

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała PIOTROWSKIEGO

pod tytułem:

„Wpływ sztywności węzłów na zwichrzenie belek”

promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowal

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania stanowi uchwała Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 5 lipca 2017 r, przekazana w formie pisma Prodziekana ds. Nauki i Współpracy z Zagranicą Wydziału Budownictwa i Architektury, dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka prof. PŚk, nr BD-207/17 z dnia 27.09.2017 roku.

2. Tematyka i cel rozprawy

Zagadnienie oceny możliwości przestrzennej utraty stateczności elementów zginanych w płaszczyźnie większego oporu przekroju, zwane zwichrzeniem, jest tematem nie tylko istotnym z uwagi na jego praktyczne znaczenie w procesie oceny niezawodności prętowych konstrukcji stalowych, ale również wciąż otwartym z uwagi na stopień jego dotychczasowego rozpoznania. Funkcjonujące w literaturze zależności analityczne na określenie wartości momentu krytycznego pręta zginanego są ograniczone do pewnego, podstawowego zakresu warunków podporowych. Co więcej, w zdecydowanej większości przypadków, rzeczywiste rozwiązania konstrukcyjne rzadko kiedy odpowiadają uproszczonym założeniom przyjętym do określenia warunków podparcia belek, takim jak np. klasyczne podparcie „widelkowe”. Problem jest szczególnie istotny wtedy, gdy warunki podparcia belki nie spełniają wymogów właśnie wyżej wymienionego podparcia widelkowego powodując tym samym (z braku

odpowiednich narzędzi obliczeniowych niebezpieczeństwo zawyżenia obliczeniowej nośności krytycznej belki w stosunku do rzeczywistej.

Zaproponowane i opracowane w niniejszej pracy modele analityczne pozwalają na dokładniejsze obliczenie wartości momentu krytycznego zwichrzenia, wychodząc tym samym naprzeciw oczekiwaniom i potrzebom projektantów.

Jeżeli chodzi o wykorzystanie powszechnie dostępnych narzędzi numerycznych, to znany program LTBeam rozwiązuje wiele zagadnień, jednakże brakowało analitycznego potwierdzenia, że wyniki przeprowadzonych tym programie obliczeń są wiarygodne, oczywiście pod warunkiem poprawnego określenia stopnia sprężystego zamocowania w węzłach podporowych, a to nie jest już takie proste.

Z kolei numeryczne modele belek opracowane w MES mają tylko wtedy sens, gdy uwzględniają sztywności węzłów podporowych wynikające wprost z zastosowanego i uwzględnionego w modelu rozwiązania konstrukcyjnego, co samo w sobie jest już zagadnieniem dosyć trudnym, a stąd nie zawsze dającym jednoznaczne i pewne rozwiązania.

Z uwagi na powszechną potrzebę uwzględniania zwichrzenia w procesie projektowania konstrukcji prętowych oraz brak szczegółowych zależności analitycznych, podjęcie tematyki dotyczącej wpływu rzeczywistych warunków podparcia belek na ich stateczność, jest jak najbardziej zasadne.

Następujące trzy tezy rozprawy doktorskiej (str. 48):

1. *„Sztywność węzłów podporowych i połączeń belek w węzłach konstrukcji, np. w rusztach belkowych, które uwzględniają postulaty ściśle geometrycznej topologii, wpływa bezpośrednio na nośność krytyczną belek z warunku zwichrzenia”;*
2. *„Dodatkowe zastosowanie w węzłach rusztów, które spełniają postulaty ściśle geometrycznej topologii, żeber o przekroju rurowym znacząco redukuje spaczenie przekrojów podporowych, hamuje transmisję bimomentów przez węzły oraz zwiększa nośność krytyczną łączonych belek”;*
3. *„Aproksymacja funkcji przemieszczeń $\varphi(x)$ i $u(x)$ belki za pomocą jednoznacznie określonych i odpowiednio sprzężonych wielomianów potęgowych pozwala na:*
 - a. *opis postaci zwichrzenia skojarzonej z wartością własną momentu krytycznego przy występowaniu sprężystego zamocowania przeciw spaczeniu (φ') oraz przeciw obrotowi bocznemu,*
 - b. *zwiększenie dokładności wyznaczania nośności krytycznej belki w stosunku do metody tzw. współczynników długości wyboczeniowych,*

- c. *wyprowadzenie wzorów aproksymacyjnych na moment krytyczny zwichrzenia belki sprężystie zamocowanej w węzłach podporowych dla najczęściej występujących schematów statycznych*”,

sformułowane zostały poprawnie, chociaż można by powiedzieć, że teza 1 i 2 są oczywiste, zgodne z inżynierską intuicją. Autor rozprawy sformułował bardzo obszerne cele swojej pracy (str.44), rozpoczynając od potwierdzenia tezy nr 1 i 2, a następnie poprzez:

- „*wykazanie, że do aproksymacji funkcji przemieszczeń (φ , u) belki zagrożonej utratą płaskiej postaci zgięcia, można zastosować jednoznacznie określone wielomiany potęgowe*”,
- „*poprawienie dokładności wyznaczania momentu krytycznego zwichrzenia M_{cr} belek sprężystie zamocowanych w węzłach podporowych w stosunku do dotychczas stosowanej metody...*”,
- „*opracowanie procedury obliczeniowej wyznaczania M_{cr} przy wykorzystaniu: ...*” trzech różnych metod, w tym oryginalnej aproksymacji funkcji przemieszczeń belki przy dowolnych wartościach wskaźników sprężystego zamocowania belki na podporze,

aż do wyprowadzenia tychże wzorów oraz weryfikację wyników. Powyższe cele zostały sformułowane poprawnie.

