



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ  
I ŚRODOWISKA



Katedra Konstrukcji Betonowych  
dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz, prof. uczelni

22.06.2021r.

I.dz. 04/06.2021/KKB

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.

**Wpływ polimerowego złącza podatnego  
na pracę połączonych elementów betonowych**

autorstwa mgr inż. Łukasza Zdanowicza

wykonanej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

## 1. Podstawa opracowania

Podstawą realizacji recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Szaraty z dnia 24 kwietnia 2021r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Zdanowicza pt. *"Wpływ polimerowego złącza podatnego na pracę połączonych elementów betonowych"* wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Arkadiusza Kwietnia, prof. PK jako Promotora i dr inż. Szymona Seręgi jako Promotora Pomocniczego.

## 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki diagnostyki złączy podatnych realizowanych w elementach betonowych z zastosowaniem polimerów. Praca jest napisana w języku polskim. Dysertacja liczy 242 numerowane strony formatu A4 i składa się z 6 Rozdziałów: (1) *Wstęp*, (2) *Stan wiedzy*, (3) *Materiały*, (4) *Badania własne*, (5) *Analiza numeryczna*, (6) *Podsumowanie i wnioski*, poprzedzonych streszczeniem w języku polski i angielskim, spisem treści oraz spisem oznaczeń stosowanych w pracy. Bibliografia obejmuje sporo, bo ponad 250 pozycji literatury. W pracy znajdują się spis ilustracji, spis tabel, jak również spis publikacji Autora, które powstały w okresie przygotowywania rozprawy doktorskiej.

## 3. Treść rozprawy

Rozdział 1 (*Wstęp*) stanowi wprowadzenie w tematykę związaną z realizacją złącza podatnego, w szczególności z wykorzystaniem materiałów jakimi są polimery. W tej części pracy określono problem naukowy, który został poddany analizie i przedstawiony w dalszej treści rozprawy doktorskiej, jak również scharakteryzowano zakres pracy doktorskiej.

W Rozdziale 2 (*Stan wiedzy*) przedstawiono zagadnienie na temat przyczyn tzw. odkształceń wymuszonych, przywołano przykładowe uszkodzenia i usterki elementów konstrukcyjnych spowodowanych

POLITECHNIKA GDAŃSKA  
WILIS Katedra Konstrukcji Betonowych  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Zastępca Kierownika Katedry  
Kierownik Regionalnego Laboratorium Budownictwa  
tel. +48 58 347-22-31  
e-mail: maciej.niedostatkiwicz@wilis.pg.gda.pl  
www.wilis.pg.edu.pl

Sekretariat Katedry  
tel. +48 58 347-10-57  
e-mail: malgorzata.zaborska@wilis.pg.gda.pl

Wpłynęło dnia 30.06.2021  
L.dz. 10.510.2.3.2021  
Wydział Inżynierii Lądowej  
I. Niedostatkiwicz

występowaniem tego typu odkształceń. Podano również aktualne, stosowane powszechnie metody naprawy tego typu dysfunkcji elementów konstrukcyjnych.

Rozdział 3 (*Materiały*) obejmuje obszerny przegląd literatury przedmiotu rozprawy doktorskiej. Zawarto w nim między innymi informacje dotyczące właściwości mechanicznych złącza podatnego elementów betonowych, szczegółowo opisano popularne modele teoretyczne opisujące pracę zarówno betonu, jak również polimeru w różnych warunkach obciążenia. W tej części pracy scharakteryzowano także ideę złącza podatnego.

W Rozdziale 4 (*Badania własne*) przedstawiono w sposób syntetyczny wyniki badań własnych przeprowadzonych w skali laboratoryjnej, skoncentrowanych na badaniach podstawowych jakimi są czteropunktowe zginanie oraz jednoosiowe rozciąganie. Rozdział ten zawiera również wyniki badań które należy uznać za próbę badań parametrycznych.

Rozdział 5 (*Analiza numeryczna*) zawiera uzyskane wyniki obliczeń wykonanych z zastosowaniem programu komercyjnego. Zakres wykonanych obliczeń był rozszerzony w stosunku do zrealizowanych badań doświadczalnych.

W Rozdziale 6 (*Podsumowanie i wnioski*) zamieszczono podsumowanie oraz wnioski i uwagi końcowe z przeprowadzonych badań, poszerzone o kierunki dalszych możliwych do realizacji badań tematycznie związanych z realizacją złącza podatnego z zastosowaniem materiałów jakimi są polimery.

