

Gdańsk, dnia 05.01.2026

prof. dr hab. inż. Robert Jankowski
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel.: (58) 3472200
e-mail: jankowr@pg.edu.pl

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Sylwestra Wałacha pt.

Parametryczna analiza wpływu nieliniowego modelowania żelbetowych budynków płytowo-słupowych na ich odporność ze względu na postępującą katastrofę

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania niniejszej recenzji pracy doktorskiej jest pismo Rektora Politechniki Opolskiej, dra hab. inż. Marcina Lorenc, z dnia 13.11.2025 wraz z przesłaną w późniejszym terminie rozprawą doktorską mgr inż. Sylwestra Wałacha pt. „*Parametryczna analiza wpływu nieliniowego modelowania żelbetowych budynków płytowo-słupowych na ich odporność ze względu na postępującą katastrofę*” wykonaną pod kierunkiem dra hab. inż. Seweryna Kokota (promotor pomocniczy: dr inż. Juliusz Kuś).

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca dotyczy zagadnień związanych z katastrofami postępującymi monolitycznych konstrukcji żelbetowych, szczególnie układów płytowo-słupowych. W rozprawie przeanalizowano wpływ sposobu kształtowania konstrukcji żelbetowych oraz nieliniowego modelowania układu szkieletowego na odpowiedź dynamiczną konstrukcji i możliwość wystąpienia katastrofy postępującej na skutek utraty słupów. Przeanalizowano wpływ prędkości usuwania słupa na odpowiedź dynamiczną konstrukcji uwzględniając nieliniowość geometryczną i materiałową elementów konstrukcyjnych.

Dysertacja składa się z części teoretycznej, gdzie opisano aktualny stan wiedzy oraz części obliczeniowej, gdzie zaprezentowano wyniki analiz numerycznych. Praca liczy 170 stron i zawiera 86 rysunków, 10 tablic, 95 ponumerowanych wzorów oraz 225 pozycji bibliografii. Napisana jest ona w języku polskim i zawiera: spis treści, 9 numerowanych

rozdziałów (w tym „Wstęp” oraz „Podsumowanie i wnioski”), literaturę, spis rysunków i spis tabel.

3. Treść pracy i uwagi krytyczne oraz redakcyjne

3.1. Rozdział 1: „Wstęp” (4 strony)

We wstępie do rozprawy przedstawiono wprowadzenie do zagadnień związanych z katastrofami budowlanymi konstrukcji budowlanych. Określono cel i zakres pracy, przedstawiono zawartość poszczególnych rozdziałów oraz tezy rozprawy i podstawowe założenia.

Uwagi

- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „schematu jest rozprzestrzeniania” zamiast „schematu jej rozprzestrzeniania” (strona 5), „nieliniowych analizy dynamicznych” zamiast „nieliniowych analiz dynamicznych” (strona 7).

3.2. Rozdział 2: „Przegląd zaistniałych postępujących katastrof budowlanych” (4 strony)

W rozdziale szczegółowo omówiono opisane w literaturze najważniejsze przypadki katastrof postępujących, ich przyczyny oraz wnioski, które wyciągnięto na ich podstawie.

Uwagi

- Błędnie zastosowano wyraz „ilość” zamiast „liczba” do opisu rzeczowników policzalnych, zob. „największej ilości elementów” zamiast „największej liczbie elementów” (strona 9).
- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „Kore Południowa” zamiast „Korea Południowa” (strona 11).

3.3. Rozdział 3: „Przegląd procedur oraz strategii zawartych w wybranych normach i wytycznych dla projektowania budynków przeciwko katastrofom postępującym” (17 stron)

W rozdziale opisano procedury oraz strategie zawarte w normach i wytycznych do projektowania budynków, aby uniknąć katastrofy postępującej. Porównano założenia i wytyczne w normach europejskich, amerykańskich, brytyjskich oraz zeszytach technicznych.

Uwagi

- Błędnie zastosowano wyraz „ilość” zamiast „liczba” do opisu rzeczowników policzalnych, zob. „ilości kondygnacji” zamiast „liczby kondygnacji” (strona 26).
- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „rozpatruję się” zamiast „rozpatruje się” (dwukrotnie, strona 27).

