

dr hab. inż. Mikołaj Miśkiewicz, prof. PG
Katedra Wytrzymałości Materiałów
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Gdańsk, 29.11.2023 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. **Jakuba Krzakały**
pt. „**Wyznaczanie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych**
konstrukcji mostowych”

1. Podstawa i przedmiot recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo RDILGT.512.2.2023 z dnia 10.10.2023 r. otrzymane od Pana dr. hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. PŚ, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej, z prośbą o opracowanie recenzji.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Jakuba Krzakały pt. „Wyznaczanie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych konstrukcji mostowych”, złożona na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Śląskiej. Promotorem w przewodzie jest Pan prof. dr hab. inż. Marek Salamak., a promotorem pomocniczym Pan dr inż. Piotr Łaziński. Doktorant reprezentuje dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport.

2. Omówienie pracy

Opiniowana dysertacja ma formę monograficzną i składa się z 206 numerowanych stron oraz 6 stron nienumerowanych, na których przedstawiono stronę tytułową oraz spis treści. Praca w głównej części zawiera 94 rysunki, w tym wykresy i zdjęcia, 57 zestawień tabelarycznych i 38 numerowanych wzorów oraz 212 pozycji bibliograficznych, które podzielono na literaturę naukową (149), normatywy i akty prawne (38), dokumentację projektową i bazy danych (14) oraz źródła internetowe (11). Praca składa się z 7 numerowanych rozdziałów: 1. Wstęp; 2. Odkształcalność betonu; 3. Obiekty mostowe poddane analizie; 4. Moduł sprężystości w analizach statyczno-wytrzymałościowych; 5. Badania laboratoryjne i in situ; 6. Dyskusja wyników badań; 7. Zakończenie; oraz załączników: A. Szczegółowe wyniki badań laboratoryjnych; B. Metoda bezpośrednia badania modułu sprężystości betonu; C. Procedura wyznaczania odkształcalności betonu. Pracę poprzedzają spis treści i zestawienie oznaczeń, definicji i skrótów, a zamykają streszczenia w języku polskim i angielskim. Dysertacja napisana jest w języku polskim, datowana jest na rok 2023.

Przedstawiona do recenzji praca koncentruje się na wyjaśnieniu przyczyn rozbieżności pomiędzy teoretycznym i rzeczywistym zachowaniem obiektów mostowych z betonu sprężonego, które można zauważyć podczas ich budowy. Rozbieżności te uniemożliwiają wiarygodną ocenę sztywności konstrukcji i tym samym poprawne przewidywanie ostatecznej geometrii obiektu. Zgodnie z przedstawionymi w pracy wynikami przyczyną rozbieżności jest sposób określania modułu sprężystości betonu. Autor na podstawie studiów literatury, badań

własnych i we współpracy z przemysłem stwierdził, że jedynym sposobem uzyskania wiarygodnej wartości modułu sprężystości betonu są badania laboratoryjne, w których zostaną uwzględnione rzeczywiste warunki dojrzewania betonu w konstrukcji. W celu weryfikacji tego stwierdzenia zaproponowano autorski sposób pielęgnacji próbek, bazujący na systemie monitorowania betonu podczas wiązania w konstrukcji. Uzyskane wyniki potwierdziły, że istnieje wyraźny wpływ przyjętej w symulacjach obliczeniowych odkształcalności betonu na wyniki badań obiektów mostowych. Ostatecznie zaproponowano procedury oceny rzeczywistej odkształcalności betonu i wykorzystania wyników w procesie projektowania i budowy sprężonych obiektów mostowych.

3. Omówienie zakresu rozdziałów

Rozdział 1. pt. „Wstęp”.