Rozprawa zakończona jest wykazem literatury zawierającym pozycje zarówno krajowe, jak również zagraniczne. Zasadniczo uwzględniono pozycje literatury naukowej oraz naukowo-technicznej odzwierciedlające współczesny poziom wiedzy w zakresie tematyki stanowiącej przedmiot rozprawy doktorskiej. Pracę uzupełnia spis ilustracji oraz spis zamieszczonych w rozprawie doktorskiej tabel, ponadto w pracy znajduje się zestawienie publikacji Autora, które powstały w okresie przygotowywania rozprawy doktorskiej.

#### **4. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne**

Problemem naukowym, będącym celem pracy była analiza możliwości zastosowania polimerów do realizacji złącza podatnego w elementach betonowych przeprowadzona w aspekcie oceny efektywności pracy tego złącza. Rozważania dotyczące przedmiotowego problemu zrealizowane zostały na podstawie szczegółowej analizy teoretycznej, eksperymentów doświadczalnych przeprowadzonych w skali laboratoryjnej oraz na podstawie wykonanej analizy numerycznej z wykorzystaniem programu komercyjnego.

Złącza podatne należą do grupy rozwiązań inżynierskich które umożliwiają naprawę uszkodzonych elementów, w tym elementów betonowych, a w konsekwencji czego ponownego uzyskania możliwości przenoszenia obciążeń zewnętrznych bez postawiania uszkodzeń w części przyległej naprawianych powierzchni. Na uwagę zasługuje w tym miejscu fakt, że problemem z którym spotykamy się w codziennej praktyce inżynierskiej jest możliwość ponownego powstania uszkodzenia lub lokalnej usterki w miejscu wykonanej naprawy.



Przeprowadzone wcześniej przez innych badaczy eksperymenty doświadczalne pokazały, że zastosowanie złącza podatnego z użyciem polimerów może prowadzić do istotnego ograniczenia lub wręcz likwidacji możliwości powstawania uszkodzeń w strefie poddanej naprawie oraz, że w przypadku zastosowania polimerów wtórne uszkodzenia w obszarze połączenia podatnego będą miały przewidywalny kształt oraz nie powodują zwiększonej destrukcji elementów betonowych.

Autor rozprawy doktorskiej zaproponował własny (autorski) zakres badań, w oparciu o podstawowe badania mechaniczne jakimi jest czteropunktowe zginanie i jednoosiowe rozciąganie, które umożliwiają jednak sformułowanie wniosków na temat zależności pomiędzy postacią zniszczenia złącza podatnego wykonanego w strefie osłabionej (po wykonaniu nacięcia wymuszającego zniszczenie) dla przypadku: a) po wcześniejszym kontrolowanym rozcięciu i sklejeniu oraz b) po zniszczeniu i ponownym sklejeniu w miejscu uszkodzenia (zniszczenia ciągłości elementu).

Należy wyraźnie podkreślić, że dostępne źródła literaturowe nie podają informacji na temat mechanizmu zachowania się betonu w strefie przy (wzdłuż) wykonanego połączenia podatnego. Dotyczy to zarówno przypadku połączenia pierwotnego, jak również połączenia wtórnego.

W ocenie Recenzenta podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna z praktycznego punktu widzenia, a zakres pracy łączy badania doświadczalne i analizy teoretyczne. W wyniku prowadzonych prac opracowano oryginalną metodykę pozwalającą na zbliżoną do wiarygodnej identyfikację właściwości złącza podatnego, a w konsekwencji umożliwiającą próbę formułowania wniosków na temat efektywności pracy tego złącza, rozumianą jako zdolność w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Jest to szczególnie ważne dlatego, że wnioski wynikające z przedmiotowej rozprawy doktorskiej mogą znaleźć częściowe odniesienie do realnych problemów inżynierskich z którymi spotykamy się we współczesnym budownictwie. Recenzent ma jednak nieodparte wrażenie, że wyniki badań doświadczalnych przedstawione w pracy posiadają liczne ograniczenia, a ich zakres ograniczony jest do elementów w skali laboratoryjnej.

