

Kraków, 14.06.2021 r.

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak
Politechnika Krakowska

R e c e n z j a

pracy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Mossor pt. „Model przegubu plastycznego sprężonej belki betonowej i jego wpływ na szacowanie stanów granicznych konstrukcji.”

Recenzja została opracowana na zlecenie Prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, Przewodniczącego Dyscypliny *Inżynieria Lądowa i Transport* Politechniki Poznańskiej; pismo nr RD/d/07/01/2021 z dnia 24.05.2021 r. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Mossor pt. „Model przegubu plastycznego sprężonej belki betonowej i jego wpływ na szacowanie stanów granicznych konstrukcji”. Promotorem rozprawy jest dr hab. Inż. Arkadiusz Madaj, prof. uczelni.

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca doktorska liczy wraz z załącznikami 176 stron, a bez Złączników – ale wraz z bibliografią, spisem treści, zestawieniem podstawowych oznaczeń oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim – 135 stron. Bibliografia obejmuje 112 pozycji. Wszystkie są cytowane. Zasadnicza część pracy zawiera w sumie 76 rysunków (wraz z fotografiami) 43 tablice i 72 numerowane wzory.

W czterech Załącznikach podano wyniki badań i analiz dotyczące: ugięć i zarysowania belek, wyniki obliczeń w zakresie redystrybucji momentów zginających oraz wyniki pomiarów przy wykorzystaniu światłowodów. Ta część pracy zawiera 39 rysunków i fotografii oraz 22 tablice. Na początku pracy są podane podstawowe oznaczenia oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Rozprawa w zasadniczej części składa się z 7 rozdziałów, obejmujących:

- wstęp,
- opis przegubu plastycznego,
- model obliczeniowy badanych belek,
- redystrybucję momentów zginających,
- własne badania doświadczalne i analizę obliczeniową,
- proponowany model przegubu plastycznego w konstrukcjach sprężonych,
- podsumowanie.

Na końcu podana jest bibliografia oraz cztery Załączniki.

Opiniowana rozprawa ma charakter doświadczalno-teoretyczny, z przewagą akcentów doświadczalnych. Dotyczy trudnych zagadnień związanych z tworzeniem się przegubów plastycznych w belkach z betonu sprężystego i związaną z tym redystrybucją momentów zginających. W tym ostatnim zakresie stanowi w pewnym stopniu kontynuację prac Prof. Prof. A. Rzyńskiego i W. Wołowickiego oraz Promotora. W stosunku do prac

wymienionych Profesorów stanowi istotne rozszerzenie i pogłębienie problematyki, a przede wszystkim dotyczy belek sprężonych, a nie żelbetowych.

Praca jest usytuowana w głównym nurcie współczesnych zagadnień badawczych związanych z obliczaniem belek z betonu sprężonego. Ważnym elementem pracy jest kompleksowość ujęcia problemu obejmująca zarówno właściwości materiałów jak też elementy z betonu sprężonego i tworzenie się w nich przegubu plastycznego, a także konsekwencje jego powstania.

Rozprawę doktorską mgr inż. Katarzyny Mossor można uznać za kompletną. Podano w niej własne rozwiązania teoretyczne oraz przeprowadzono ich weryfikację doświadczalną i analizę numeryczną. Dlatego podane rozwiązania mogą być zastosowane w praktyce inżynierskiej oraz wykorzystane przez innych badaczy (cenne tabele i zdjęcia) zajmujących się podobną problematyką.

Ważną pozytywną cechą pracy jest jasność przedstawianych problemów oraz konsekwentne dążenie do postawionych celów. Charakteryzuje to przede wszystkim zagadnień związanych bezpośrednio z tematyką pracy. Świadczy to o dobrym przygotowaniu Autorki do prowadzenia badań naukowych i dokładnej znajomości trudnej problematyki analizy belek sprężonych w zakresie plastycznym.