Rozdział ten skupia się na przedstawieniu roli betonu sprężonego w budownictwie infrastrukturalnym, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji mostowych. Beton sprężony jest przedstawiony jako materiał preferowany ze względu na swoją ekonomiczność, trwałość i możliwość tworzenia przęseł większych rozpiętości. Autor podkreśla znaczący wzrost liczby mostów z betonu sprężonego w Polsce, zwłaszcza w kontekście rozwijającej się sieci dróg ekspresowych i autostrad. Rozdział porusza również wyzwania związane z projektowaniem i budową mostów z betonu sprężonego, w tym problemy z określeniem rzeczywistej sztywności konstrukcji i wyznaczaniem podniesień wykonawczych. Zwraca uwagę na zmieniające się warunki w przemyśle cementowym i betonowym, które wpływają na właściwości mechaniczne betonu, a tym samym na konstrukcje mostowe. Autor wspomina o współpracy z firmami STRABAG i TPA, które przyczyniły się do wykonania badań przedstawionych w rozprawie. Głównym celem pracy określono wyjaśnienie rozbieżności między obliczeniami numerycznymi, a rzeczywistą odpowiedzią konstrukcji mostowych z betonu sprężonego, co ma prowadzić do lepszego przewidywania ostatecznej geometrii i sztywności tych konstrukcji.

Rozdział 2. pt. „Odkształcalność betonu”.

Rozdział stanowi najbardziej rozbudowaną część pracy i zajmuje około połowę właściwego tekstu. Skoncentrowano się tu na odkształcalności betonu i modułach sprężystości, które są kluczowe w kontekście konstrukcji sprężonych. Autor przedstawia przegląd literatury, rozważa różne czynniki wpływające na odkształcalność betonu (materiałowe – kruszywo i cement, technologiczne – warunki wiązania i twardnienia oraz wbudowania mieszanki), właściwości stwardniałego betonu, a także metody szacowania wartości modułu sprężystości. Podkreśla trudności w dokładnym określeniu modułu sprężystości na etapie projektowania i budowy, wskazując na potrzebę wykonywania badań laboratoryjnych i uwzględnienia warunków dojrzewania betonu. Jako decydujące czynniki, które mają wpływ na odkształcalność betonu, poza jego składem, wskazuje na gabaryty konstrukcji i warunki betonowania. Ostatecznie na podstawie przytoczonych wyników badań 104 obiektów mostowych pod próbnym obciążeniem stwierdza, że jedynym wiarygodnym sposobem oceny odkształcalności betonu jest przeprowadzanie badań laboratoryjnych z uwzględnieniem technologii i warunków betonowania. Zwraca również uwagę na zmiany w przemyśle betonowym związane z redukcją śladu węglowego i stosowaniem nanocząsteczek.

Rozdział 3. pt. „Obiekty mostowe poddane analizie”.

Ta część pracy poświęcona jest przedstawieniu 7 obiektów mostowych, które zostały poddane analizom – MG-1, WG-4, MD-1, MD-18, M-1, WS-36, M2. Obiekty te posiadają różne

schematy statyczne, wykonywane były w różnych technologiach i w różnych warunkach atmosferycznych. Dla każdego z nich przedstawiono podstawowe dane geometryczne i materiałowe, a dla wybranych dodatkowo również składy zastosowanych mieszanek.

Rozdział 4. pt. „Moduł sprężystości w analizach statyczno-wytrzymałościowych”

Rozdział dotyczy prezentacji wyników analiz numerycznych 5 konstrukcji mostowych (MG-1, WG-4, MD-1, WS-36, M2), biorąc pod uwagę różne technologie budowy (na rusztowaniach stacjonarnych w różnych konfiguracjach, nasuwania podłużnego, betonowania nawisowego) oraz wartości modułu sprężystości i ciężaru własnego betonu. Analizy skupiają się na etapie budowy, pomijając fazy użytkowania i obciążenia zmienne. Obliczenia zostały przeprowadzone przy założeniu normowych wartości właściwości betonu klasy C40/50 (beton BN) oraz ze skrajnymi wartościami, jakie uzyskano we własnych badaniach laboratoryjnych. Wykorzystano różne rodzaje betonu, w tym beton z kruszywem bazaltowym (B1), wapiennym i dolomitowym (B2), granitowym (B3), a także porowatym bazaltem (B4). Obliczenia wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) przy użyciu programu Midas CIVIL 2022. Prezentowane są wyniki obliczeń w zakresie przemieszczeń i naprężeń w analizowanych konstrukcjach z uwzględnieniem różnych technologii budowy i metod definiowania modułu sprężystości betonu. Uwzględniono dwa przypadki. W pierwszym z nich przyjmowano, że moduł sprężystości jest stały podczas wykonywania konstrukcji. W drugim zastosowano znane powszechnie zależności zmiany wartości modułu od wieku betonu.