Zakres, jaki obejmuje rozprawa związany jest z celem pracy i można go przedstawić w następujących punktach:

- dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego w zakresie właściwości połączeń podatnych oraz prowadzonych dla tego rodzaju próbek badaniach,
- próba usystematyzowania bazy wiedzy dotyczącej mechanizmów zniszczenia złączy podatnych,
- wykonanie badań doświadczalnych w oparciu o proste testy mechaniczne dla różnych wariantów złącza podatnego oraz z uwzględnieniem typoszeru różnego rodzaju polimerów (PT i PS),
- przeprowadzenie badań doświadczalnych w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem dodatkowych metod pomiarowych (*DIC-Digital Image Correlation* (*PIV-Particle Image Velocimetry*)) oraz sformułowanie na ich podstawie wniosków,
- wykonanie dodatkowych badań doświadczalnych o charakterze parametrycznym,
- wykonania kontrolnych obliczeń numerycznych, w tym dla przypadków nie poddanych analizie doświadczalnej,
- podsumowanie wraz ze sformulowaniem wniosków naukowych i praktycznych oraz podanie kierunków dalszych badań mających na celu rozszerzenie i udoskonalenie wyników badań doświadczalnych oraz analiz teoretycznych.

W odczuciu Recenzenta za najważniejsze oryginalne elementy rozprawy można uznać:

- uporządkowany przegląd literatury tematycznie związanej z przedmiotem rozprawy doktorskiej umożliwiający na wstępnym etapie czytania pracy wyrobienie sobie opinii o aktualnym poziomie wiedzy (informacji) odnośnie możliwości zastosowania polimerów do realizacji złącza podatnego z elementów betonowych,
- próba uporządkowania istniejących, wcześniejszych wyników badań i doświadczeń innych badawczy, jak również badań własnych,
- próba charakterystyki złączy podatnych na bazie polimerów pod kątem ich efektywności pracy przy uwzględnieniu rodzaju zastosowanego polimeru oraz geometrii przekroju elementu betonowego,
- zastosowanie pomiarowej metody optycznej (*DIC-Digital Image Correlation (PIV-Particle Image Velocimetry)*) do ilościowej oceny zachowania się polimeru oraz betonu w strefie złącza podatnego,
- wprowadzenie pojęcia energii zniszczenia oraz miary tej wielkości w funkcji do wielkości ugięcia i CMOD (rozwarości nacięcia), próba ilościowego oszacowania energii zniszczenia dla różnych wariantów złącza podatnego,
- wykonanie obliczeń numerycznych, w zakresie umożliwiającym rozpoczęcie tworzenia bazy wiedzy pozwalającej na właściwą ocenę parametrów i cech polimerów przewidzianych do realizacji złącza podatnego bez konieczności wykonywania pracochłonnych i czasochłonnych badań doświadczalnych,
- przejrzyste i czytelne graficzne przedstawienie uzyskanych wyników,
- docelowa możliwość wykorzystania otrzymanych rezultatów badań i analiz jako podstawa do próby formułowania szczegółowych zaleceń w zakresie upowszechnienia zastosowania polimerów w realizacji złącza podatnego elementów betonowych.

## 5. Uwagi ogólne

Poniżej zamieszczono uwagi ogólne odnoszące się do opracowanej rozprawy doktorskiej.

- 5.1 Praca posiada nieprecyzyjnie określony cel. W ocenie Recenzenta ocena efektywności złączy podatnych realizowanych w elementach betonowych z zastosowaniem polimerów powinna być działaniem końcowym, na podstawie wielowątkowej analizy. W omawianej pracy celem jest zarówno ocena efektywności, rozumianej jako nośność, jak również przeprowadzenie analizy parametrycznej, rozumianej jako wpływ geometrii złącza, która właśnie decyduje o efektywności tego rozwiązania.
- 5.2 Badania doświadczalne ograniczone są do skali laboratoryjnej, brak jest wyników badań dla elementów konstrukcyjnych w skali naturalnej, w tym wyników badań polowych.
- 5.3 W przypadku badań modelowych studia parametryczne ograniczone zostały do badań w zakresie materiałowym. Brak jest analizy wpływu parametrów zmiennych samej metody na uzyskiwane wyniki- dotyczy to w szczególności metody optycznej *DIC-Digital Image Correlation (PIV-Particle Image Velocimetry)*-w pracy nie wskazano wpływu między innymi: kroku czasowego (ilości zdjęć) rozdzielczość obrazu, wielkości ogniskowej, prostopadłości pola obrazu do aparatu fotograficznego na wielkości uzyskiwanych wyników,