2. Ocena merytoryczna pracy

2.1. Ocena doboru tematu pracy

Ciągły rozwój metod obliczeniowych oraz coraz lepsze rozeznanie właściwości materiałów z betonu sprężonego. Wcześniejsze prace dotyczyły tworzenia się przegubów w belkach żelbetowych. Ta problematyka jest już dobrze rozpoznana. Doktorantka podjęła się zagadnienia trudniejszego – jako elementy do swojej analizy przyjęła belki z betonu sprężonego. Ze względu na odmienny charakter zależności naprężenie–odkształcenie dla stali zbrojeniowej i sprężającej należało się spodziewać różnic w powstawaniu przegubu plastycznego w belkach żelbetowych i elementach z betonu sprężonego. Stąd też tylko część rozwiązań ważnych dla belek żelbetowych można wykorzystać w odniesieniu do belek sprężonych. Tym samym pole badawcze wybrane przez Doktorantkę zasługuje na pozytywną ocenę.

Opiniowana rozprawa doktorska znajduje się w nurcie prac, które uściślają stosowane w praktyce rozwiązania związane z wykorzystaniem współczesnych możliwości jakie stwarzają programy komputerowe oraz aparatura pomiarowa.

Stosowanie coraz to dokładniejszych metod analizy statycznej, wzrost stopnia wykorzystania właściwości wytrzymałościowych materiałów na etapie projektowania, zbliżenie wartości wytrzymałości obliczeniowych do wartości naprężeń rzeczywiście występujących w najbardziej wytężonych przekrojach, a także coraz większy udział obciążeń użytkowych w obciążeniu całkowitym sprawiają, że ważną rolę w analizie pracy konstrukcji odgrywają stany pozasprężyste. W tym nurcie umiejscowiona jest rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Mossor.

Uwzględnienie przegubów plastycznych pozwala uściślić analizę elementów i konstrukcji w zakresie stanów granicznych nośności i użytkowości oraz bezpieczeństwa eksploatacji. Stąd też Autorka nie poprzestała na opisie przegubu plastycznego, ale podjęła się uwzględnienia jego wpływu na nośność i ugięcia belek z betonu sprężonego. Nie zajmowała się analizą stanu zarysowania, który odgrywa znaczącą rolę przy tworzeniu się przegubu oraz wpływa na sztywność belki.

Biorąc pod uwagę podane informacje można stwierdzić, że praca doktorska mgr inż. Katarzyny Mossor dotyczy ważnej współczesnej problematyki badawczej i dlatego jej temat oceniam bardzo wysoko. Dodatkowym argumentem za tym przemawiającym jest kompleksowość i możliwość wykorzystania wyników pracy w praktyce inżynierskiej oraz przez innych badaczy zajmujących się podobną problematyką.

W opiniowanej pracy nie zostały sformułowane tezy; nie ma takiego wymogu i w niczym nie umniejsza walorów naukowych rozprawy. Ważne jest, że Doktorantka jednoznacznie i poprawnie sformułowała cele pracy i zadania do rozwiązania, aby cele pracy osiągnąć. Zostały one tak określone, aby ich realizacja stanowiła spójne rozwiązanie problemu zdefiniowanego w tytule pracy. Aczkolwiek cele i zadania nie wypełniają w całości oczekiwań wynikających ze ścisłego rozumienia tytułu.

2.2. Ocena wartości naukowej pracy

Najważniejsze elementy wartości naukowej opiniowanej pracy doktorskiej to:

1. Podanie zasad obliczania przegubu w belkach z betonu sprężonego, w których stosuje się stal charakteryzującą się brakiem wyraźnej granicy plastyczności oraz weryfikację doświadczalną zaproponowanego modelu.
2. Kompleksowe ujęcie rozpatrywanej problematyki; w zakresie od badań materiałowych do obliczania stanów granicznych z analizą numeryczną włącznie.
3. Przeprowadzenie badań doświadczalnych na dwóch rodzajach elementów sprężonych; z ciągniami z przyczepnością i bez przyczepności.
4. Zaproponowanie oryginalnych hybrydowych elementów badawczych; uwagi dotyczące tych elementów podano w punkcie 2.3.
5. Wykazanie, że stosowany w belkach żelbetowych trójliniowy wykres moment–krzywizna może być także stosowany w odniesieniu do belek z betonu sprężonego.

Pozytywnym elementem pracy jest jednoznaczne wyrażanie przez Autorkę opinii na temat ocenianych i proponowanych rozwiązań.

2.3. Badania doświadczalne

Przeprowadzone badania doświadczalne zostały właściwie zaprogramowane z punktu widzenia celu i zakresu pracy. Na wysoką ocenę zasługuje bardzo dobra ich dokumentacja. Taką samą pozytywną uwagę można wypowiedzieć w odniesieniu do prezentacji wyników

badania. Jest ona przejrzysta, a wyniki mogą być z powodzeniem wykorzystane przez innych badaczy.

