienie efektów współpracy w obszarze zespolenia betonowej płyty ze sprężonym betonowym dźwigarem, przy pominięciu pełzania betonu. Doktorant rozpatruje poszczególne etapy budowy belki i uwzględnia nieliniowości wskutek tarcia na powierzchni zespolenia, i wskazuje na duży wzrost ugięć belki zespolonej wskutek poślizgu w płaszczyźnie zespolenia (nierealistyczne ugięcie rzędu 8 m). Dlatego sprawę poślizgu analizuje dokładniej jeszcze w pkt. 10.2, gdzie obliczenia wskazują na występowanie zarówno poślizgu jak i oderwania płyty od półki górnej dźwigara postępujące od końców belki. Uwzględnienie strzemion jako zbrojenia zszywającego płytę i dźwigar redukuje znacznie wielkości przemieszczeń w obszarze zespolenia, a obliczenia pokazały efekt przenoszenia także poziomych sił ścinających przez strzemiona (ang. dowel action).

Rozdział 11, *Summary and conclusions*, zawiera krótkie podsumowanie pracy i propozycje ewentualnych dalszych badań w świetle otrzymanych wyników.

Rozprawa zawiera *References* (str. 137-149) oraz cztery załączniki. *Appendix A* dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem betonu, w szczególności modelu odkształcenia całkowitego rysy, *Total Strain Crack model*, oraz modeli rozciągania, ściskania i ścinania betonu, które Doktorant wykorzystał w symulacjach numerycznych. *Appendix B* zawiera wzory na izoparametryczne funkcje kształtu dla powierzchniowych elementów interfejsowych. *Appendix C* to listing opracowanej przez Doktoranta procedury (subroutine) obliczeniowej uogólnionego modelu Maxwella. *Appendix D* jest opisem algorytmu aktualizacji naprężeń w analizie etapów budowy belki zespolonej.

Dokonując podsumowującej oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Jarno, na podstawie szczegółowej lektury tej pracy oraz wyżej przedstawionego jej zakresu i treści, pomimo sformułowanych uwag i pytań, stwierdzam, że jest to wartościowa praca zawierająca wiele oryginalnych elementów. Doktorant podjął trudne zadanie analizy zespolonej belki typu beton-beton w nawiązaniu do opublikowanych rezultatów badań eksperymentalnych i uzyskał szereg interesujących wyników, bliskich wynikom otrzymanych w eksperymentach. Z drugiej strony, przedstawiony opis zagadnienia i otrzymane wyniki symulacji numerycznych ukazują złożoność problemu i trudności w jego pełnym rozwiązaniu, nawet przy użyciu silnego programu komputerowego.

Chcę jednak wyraźnie zaznaczyć, że moje uwagi krytyczne i zapytania poczynione wyżej nie obniżają mojej pozytywnej oceny wyników badań Doktoranta, który poddał analizie wielu aspektów złożonego i trudnego zagadnienia jakie stanowią belki zespolone i uzyskał satysfakcjonujące rozwiązania.

3. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Jarno stanowi oryginalną propozycję ujęcia i rozwiązania problemu naukowego o dużym znaczeniu praktycznym, i potwierdza Jego wiedzę teoretyczną w dziedzinie mechaniki, spełnia tym samym wymóg art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Rozprawa jest znaczącym wkładem Autora do modelowania i numerycznej symulacji quasi-statycznych procesów deformacji sprężysto-plastycznych i lepko-sprężystych w ciałach stałych i elementach nośnych konstrukcji budowlanych. Wysoko oceniam wiedzę Doktoranta i Jego umiejętności programistyczne, którymi się wykazał realizując obliczenia nieliniowych problemów mechaniki konstrukcji.

Stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Jarno do publicznej obrony i ubiegania się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie *Inżynieria lądowa, geodezja i transport*.