- 5.4 Badania w skali laboratoryjnej przeprowadzone zostały dla prostych schematów zniszczenia: czteropunktowego zginania oraz jednoosiowego rozciągania. Brak jest analizy, np. wstępnych rozważań, jak zachowywało by się złącze podatne w bardziej złożonym stanie obciążenia.
- 5.5 Badania modelowe przeprowadzone zostały jedynie dla elementów prostopadłościennych o prostej (niekomplikowanej) geometrii, brak jest informacji, np. badań pilotażowych odnoszących się do badań dla elementów o innej geometrii (zmiennym przekroju, zakrzywionych), co byłoby odniesieniem do rzeczywistych elementów konstrukcyjnych.
- 5.6 Ograniczenie badań laboratoryjnych w zakresie temperatury, wilgotności oraz promieniowania, a co za tym idzie brak wyników symulujących pracę elementu w tzw. trudnych warunkach eksploatacyjnych uniemożliwia pełną ocenę przydatności zaproponowanego rozwiązania. Kluczowym jest tutaj brak badań starzeniowych, (sztucznego starzenia które mogą okazać się jednymi z kluczowych przy aplikacji analizowanego rozwiązania w skali rzeczywistej (do rzeczywistych elementów konstrukcyjnych) ze względu na trwałość wykonanych prac naprawczych.
- 5.7 W pracy brak nawet pobieżnej analizy ekonomicznej proponowanego rozwiązania złącza podatnego w aspekcie *nośność złącza-koszt jego wykonania* w porównania do rozwiązań realizowanych (możliwych do wykonania) z zastosowaniem innego niż polimery materiału.
- 5.8 Wyjaśnienia i doprecyzowania wymaga nazewnictwo oraz opis właściwości zastosowanych do badań materiałów. Powszechnie wiadomo, że poliuretany używane są do uszczelniania elementów konstrukcyjnych-iniekcja poliuretanowa jest typową iniekcją uszczelniającą. Natomiast to wykonywania połączeń o charakterze sklejającym używane są epoksydy-iniekcja epoksydowa jest wykorzystywana w przypadku klejenia uszkodzonych (zarysowanych lub pękniętych) elementów konstrukcyjnych. W omawianej pracy Autor wskazuje, że polimery, na przykładzie polimerów o nazwach handlowych PT i PS są materiałami które mają za zadanie nie tyle uszczelnić połączenie, co je skleić-doprecyzowania wymaga określania pojęć uszczelnienie/ wypełnienie/sklejenie oraz różnicowanie nazw poliuretan/polimer.

## 6. Uwagi szczegółowe

Poniżej zamieszczono uwagi szczegółowe odnoszące się do opracowanej rozprawy doktorskiej

- 6.1. strona 3: brak wyjaśnienia co oznacza typ PT i PS.
- 6.2. strona 13: brak konsekwencji w nazewnictwie, stosowanie zamiennie określeń polimery (strona 3) i poliuretany (strona 13).
- 6.3. strona 15: szczegółowych wyjaśnień wymaga ograniczenie badań laboratoryjnych w zakresie analizy procesów starzenia złącza podatnego oraz brak badań związanych z obciążeniem cyklicznym skoro w dalszej części przywołane są jako przykłady zastosowania tego typu rozwiązania prace naprawcze nawierzchni drogowych.
- 6.4. strona 25: dlaczego w przeglądzie literatury bardzo szeroko omawiana jest zastosowanie żywicy epoksydowej, natomiast w sposób bardzo ograniczony przedstawione zostało zastosowanie żywicy poliuretanowej.