3. Analiza treści i ocena rozprawy

Przedmiotowa rozprawa doktorska ma charakter analityczny. Dotyczy zagadnienia ilościowej oceny wpływu stopnia usztywnienia węzłów podporowych na wartość momentu krytycznego zwichrzenia belki. Tekst rozprawy to 166 stron maszynopisu uzupełnione o spis literatury zawierający 105 pozycji. W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. W części pierwszej, mającej charakter kompilacyjny (rozdziały 1÷4) o łącznej objętości około 39% całości pracy, Autor syntetycznie przedstawił:

- krótki rys historyczny,
- aktualny stan wiedzy w zakresie przedmiotowej tematyki badawczej,
- aktualnie stosowane metody wyznaczania wartości momentu krytycznego zwichrzenia,
- jakościową klasyfikację sztywności węzłów podporowych belek z uwagi na warunek zwichrzenia oraz dotrzymanie geometrycznej topologii konstrukcji, co stanowi oryginalną propozycję autora rozprawy.

Do drugiej części pracy, dotyczącej autorskich badań i analiz, należą rozdziały 4÷10, stanowiące około 60% objętości całej pracy. Ta część rozprawy charakteryzuje się aspektami poznawczo-naukowymi. Zawiera szereg elementów oryginalnych, stanowiących własny dorobek naukowy Autora. Należą do nich:

- zastosowanie określonych wielomianów potęgowych opisujących ugięcia belek swobodnie podpartych oraz belek utwierdzonych, do aproksymacji funkcji przemieszczeń (φ, u) belki sprężysto zamocowanej w węzłach, tzn. do aproksymacji kąta skręcenia belki oraz ugięcia bocznego;
- sprzężenie wielomianów potęgowych poprzez wprowadzenie rozdzielonych wskaźników utwierdzenia $(\kappa_\omega, \kappa_u)$ umożliwiając tym samym niezależne uwzględnianie sprężystego oddziaływania węzłów podporowych zarówno z uwagi na spaczenie jak i obrót boczny;
- w celu wyznaczenia wartości momentu krytycznego zwichrzenia M_{cr} belek z jednoczesnym uwzględnieniem sprężystego zamocowania zarówno z uwagi na spaczenie jak i obrót boczny w węzłach podporowych, opracowanie w środowisku programu *Mathematica*, na podstawie wyżej wymienionych funkcji przemieszczeń, trzech autorskich programów:
 - *McrLT_podparcie_widelk.nb* (M_{LTB}),
 - *McrLT_elastic_fix.on.warp.nb* ($M_{LTB,EL}$),
 - *McrLT_elastic_warping_rotation_2.nb* ($M_{LTB,EL,2}$),
 oraz autorskich wzorów aproksymacyjnych (9.2÷9.9), służących do szacowania wartości momentu krytycznego zwichrzenia;
- opracowanie w programie *Abacus* modeli numerycznych belek odwzorowujących fizyczną geometrię rozwiązań konstrukcyjnych podpór belek;
- przeprowadzenie szeregu analiz obliczeniowych dla 6 rodzajów belek dwuteowych, 4 rozpiętości oraz 10 rodzajów obciążeń poprzecznych przykładanych na trzech różnych wysokościach przekroju poprzecznego belek w celu określenia zmienności wartości M_{cr} w zależności od stopnia sprężystego zamocowania w węzłach podporowych,
- ilościowa ocena wpływu konstrukcji różnych żeber podporowych na wartość M_{cr} ,
- wykazanie znaczącego wpływu żeber o przekroju rurowym na stateczność rusztu typu H.

Trzecia część pracy to rozdział 11, zawierający zestawienie istotnych wniosków, wynikających z przeprowadzonych przez Autora badań.

Wyniki badań teoretycznych i przeprowadzonych symulacji numerycznych stanowią istotny wkład w rozszerzenie wiedzy na temat wpływu warunków sprężystego zamocowania belek na ich nośność krytyczną.

Autor rozprawy doktorskiej wykazał się umiejętnością jasnego formułowania i analizowania problemu badawczego, jak również znajomością literatury z zakresu stateczności zginanych elementów prętowych. Na uwagę zasługuje wnikliwość i dociekliwość Autora, który dwukrotnie zidentyfikował błędy w innych pracach (str.59 i 60).

Uważam, że przyjęte cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy potwierdzone wynikami przeprowadzonych analiz.