3.4. Rozdział 4: „Typy katastrof postępujących” (4 strony)

W rozdziale przedstawiono typy katastrof postępujących wraz z ich kwalifikacją. Opisano podstawowe schematy rozwoju katastrofy prowadzące do globalnego zniszczenia.

3.5. Rozdział 5: „Metody zabezpieczenia konstrukcji przed katastrofą postępującą” (11 stron)

Rozdział zawiera opis metod zabezpieczania konstrukcji przed katastrofą postępującą. Omówiono mechanizmy obronne konstrukcji w zależności od typu konstrukcji oraz przedstawiono zabezpieczenia wykonawcze oraz architektoniczno-urbanistyczne.

Uwagi

- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „w ramie w po usunięciu słupa” zamiast „w ramie po usunięciu słupa” (strona 35), „miedzy bronionym obszarem” zamiast „między bronionym obszarem” (strona 40).

3.6. Rozdział 6: „Nieliniowe niesprężyste modelowanie konstrukcji żelbetowych” (57 stron)

W rozdziale szczegółowo omówiono pojęcia związane z nieliniowymi statycznymi i dynamicznymi analizami numerycznymi. Opisano sposoby uwzględnienia nieliniowości, procedury obliczeniowe, metody kontroli procedur obliczeniowych, sposób modelowania słupów oraz płyt żelbetowych, sformułowania zastosowanych elementów prętowych i powłokowych oraz modele betonu i stali.

Uwagi

- Błędnie zastosowano wyraz „ilość” zamiast „liczba” do opisu rzeczowników policzalnych, zob. „większej ilości parametrów” zamiast „większej liczbie parametrów” (strona 48), „odpowiedniej ilości punktów” zamiast „odpowiedniej liczbie punktów” (strona 85), „znacząca ilość rys” zamiast „znacząca liczba rys” (strona 91).
- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „wymagana redukcja sztywności” zamiast „wymagana jest redukcja sztywności” (strona 47), „wymaga znacznej większej” zamiast „wymaga znacznie większej” (strona 48), „wyzwanie do standardowych stacji roboczych” zamiast „wyzwanie dla standardowych stacji roboczych” (strona 48), „które zapewnia dobrą dokładność” zamiast „które zapewniają dobrą dokładność” (strona 48), „w których określą się” zamiast „w których określa się” (strona 53), „czas trwania anlizy” zamiast „czas trwania analizy” (strona 55), „stosuje się ... metodą Newmarka” zamiast „stosuje się ... metodę Newmarka” (strona 56), „zaimplantowany w programie OpenSees” zamiast „zaimplementowany w programie OpenSees” (strona 59), „etapem tworzenie wielowarstwowego elementu” zamiast „etapem tworzenia wielowarstwowego elementu” (strona 60), „poszczególnym warstwą” zamiast „poszczególnym warstwom” (strona 60), „wykorzystuję się” zamiast „wykorzystuje się” (strona 84), „zaleceń dotyczącej” zamiast „zaleceń dotyczących” (strona 85), „siłą ściskającą ... pomnożonej przez” zamiast „siłą ściskającą ... pomnożoną przez” (strona 85), „bazującej na praca” zamiast „bazującej na pracy” (strona 86), „zależny jest od ... właściwościach słupa” zamiast „zależny jest od ... właściwości słupa” (strona 90), „zgodnie z normy” zamiast „zgodnie z normą” (strona 91), „przez związki konstytutywny” zamiast „przez związki konstytutywne” (strona 91), „podejście wymaga, ponowne utworzenie siatki” zamiast „podejście wymaga ponownego utworzenia siatki” (strona 91), „pasma, w którym obrębie” zamiast „pasma, w którego obrębie” (strona 91), „podatna ... na zagęszczenia siatki” zamiast „podatna ... na zagęszczenie siatki” (strona 96).

3.7. Rozdział 7: „Analizy numeryczne wybranych elementów żelbetowych w przypadku katastrofy postępującej” (29 stron)

W rozdziale przedstawiono wyniki nieliniowej analizy statycznej płyty żelbetowej, w której uwzględniana jest nieliniowość geometryczna w ujęciu korotacyjnym przy

zastosowaniu sprężystego modelu betonu. Przeprowadzono nieliniową analizę statyczną typu „pushdown” przy wykorzystaniu nieliniowości materiałowej i geometrycznej. Wykonano szereg liniowych i nieliniowych analiz dynamicznych badając wpływ czasu usunięcia podpory na odpowiedź konstrukcji. W zależności od wyężenia konstrukcji i rodzaju analizy obliczono współczynnik dynamicznego wzmocnienia.