Rozdział 5. pt. „Badania laboratoryjne i in situ”.

Rozdział ten skupia się na prezentacji metodyki badania właściwości betonu w warunkach zbliżonych do tych, które panują na placu budowy, co różni się od standardowych warunków laboratoryjnych. Autor stosuje system odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji, który pozwala na pielęgnowanie próbek w warunkach imitujących rzeczywiste środowisko budowy. System ten wykorzystuje czujniki temperatury, rejestrator, serwer i piec laboratoryjny do monitorowania i regulowania warunków dojrzewania betonu. W rozdziale zadeklarowano wyniki badań laboratoryjnych betonu obiektów MG-1, WG-4, M1, MD-1. Autor szczegółowo opisuje proces przygotowania próbek, ich formowania, pielęgnacji oraz badania. W celu określenia modułu sprężystości betonu zastosowano różne metody badawcze, w tym metody A i B według normy PN-EN 12390-13 oraz metodę bezpośrednią wykorzystaną przez Autora jako dodatkową w stosunku do wymagań systemu norm PN-EN. W rozdziale wykonano obliczenia obiektów MG-1, WG-4, MD-1 podczas ich budowy oraz MG-1, WG-4, MD-1 i MD-18 podczas próbnego obciążenia statycznego. W obydwu przypadkach wyniki obliczeń przemieszczeń porównano z wynikami badań in-situ. We wszystkich analizowanych przypadkach na potrzeby wyznaczenia wartości ugięć teoretycznych uwzględniono wartość modułu sprężystości betonu zgodnie z normą, na którą zaprojektowano obiekty.

Rozdział 6. pt. „Dyskusja wyników badań”.

W rozdziale tym, najistotniejszym z punktu widzenia całej rozprawy, porównano ze sobą stosunki ugięć z pomiarów konstrukcji w czasie budowy (WG-4, MD-1) oraz pod próbnym obciążeniem statycznym (MG-1, WG-4, MD-1, MD-18) z wynikami wyznaczonymi na drodze symulacji obliczeniowych z uwzględnieniem wartości normowego i pomierzonego w warunkach normowych i odwzorowanych modułu sprężystości. Autor porusza tu kwestie związane z odkształcalnością betonu, wpływem warunków pielęgnacji próbek, a także różnicami między warunkami laboratoryjnymi a rzeczywistymi warunkami na placu budowy.

Proponuje również wykonanie analizy konstrukcji sprężonej w dwóch etapach w zależności od wieku betonu z uwzględnieniem początkowego i ustabilizowanego modułu sprężystości. Dyskusja wyników umożliwiła opracowanie procedury wyznaczania wiarygodnej wartości modułu sprężystości betonu, która może być stosowana w procesie projektowania i budowy kablobetonowych obiektów mostowych. Co istotne, zgodnie z podanymi informacjami, opracowana procedura jest/była aktualnie stosowana podczas budowy estakady ES 2/3 w ciągu S19.

Rozdział 7. pt. „, Zakończenie”,

Rozdział przedstawia podsumowanie i wnioski z rozprawy dotyczącej analizy odkształcalności betonu w konstrukcjach mostowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu warunków dojrzewania betonu na jego właściwości mechaniczne. Ponadto wskazano kierunki dalszych prac. W rozdziale podkreślono praktyczne znaczenie badań, wskazując na konieczność ich zastosowania w rzeczywistych projektach budowlanych. Jest to istotne, ponieważ łączy teoretyczne aspekty badań z ich praktycznym zastosowaniem w inżynierii.