- 6.5. strona 38: w jakim celu omawiane są w tak szeroko właściwości mechaniczne betonu (od strony 38 do strony 56).
- 6.6. strona 39 i dalsze: zastosowane, w tym przywołane jako pochodzące z literatury wykresy są w różnej skali i wykonane różną techniką co wygląda niestarannie.
- 6.7. strona 40: część wykresów ma podpisy (opisy i wyjaśnienia) anglojęzyczne co wymagałoby jednak zmiany, gdyż praca jako całość napisana jest w języku polskim.
- 6.8. strona 55: w pracy brak jest przywołania najnowszych publikacji dotyczących modeli numerycznych z zastosowaniem rys rozmytych, między innymi prac których współautorem jest Prof. Jerzy Bobiński.
- 6.9. strona 64: brak jednoznacznego podsumowanie i wskazania, który zdaniem Autora polimer (o nazwach handlowych PT i PS) jest lepszy i dlaczego.
- 6.10. strona 38: w jakim celu omawiane są w tak szeroko modele materiałowe polimerów (od strony 66 do strony 71).
- 6.11. strona 75: badania właściwości polimerów PT i PS zostały już wcześniej przeprowadzone i przedstawione w literaturze naukowej. W jakim celu są więc tak szeroko omawiane w rozprawie doktorskiej (od strony 75 do strony 90). Czy w przywołanych badaniach jest jakiś wkład doktoranta?
- 6.12. strona 83: badania modelowe wykonane zostały dla elementów betonowych wysokiej klasy: C1 (C30/37) oraz C2 (C40/50). Czy przeprowadzono badania kontrolne (rozpoznawcze) dla elementów betonowych wykonanych z betonu niższych klas oraz czy zmniejszenie klasy betonu wpływa na zmianę charakteru pracy złącza podatnego?
- 6.13. strona 115: jak została przeprowadzona weryfikacja wyznaczanych wartości wprowadzonego pojęcia energia zniszczenia? Czy to określenie jest przewidziane do stosowania tylko dla złączy podatnych, czy też możliwe jest do stosowania w odniesieniu do innych elementów konstrukcyjnych?
- 6.14. strona 125 (strona 126, strona 128 oraz strona 152): rysunki odnoszące się do wyników doświadczeń z zastosowaniem metody DIC są nieczytelne z uwagi na następujące niedoskonałości: nie wiadomo co oznaczają wartości X, Y oraz XY na poszczególnych mapach odkształceń (nie jest to wytłumaczone tekście rozprawy doktorskiej), ponadto dla poszczególnych odkształceń skale wykresów są różne w różnych chwilach czasowych, co uniemożliwia bezpośrednie porównanie wyników w zakresie map odkształceń.
- 6.15. uwagi dotyczące metody DIC:
- w jakim sposób wykonano kalibrację programu opartego na metodzie optycznej?
  - skąd wiadomo, co w rzeczywistości jest mierzone (jakie wartości odkształceń)? Dlaczego nie wykonano dodatkowych pomiarów (obliczeń kontrolnych), np. przy pomocy programu autorstwa D.J.White, W.A.Take oraz M.D.Bolton?
  - z jaką częstotliwością wykonywano zdjęcia,
  - z jakiej odległości wykonywano zdjęcia,
  - jak został sprawdzony wpływ rozdzielczości na wielkość wyznaczonych odkształceń,





- dlaczego nie została przeprowadzona dyskusja błędów, np. bardzo ważny wpływ ewentualnego braku prostopadłości promienia do płaszczyzny próbki?
- 6.16. strona 169: dlaczego w ramach badań parametrycznych nie przeprowadzono badań dla poszerzonej warstwy polimeru, wyniki badań modelowych nie wskazują ścieżki wyboru optymalnej grubości warstwy materiału tworzącego złącze podatne.
  - 6.17. strona 175: w jaki sposób w analizie numerycznej uwzględniony został wpływ gęstości siatki elementów skończonych na uzyskane wyniki.
  - 6.18. strona 169: dlaczego większość obliczeń numerycznych przeprowadzona została dla polimeru typu PT?
  - 6.19. strona 197: wnioski sformułowane są w sposób nieczytelny i mało przejrzysty, mają charakter opisowy, a nie jednoznacznych i czytelnych sformułowań inżynierskich, ponadto w podsumowaniu występują powtórzenia z początkowej części pracy w zakresie celu i zakresu.
  - 6.20. strona 203: we wnioskach bardzo ograniczone są spostrzeżenia końcowe dotyczące polimeru typu PS.

## 7. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autora. Pomimo sformułowanych i przedstawionych powyżej uwag krytycznych oraz wątpliwości należy stwierdzić, że Autor opiniowanej rozprawy doktorskiej przeprowadził badania, zarówno doświadczalne, jak i teoretyczne, na odpowiednim poziomie merytorycznym. Ponadto przyjęty program badań oraz uzyskane wyniki wskazują, że Autor posiada potencjał naukowy który należy rozwijać. W mojej ocenie Autor rozprawy wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w przedmiotowym zakresie oraz umiejętnością planowania i prowadzenia badań teoretycznych i doświadczalnych. Uzyskane wyniki pracy świadczą o jego dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Łukasza Zdanowicza do publicznej obrony.

  
 dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz  
 prof. Politechniki Gdańskiej