Uwagi

- Wyniki uzyskane z analiz numerycznych powinny być zawsze weryfikowane poprzez ich porównanie z wynikami badań eksperymentalnych. Porównanie wyników przy zastosowaniu innego programu komputerowego (co zostało wykonane w niniejszym rozdziale) nie jest wystarczające, gdyż nadal będzie to symulacja numeryczna, a nie rzeczywiste zachowanie się konstrukcji.
- Na stronie 108 Autor pisze: *„Dodatkowo, aby uwzględnić znacznie wyższą sztywność węzła (co w rzeczywistości jest zapewnione przez krzyżujące się zbrojenie powyższych elementów), obszar ten zamodelowano jako liniowo-sprężysty (rysunek 7.8. obszar zielony), ze sztywnością 100-krotnie większą.”*. Pojawia się jednak pytanie: dlaczego wybrano właśnie wartość 100? Czy wykonano szczegółową analizę potwierdzającą słuszność przyjęcia takiej właśnie wartości?
- Na stronie 110 opisana jest kolejność zniszczenia poszczególnych elementów konstrukcji bazując na wynikach analizy numerycznej. Potwierdzeniem poprawności tego opisu byłoby porównanie go z wynikami uzyskanymi z badań eksperymentalnych.
- W rozprawie brakuje rysunku 5.5a, do którego odwołanie pojawia się na stronie 112.
- Na stronie 115 Autor pisze: *„Na powyższych przykładach, stwierdzono, że jedynie połączenie obydwu efektów w przypadku katastrofy postępującej zapewnia odpowiedni rozwój i propagację pierścieni ściskających i rozciągających, co przedstawiono na rysunku 7.16. i jest zgodne z literaturą przedstawioną w rozdziale 5.1.4.”*. Porównanie do literatury przedmiotu jest tu jednak zbyt ogólne. Wskazane byłoby szczegółowe porównanie z wynikami opisanymi w literaturze dla tej samej (lub bardzo podobnej) konstrukcji.
- W tabeli 7.3 (strona 119) błędnie podano wartość okresu drgań własnych konstrukcji dla pierwszej postaci drgań. Prawidłowa wartość to 0,1 s, a nie 0,01 s.

- W analizie numerycznej (strona 122) zastosowano tłumienie Rayleigha zakładając, iż wartość liczby tłumienia dla dwóch pierwszych częstości drgań własnych konstrukcji wynosi 5%. Pomimo, iż jest to typowa wartość dla konstrukcji żelbetowych, nasuwa się jednak pytanie jak zmieni się zachowanie konstrukcji dla innych wartości liczby tłumienia drgań, szczególnie, iż wartość 5% nie została przyjęta na podstawie wyników badań eksperymentalnych dla analizowanej konstrukcji.
- Błędnie zastosowano wyraz „ilość” zamiast „liczba” do opisu rzeczowników policzalnych, zob. „ilość ... kombinacji” zamiast „liczba ... kombinacji” (strona 130).
- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „Osiągnięcie ... punktu” zamiast „Osiągnięcie ... punktu” (strona 109), „pełnego jego zwiotczenie” zamiast „pełne jego zwiotczenie” (strona 110), „Wynika to zastosowania” zamiast „Wynika to z zastosowania” (strona 114), „modyfikacji usprawniający ... proces” zamiast „modyfikacji usprawniającej ... proces” (strona 118), „przy czasach ... dłuższy niż” zamiast „przy czasach ... dłuższych niż” (strona 127).

3.8. Rozdział 8: „Konstrukcja płytowo-słupowa” (20 stron)

W rozdziale przeprowadzono walidację modelu numerycznego poprzez odtworzenie eksperymentu rzeczywistej konstrukcji płytowo-słupowej poddanej nagłej utracie podpory. Przedstawiono sposób kalibracji modelu numerycznego na podstawie pomierzonych przyspieszeń. Końcowy etap obliczeń przeprowadzono za pomocą nieliniowej analizy statycznej „pushdown” wyznaczając maksymalną nośność konstrukcji w przypadku scenariusza utraty słupa narożnego.