4. Komentarz

Na wstępie należy zaznaczyć, że podjęty temat jest niezwykle istotny i aktualny oraz zdecydowanie należy docenić fakt pewnego usystematyzowania aktualnej wiedzy w zakresie badania modułu sprężystości zarówno w ujęciu normowym jak i z uwzględnieniem rzeczywistych warunków wiązania betonu. Osiągnięciami rozprawy są wskazanie najbardziej wiarygodnej metody wyznaczania modułu sprężystości oraz zaprojektowanie, wykonanie i wdrożenie systemu odwzorowania warunków dojrzewania betonu na potrzeby wyznaczania jego właściwości. Praca ma znakomite własności aplikacyjne, a uzyskane podczas jej realizacji doświadczenia i wyniki mogą

Dysertacja napisana jest językiem poprawnym. Niestety jej lektura nie można zakwalifikować do najłatwiejszych. Wstęp nie zawiera informacji co jest głównym celem pracy, a postawiona teza mogłaby zostać lepiej sformułowana. Poszczególne rozdziały stanowią niezależne części i pomimo tego, że ostatecznie wszystkie je można uznać za istotne dla wyciągnięcia wniosków, ciężko jednoznacznie wskazać w nich ciąg przyczynowo skutkowy. Praca ma raczej formę raportu lub kilku oddzielnych raportów niż spójnej monografii, a czytelnik musi się domyślać intencji Autora. Prezentowanie wyników obliczeń „na raty” w rozdziałach 4, 5 i 6, kiedy można by je wszystkie zestawić razem, zdecydowanie nie ułatwiają lektury. Dodatkowym utrudnieniem jest również umieszczenie istotnych wyników wyłącznie w załącznikach.

Zdecydowaną zaletą pracy jest fakt, że doktorant zaaplikował zdobyta wiedzę z zakresu mikro (materiał) do rozważań w skali makro (konstrukcja). Ponadto wykonywał badania różnymi metodami i ostatecznie podjął udaną próbę opracowania procedury wyznaczania odkształcalności betonu. Co również istotne miał możliwość bliskiej współpracy na etapie realizowania rozprawy z przemysłem.

W celu oceny wpływu modułu sprężystości na zachowanie obiektu wykonano obliczenia reprezentatywnych obiektów kablobetonowych. Wybór konstrukcji, technologii i betonów o różnych właściwościach do analizy jest dobrze uzasadniony i pokazuje różnorodność warunków, które mogą wystąpić w rzeczywistych projektach. Jednakże w pracy brak jest podstawowych informacji dot. wykonywanych symulacji. Nie przedstawiono schematów statycznych, schematów obciążeń, warunków brzegowych, itd.

Cennym elementem pracy są wykonywane badania betonu w trakcie wiązania. Jednakże z uwagi na zbyt ubogi opis ciężko jest jednoznacznie ocenić ich jakość. Dla każdego z obiektów, dla których wykonywano pomiary temperatury wewnątrz konstrukcji winien być przedstawiony rysunek z prezentacją lokalizacji punktu pomiaru temperatury. Co więcej z uwagi na niejednorodny rozkład pola temperatur wewnątrz badanej struktury niezwykle cennym byłoby wykonanie symulacji rozkładu pola temperatur w celu poprawnego zlokalizowania czujników pomiarowych (patrz np. publikacje dr inż. Aleksandry Kurałowicz-Cudowskiej). Tych czujników winno być kilka, a w załączniku A prezentowany jest tylko jeden pomiar temperatury, zakładam, że z wnętrza konstrukcji, gdzie warunki są zbliżone do adyabatycznych.

Co niezwykle istotne Autor zdaje sobie sprawę, że zrealizowane prace stanowią jedynie początek rozważań i słusznie wskazuje na potrzebę dalszych badań, szczególnie w kontekście różnych rodzajów kruszyw i cementów, sprzętu pomiarowego jak również w zakresie wprowadzenia opracowanych procedur do porządku normowego i prawnego. To pokazuje, że jest on świadomy ograniczeń swojej pracy i jest otwarty na dalsze badania w tej dziedzinie. Jest to szczególnie istotne, żeby badania kontynuować, ponieważ przedstawione wyniki i wnioski mają duże znaczenie dla branży budowlanej, szczególnie w kontekście projektowania i budowy obiektów mostowych. Uwzględnienie znaczenia warunków dojrzewania betonu dla właściwości mechanicznych konstrukcji jest coraz lepiej rozpoznane.