4. Uwagi krytyczne

Analizując rozprawę doktorską nasunęły mi się uwagi krytyczne i dyskusyjne o charakterze merytorycznym i redakcyjnym, wymagające skomentowania przez Autora w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej:

A. Uwagi merytoryczne

1. W drugim akapicie na str.15 znajduje się sformułowanie mówiące o wpływie „*detali (imperfekcji) konstrukcyjnych*” na sztywność warunków brzegowych. Czy detale konstrukcyjne mogą być utożsamiane z imperfekcjami?
2. Dyskusyjne jest stwierdzenie na str. 51, że „*metody doświadczalne i symulacje MES są traktowane w zasadzie równoważnie*”, tym bardziej, że na str. 41 Autor pisze: „*w celu poprawienia bezpieczeństwa konstrukcji już na etapie projektowania obliczenia MES powinny być weryfikowane chociażby uproszczonym oszacowaniem analitycznym*”, z czym jak najbardziej zgadzam się. Model numeryczny może być uznany za poprawny dopiero po przeprowadzeniu jego walidacji.
3. Uzasadnić, dlaczego w wierszach 1 i 4, w Tabeli 6.1. zastosowano identyczne postacie wielomianów potęgowych.
4. W jaki sposób stwierdzono, że „*najlepsze oszacowanie momentu krytycznego uzyskano dla pierwszego wyrazu funkcji kąta skręcenia*” (str.95).
5. Sformułowanie „*obliczenia symboliczne*” na str. 87 nie jest precyzyjne, można się tylko domyślać jaki był zamysł autora.
- 6.

B. Uwagi redakcyjne

Praca jest dobrze napisana i zilustrowana. Drobne usterki gramatyczne i edytorskie zaznaczyłam w maszynopisie pracy i przekażę je Autorowi w celu ich późniejszego uwzględnienia. Dotyczą one m.in.:

- braku cytowania pracy prof. Z. Kowala dotyczącej „geometrycznej topologii konstrukcji” (str. 16, 29),
- zbędnego przecinka po pierwszym słowie, w pierwszym akapicie na str.16,
- stosowania słowa „ilość” zamiast „liczba” (str.28),
- wielokrotnie powtarzającego się sformułowania: „wpływ na moment krytyczny zwichrzenia belek”, a powinno być „wpływ na wartość momentu krytycznego” np. na stronie 29, 31, 32, 33, 34, itd.,
- rys. 2.5 – brakuje opisu podpunktów: *a) bez podcięcia pólek, b) z podcięciem pólek*,
- zastosowane nazwy autorskich programów są zbyt podobne nie tylko do siebie, ale również to programu LTBeam (str 98, 101), co zdecydowanie utrudnia czytanie pracy,
- tytuł Tabeli 10.2 powinien być uzupełniony o sformułowanie: „dla $\kappa_a=0$ ”,
- nagłówki tabel 10.2, 10.4, 10.5, są opisane mało czytelnie z powodu jak powyżej; w nagłówku kolumny 4 jest „MES” i należy domyślać się że chodzi o program *LTBeam*, również oznaczenie nagłówka kolumny 5 jako „ M_{LTB} ” (właśnie przez podobieństwo do programu *LTBeam*) powoduje zamieszanie;
- analogicznie, w nagłówkach Tabel 10.3. i 10.6 czytamy: „ M_{LTB} vs. LTBeam”, co jest błędem natury komunikacyjnej.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter analityczny i aplikacyjny. Autor podjął się rozwiązania aktualnego zagadnienia naukowego, dotyczącego uzupełnienia wiedzy w zakresie wyznaczania momentu krytycznego zwichrzenia z uwzględnieniem rzeczywistych warunków brzegowych.

Z zadania tego Autor wywiązał się dobrze, gdyż jego praca zakończona jest bardzo istotnymi z punktu widzenia projektanta wnioskami odnośnie wagi kształtu żeber podporowych, szczególnie w rusztach, a także ważną kontestacją, że „w celu zapewnienia

odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji już na poziomie projektowania, zalecaną praktyką powinno być sprawdzenie obliczeń komputerowych dostępną metodą analityczną”.

Z treści rozprawy wynika, że Autor:

- właściwie sprecyzował cel i przyjęte tezy rozprawy oraz konsekwentnie ten cel zrealizował,
- dobrze zna od strony analitycznej ogół aktualnych zagadnień objętych zakresem rozprawy w dyscyplinie naukowej budownictwo,
- zawarł w rozprawie szereg elementów oryginalnych wzbogacając aktualny stan wiedzy o analizowanych zagadnieniach,
- wykazuje dobry stopień przygotowania naukowego, umiejętność poprawnego i samodzielnego prowadzenia badań naukowych i ich interpretacji.

Przedstawione fakty świadczą o tym, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Piotrowskiego *„Wpływ sztywności węzłów na zwichrzenie belek”* spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku *„O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”*.

Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Rafała Piotrowskiego do publicznej obrony wykonanej rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej.

dr hab. inż. Elżbieta Urbańska-Galewska, prof. PG

Gdańsk, 9 listopada 2017 r.