Uwagi

- Na stronie 137 Autor pisze: „Ze względu na brak dokładnego przedstawienia charakterystyk dynamicznych w artykułach opisujących eksperyment i wskazania pomierzonej postaci, nie można porównać wartości eksperymentalnych i numerycznych w tym zakresie.”. Brak możliwości porównania charakterystyk dynamicznych uniemożliwia niestety dokładną walidację modelu konstrukcji wykorzystanego w analizie numerycznej.
- Z kolei na stronie 140 Autor pisze: „Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 8.3, wyniki uzyskane w programie OpenSees/STKO wykazują niewielkie różnice

w porównaniu do wartości eksperymentalnych.”. Można się zgodzić z tym stwierdzeniem jedynie w odniesieniu do wartości ugięć pionowych, dla których różnice wyniosły 12,5 % i 15,7%. Jednakże, dla wartości przemieszczeń poziomych zestawionych w tabeli 8.3 różnice te wyniosły aż 69,2% i 71,7%. Co mogło być przyczyną tak dużych różnic w tym przypadku?

- W kilku miejscach występują drobne błędy językowe, zob.: „*równomierne rozłożone*” zamiast „*równomiernie rozłożone*” (strona 145).

3.9. Rozdział 9: „Podsumowanie i wnioski” (4 strony)

Rozdział poświęcono na podsumowanie pracy i wnioski końcowe. Przedstawiono również oryginalne elementy rozprawy oraz kierunki dalszych badań.

3.10. Literatura (11 stron)

Przedstawiono spis cytowanej literatury (225 pozycji) uporządkowanej alfabetycznie.

4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy ważnego (z praktycznego punktu widzenia) problemu związanego z katastrofami postępującymi w odniesieniu do monolitycznych konstrukcji żelbetowych, szczególnie układów płytowo-słupowych, mając na uwadze fakt, iż zawalenie się wielokondygnacyjnego budynku doprowadzić może do dużej liczby ofiar śmiertelnych oraz do znacznych strat materialnych. Katastrofy postępujące mogą wywołać przede wszystkim: trzęsienia ziemi, ataki terrorystyczne, uderzenia pojazdów czy wybuchy gazu, ale do katastrof mogą przyczynić się także błędy projektowe oraz wykonawcze.

Spośród wielu różnych możliwych strategii i metod projektowania konstrukcji, w niniejszej rozprawie przyjęto metodę alternatywnej ścieżki obciążenia, w której zakłada się, że element nośny (np. słup) ulega zniszczeniu na skutek oddziaływania wyjątkowego. Zastosowanie tej metody umożliwiło Autorowi śledzenie procesu zniszczenia konstrukcji, co szczegółowo przedstawiono w części obliczeniowej pracy.

Główna część badań obejmowała przestrzenne nieliniowe analizy numeryczne zachowania się żelbetowych konstrukcji płytowo-słupowych, które wykonano za pomocą metody elementów skończonych przy wykorzystaniu oprogramowania OpenSees. W analizach wykorzystano element powierzchniowy pozwalający na uwzględnienie

nieliniowości geometrycznej w sformułowaniu korotacyjnym oraz zdefiniowanie wielowarstwowych przekrojów żelbetowych płyty. Ze względu na fakt, iż w przypadku katastrofy postępującej konstrukcja ulega znacznym deformacjom, co skutkuje znaczną rozbieżnością między wynikami analiz opartych na geometrii liniowej i nieliniowej przeprowadzono nieliniową analizę statyczną typu „pushdown”, której najważniejszym rezultatem uzyskanym przez Autora jest krzywa zależności sumy reakcji pionowych od ugięć pionowych. Dodatkowo, rozszerzono zakres analizy uwzględniając nieliniowość materiałową przy jednoczesnym uwzględnieniu zarówno liniowej, jak i nieliniowej geometrii. Wyniki analiz przeprowadzonych przez Autora pokazały, że numeryczne odtworzenie mechanizmu obronnego w postaci oddziaływania membranowego, a w konsekwencji powstania rozciąganego pierścienia wewnętrznego i wzmacniającego go pierścienia ściskanego na obrzeżach, jest możliwe jedynie przy jednoczesnym uwzględnieniu nieliniowości materiałowej i geometrycznej.