W kontekście recenzowanej pracy zwrócić należy uwagę, że Autor nie wspomniał w pracy o metodzie dojrzałości (*maturity method*) służącej do szacowania rzeczywistej wytrzymałości betonu w konstrukcji. Aktualnie norma PN-EN 13670 zaleca, by ocena rozwoju wytrzymałości oparta była na właściwej funkcji dojrzałości. Istniejące techniki pomiarowe i badawcze pozwalają na śledzenie zmian temperatury betonu w konstrukcji oraz transfer uzyskanych danych, co Autor wykazał w swojej rozprawie. Sugeruje się podjęcie próby opisu zmian modułu sprężystości betonu wraz z wskaźnikiem dojrzałości wyrażonym w formie wieku równoważnego. Warto przeprowadzić serię takich badań i porównać wartości modułów z wartościami uzyskanymi na próbkach pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych.

5. Uwagi szczegółowe

1. Str. 1. dysertacji to Stosowane oznaczenia i skróty. 6 początkowych stron, tj. strona tytułowa, spis treści i strony puste są wyłączone z numeracji. Dlaczego? W recenzji odnoszę się do numeracji stron podanych w dysertacji.
2. Str. 2.:
 - a. Metoda Elementów Skończonych to w skrócie MES, więc w definicji Analiz numerycznych MES powinno być w nawiasie.
 - b. W def. cyfrowy bliźniak dwukrotne powtórzenie „zachodzących”.
 - c. Zgodnie z podaną definicją „Beton zwykły – beton o wytrzymałości charakterystycznej do 60 MPa (do klasy C60/75 włącznie)” Tymczasem zgodnie z PN-EN 206+A2:2021-08 beton zwykły to beton o gęstości w stanie suchym większej niż 2 000 kg/m³, ale nie przekraczającej 2 600 kg/m³.
 - d. Zgodnie z podaną definicją „Beton wysokiej wytrzymałości – beton o wytrzymałości charakterystycznej od 60 do 100 MPa.”. Tymczasem beton o wysokiej wytrzymałości jest to beton o klasie wytrzymałości na ściskanie wyższej niż C50/60 (w przypadku betonów zwykłych i ciężkich) lub LC50/55 (w przypadku betonów lekkich). Oznacza to, że min. wytrzymałość charakterystyczna badana na próbkach walcowych wynosi 50 MPa, a na próbkach sześciennych 60 MPa.

3. Str. 4.

- a. Autor napisał „Przedmiotem rozprawy są analizy prowadzące...” Stwierdzenie to wydaje się być błędne, ponieważ przedmiotem rozprawy nie są analizy same w sobie, a wyjaśnienie rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów dla obiektów mostowych z betonu sprężonego.
- b. Autor w sposób jednoznaczny wskazuje, że zachowanie konstrukcji wykonanej z betonu sprężonego jest podczas budowy determinowane wyłącznie składem betonu. Co z wpływem pozostałych czynników, takich jak oddziaływania atmosferyczne, obciążenia technologiczne i inne?
- c. W przedstawionej tezie pracy występują pomyłki:
 - i. Nie ma metody MES, jest Metoda Elementów Skończonych, która jest metodą numeryczną.
 - ii. Beton to model konstytutywny, który jest formułowany niezależnie od MES.
 - iii. Należy zaznaczyć, że model obliczeniowy może być prawidłowy, tylko podstawiono do niego złe parametry.
- d. Teza pracy zawiera znaczne ograniczenie dotyczące przyczyn niedoskonałości modelu obliczeniowego w stosunku do rzeczywistej konstrukcji wyłącznie do cech betonu. W opinii recenzenta jest to zbyt daleko idące stwierdzenie. Należy pamiętać, że rzeczywisty obiekt jako ciało materialne ma nieskończenie wiele stopni swobody (jest mocy kontinuum), a tworząc model numeryczny ograniczamy je do pewnej skończonej liczby (co jest immamentną cechą numerycznych metod aproksymacyjnych). Oczywiście istnieją algorytmy czy sposoby postępowania, żeby odwzorowanie było jak najdokładniejsze, jednak nigdy nie odzwierciedli się przedmiotowej konstrukcji w pełni. Stwierdzenie, że o jakości odzwierciedlenia głównie będą decydowały cechy betonu jest z założenia nieprawidłowe. Taki sam jak nie większy wpływ na otrzymane wyniki symulacji będą miały np. zastosowane warunki brzegowe czy uwzględnienie oddziaływań pozastatycznych. Nie jest warunkiem wystarczającym „prawidłowości modelu obliczeniowego” uwzględnienie tylko cech betonu wbudowanego w konstrukcji. Niewłaściwe jest również sformułowanie tezy, która zgodnie z definicją powinna być twierdzeniem, które w ramach pracy należy udowodnić. Po zapoznaniu się z pracą w mojej opinii teza powinna brzmieć: Bliższe rzeczywistemu odzwierciedlenie teoretycznego zachowania betonowej konstrukcji sprężonej podczas symulacji obliczeniowych jest możliwe po uwzględnieniu jak najbliższych rzeczywistości parametrów betonu wykorzystanego do jej wykonania.
- e. Autor nie zdefiniował głównego celu pracy, a w detalach rozpisuje się nad celami „pozostałymi”. Zabrakło stwierdzenia, że głównym celem pracy było opracowanie metodyki wyznaczania modułu sprężystości w warunkach odwzorowanych na potrzeby wykonania obliczeń numerycznych w celu prawidłowego odzwierciedlenia zachowania konstrukcji w trakcie próbnego obciążenia oraz montażu.