Uwagi można mieć do elementów badawczych. Nie odzwierciedlają one w pełni belek dwuprzęsłowych z betonu sprężonego. Przede wszystkim nie modelują właściwie strefy przy podporze środkowej, która ma ważne znaczenie w zakresie redystrybucji momentów zginających w belkach ciągłych (statycznie niewyznaczalnych). Pewien wpływ na wyniki badań może mieć – przy stałej sztywności belki stalowej – zmiana położenia tak zwanego punktu zerowego.

3. Uwagi krytyczne

3.1. Uwagi ogólne

Podczas czytania pracy – oprócz podanych w punkcie drugim – nasunęły się następujące uwagi natury ogólnej:

1. Klejenie tensometrów na splotach cięgien sprężających ma co najmniej trzy wady (szczególnie w cięgniach z przyczepnością): zakłóca warunki przyczepności, powoduje zmianę geometrii (przekroju) wskutek przygotowywania powierzchni do przyklejenia tensometru, zakłócenie warunków współpracy beton i cięgien spowodowane przewodami.
2. Zarysowanie betonu następuje przy przekroczeniu jego wydłużalności granicznej (zwłaszcza przy powolnym przyroście obciążenia), chociaż rzeczywiście często wiąże się go z przekroczeniem wytrzymałości betonu na rozciąganie.
3. Nie podano założeń, przy których szacowano straty reologiczne siły sprężającej. Są one procentowo duże (w odniesieniu do całkowitej siły sprężającej). Jest to tym bardziej zastanawiające, że badane belki były bardzo krótkie, a cięgna miały prostoliniowy przebieg.
4. W odniesieniu do zbiorów policzalnych powinno się stosować określenie „liczba”, a niepoliczalnych „ilość” (str. 101 i inne).
5. Tytuł pracy wykracza poza jej treść. Nie analizowano w niej stanów granicznych konstrukcji, tylko belki. W konstrukcji przeseł belki tworzą ruszt. Powstanie przegubu plastycznego w jednej belce powoduje redystrybucję momentów zginających nie tylko w tej belce, ale w całym ruszcie. Taka analiza nie została przeprowadzona, nawet w ogólnym zarysie.
6. Nie analizowano wpływu powstałego przegubu na wartości sił poprzecznych. Już sama – podana również w pracy – zmiana położenia momentu zerowego świadczy o zmianie rozkładu wartości sił poprzecznych.
7. Wyniki pomiaru ugięć badanych belek – w stosunku do belek z betonu sprężonego (na całej długości – bez części stalowej) są skażone, gdyż część stalowa o niezmienną sztywności ma zmienny udział.

8. Do wykonania belek Doktorantka użyła beton klasy C30/37. Jest to klasa minimalna stosowana obecnie do betonu sprężonego. Jednak współcześnie do elementów sprężonych wykorzystuje się beton wyższych klas.
9. Autorka nie przeprowadziła nawet uproszczonej analizy stanu zarysowania. A przecież zgodnie z tytułem pracy powinna zawierać stany użyteczności, którego częścią składową jest stan zarysowania. Może to być zadanie na przyszłość, gdyż obraz zarysowania został dokładnie pokazany.
10. Brak jest powiązania wyników badań belek swobodnie podpartych z wynikami belek ciągłych (zasadnicze elementy badawcze). W związku z tym nasuwa się pytanie; jaki był cel badania belek swobodnie podpartych.

3.2. Uwagi szczegółowe

Oprócz uwag krytycznych ogólnych, podanych w punkcie 3.1, można wymienić następujące uwagi szczegółowe:

1. Str. 13. Nie jest jasno powiedziane jaką wytrzymałość oznacza symbol f_{ck} ; zazwyczaj wytrzymałość charakterystyczną betonu. Jednak do analizy wyników badań doświadczalnych właściwiej jest przyjmować wartość średnią.
2. W tab. 2.2 można było pominąć informacje dotyczące słupów. Praca dotyczy przecież belek.
3. Objaśnienie symboli M_v i M_u powinno być w innym miejscu. We wzorach (2.2) i (2.3) wielkości te nie występują.
4. We wzorach (2.5) ÷ (2.7) – opis symboli. Nie powinno być „odkształcenie (ugięcie)” tylko „ugięcie”, a ściślej przemieszczenie pionowe.
5. Prawidłowe określenie to szerokość rys, a nie rozwartość rys (str. 22 i inne).
6. Co oznacza określenie „bardzo duża siła poprzeczna” (str. 26⁷).
7. W tabelach 3.1 ÷ 3.5 nie podano źródeł; trzeba jednak stwierdzić, że jest to jedno z niewielu miejsc, w których to niedociągnięcie występuje.
8. Tabela na stronie 40 nie ma ani tematu, ani numeru.
9. Brak jest opisu symboli występujących na rysunku 3.10.
10. Str. 51⁹ Zapewne powinno być 300 * 300 mm, a nie 300 * 300 m.
11. Nie podano do jakiego poziomu obciążenia miała miejsce stabilizacja ugięć (str. 66₁).
12. W podpisie rysunku 6.1 jest powołanie na pozycje literatury [124] i [128]. W bibliografii jest tylko 112 pozycji.

13. Powstawanie rys jest procesem. Czy jako M_r przyjmowano wartość momentu zginającego, przy którym powstaje pierwsza rysa, czy gdy występuje stabilna liczba rys, czy wartość pośrednią. Widoczne to jest między innymi na rysunku 6.2. Tym bardziej, że w dalszej części pracy, w tym we wnioskach i propozycjach, uwzględnia się zakres rysowania się, to znaczy powstawania kolejnych rys.
14. Nie wyjaśniono i nie skomentowano mniejszych wartości $\delta(x=0,10)$ niż $\delta(x=0,17)$ – tab. tab. 5.16, 5.17 i 5.18.
15. Zamiast wyteżenie (str. 94⁶) zamiast wyteżenie, lepiej jest pisać na przykład poziom stopień wykorzystania wytrzymałości.
16. Co oznacza I_{pp} (str. 117) – jak go obliczać?

4. Ocena strony formalnej pracy

Praca jest napisana jasno i czytelnie, a przy tym dobrą polszczyzną. Układ pracy jest w zasadzie poprawny. Jednak lepiej byłoby rozdział dotyczący analizy numerycznej zamieścić po rozdziale dotyczącym badań i ich wyników.

Wszystkie zagadnienia Autorka przedstawiła w przystępny i prosty sposób. Ilustracje graficzne są na bardzo dobrym poziomie. Nieliczne, dostrzeżone w tekście usterki redakcyjne – oczywiste w tak obszernej pracy – nie mają praktycznego znaczenia z merytorycznego punktu widzenia. Należy jednak zwrócić uwagę, aby przy przygotowywaniu artykułów na podstawie opiniowanej pracy sformułowania używane w mowie potocznej zamienić na poprawne z punktu widzenia czystości języka technicznego.

5. Wnioski końcowe

Pomimo uwag krytycznych natury ogólnej i bardziej szczegółowych mogę jednoznacznie i z przekonaniem stwierdzić, że opiniowana praca stanowi udane rozwiązanie postawionego zadania naukowego. Autorka wykazała się dobrym przygotowaniem i opanowaniem wiedzy z zakresu belek z betonu sprężonego, umiejętnością rozwiązywania zagadnień teoretycznych, a także prowadzenia badań doświadczalnych weryfikujących te rozwiązania.

Zarówno tezy pracy jak również metodyka rozwiązywania problemów oraz wnioski mają z jednej strony walory naukowe i poznawcze, a z drugiej strony mogą być wykorzystane w praktyce inżynierskiej. Stanowi to ważną zaletę opiniowanej pracy.

Przy realizacji pracy Autorka wykazała się umiejętnością organizowania i prowadzenia badań naukowych, a także logicznym wnioskowaniem. Są to cechy znamionujące predyspozycje do samodzielnego prowadzenia dalszej działalności naukowej na odpowiednim poziomie.

Biorąc pod uwagę podane wyżej informacje uważam, że przedłożona przez mgr inż. Katarzynę Mossor rozprawa doktorska pod tytułem „*Model przegubu plastycznego sprężonej belki betonowej i jego wpływ na szacowanie stanów granicznych konstrukcji*” stanowi

twórczy wkład do nauki w zakresie dyscypliny Inżynieria lądowa i transport oraz spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668). Stawiam zatem wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej dyskusji.