Przeprowadzono także liniową i nieliniową analizę dynamiczną płyty żelbetowej, w której odpowiedź konstrukcji była zależna od czasu usunięcia podpory. W tym celu opracowano autorskie skrypty w języku Python umożliwiające zautomatyzowane obliczenia w pętli dla wybranych czasów usunięcia podpory. Potwierdzono, iż w przypadku dynamicznego zniszczenia (przy krótkim czasie usunięcia słupa) może wystąpić katastrofa postępująca, podczas gdy powolne usunięcie tego samego elementu nie doprowadzi do takiej katastrofy.

W ostatniej części rozprawy przeprowadzono zaawansowaną nieliniową analizę numeryczną dla konstrukcji płytowo-słupowej poddanej nagłemu usunięciu słupa porównując wyniki z rezultatami eksperymentu przeprowadzonego dla rzeczywistej konstrukcji, który opisano w literaturze. Wykorzystano metodę kalibracji modelu numerycznego polegającą na dopasowaniu czasu usunięcia słupa do rzeczywistych, zmierzonych przyspieszeń. Przeprowadzono szczegółową nieliniową analizę statyczną typu „pushdown”, która pozwoliła na wyznaczenie maksymalnego dopuszczalnego obciążenia i ugięcia analizowanej konstrukcji, po którym nastąpiła utrata zbieżności obliczeń spowodowana zniszczeniem słupów.

Praca napisana została poprawnie pod względem językowym, a szereg wskazanych w niniejszej recenzji błędów językowych w żaden sposób nie umniejsza pozytywnej opinii recenzenta w tym zakresie.

Na stronie 153 rozprawy, Autor zestawiał najbardziej oryginalne (jego zdaniem) elementy pracy, tj.:

- a) uwzględnienie wpływu dużych deformacji stropu żelbetowego poprzez zastosowanie metody nieliniowości geometrycznej w podejściu korotacyjnym powłokowych elementów skończonych.
- b) wykazanie, że występowanie membranowego mechanizmu obronnego konstrukcji płytowej jest możliwe jedynie w przypadku uwzględnienia jednocześnie nieliniowości materiałowej i geometrycznej.
- c) opracowanie numerycznej procedury w języku Python w programie STKO umożliwiającego analizę zachowania konstrukcji dla różnych czasów usunięcia słupa.
- d) opracowanie numerycznej procedury w języku Python w programie STKO umożliwiającego uzyskanie krzywej spektrum odpowiedzi dla różnych czasów usunięcia podpory w przypadku analiz liniowych i nieliniowych.
- e) opracowanie przykładów w programie STKO wykorzystujących procedurę obliczania reakcji i przykładania kontreakcji (w jednym modelu numerycznym) w miejscu rozważanego zniszczenia słupa.
- f) autorski sposób modelowania numerycznego połączenia słupa z płytą w przypadku nieliniowej analizy katastrofy postępującej.
- g) wykazanie, że współczynnik dynamicznego wzmocnienia (DAF) zależy od wyężenia konstrukcji w zależności od rodzaju analizy (statycznej lub dynamicznej) i może być większy niż wartość zalecana w wytycznych.
- h) wykorzystanie sprężysto-plastycznego materiału konstytutywnego betonu ze zniszczeniem „ASDCONCRETE3D” (zaimplementowanego w programie OpenSees) w kontekście katastrof postępujących.
- i) wykonanie kalibracji modelu numerycznego na podstawie pomierzonych przyspieszeń z wybranego eksperymentu zaczerpniętego z literatury.

Recenzent potwierdza oryginalność powyższych elementów ujętych w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o umiejętności formułowania i rozwiązywania przez jej Autora, mgr inż. Sylwestra Wałacha, problemów związanych z analizą wpływu nieliniowego modelowania żelbetowych konstrukcji płytowo-słupowych na

ich odporność ze względu na postępującą katastrofę. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Sposób analizy i rozwiązywania stawianych zagadnień wskazuje, że Autor potrafi w pełni wykorzystać swą wiedzę i umiejętności.

Reasumując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Sylwestra Wałacha do publicznej obrony pracy.

R. Janowski