4. str. 8. Rysunek 3 jest nieczytelny. Brakuje legendy.

5. str. 13. Rysunek 8 jest nieczytelny. Brakuje legendy dotyczącej rodzaju zastosowanego kruszywa.

6. str. 26. Tabela 4-10, 46. Powinno być średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,cyl}(S)$.

7. str. 49 – 51. Zestawienie wyników badań pod próbnym obciążeniem jest istotne z punktu widzenia prowadzonych badań. Tym niemniej sposób opisu wyników mógłby być dokładniejszy. Nie wiadomo jaki stosunek ugięć zaprezentował autor – maksymalnych, średnich? Dla jakich schematów obciążenia – przestawowych?
8. Tabela 25; Rys. 31-34. Błędne tytuły. Zarówno w tabeli, jaki i na wykresach nie przedstawiono wyników próbnego obciążenia.
9. str. 52. Na rysunku 32 zgodnie z deklaracją Autora zaprezentowano „wyniki pod próbnym obciążeniem.” Tymczasem wydaje się, że prawidłowym określeniem byłoby stwierdzenie, że na wykresie podano stosunek zarejestrowanych wartości maksymalnych/średnich przemieszczeń pomierzonych do wyników obliczeń konstrukcji z uwzględnieniem uśrednionej wartości modułu sprężystości betonu wyznaczonej na podstawie PN-EN 1992.
10. Tabela 26 i 27. Autor w tekście opisuje, że tabele prezentują porównanie wyników deformacji bliźniaczych konstrukcji. Jednakże w tabeli 26 prezentowane są wyniki dla schematów S3, S6, S7, a w tabeli 27 S1, S2, S3. Brak prezentacji schematów na rysunkach. Brak informacji o warunkach atmosferycznych podczas wykonywania badań.
11. Str. 72. Niezwykle ubogi opis wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji MES modeli obliczeniowych. Wizualizacje tylko fragmentów konstrukcji. Brak schematów statycznych modelowanych konstrukcji. Brak danych dot. zastosowanych warunków brzegowych. Brak danych dot. analizowanych faz budowy obiektów. Brak danych statystycznych dotyczących wykonanych modeli MES. W jakim zakresie były przeprowadzane analizy? Co z uwzględnieniem skurczu? Co z wpływem warunków atmosferycznych?
12. Str. 74-78. Brak komentarzy przedstawionych wyników.
13. Str. 79.
 - a. Niewątpliwą zaletą tej części pracy są zestawienia, które znakomicie obrazują wpływy analizowanych parametrów. Zobrazowanie byłoby jeszcze czytelniejsze gdyby zostało przedstawione w sposób graficzny. Korzystne podczas prezentacji wniosków z tego rozdziału byłoby bardziej szczegółowe omówienie, jak różnice w modułach sprężystości wpływają na zachowanie konstrukcji. Dlaczego w rozdziale 3 prezentowano 7 obiektów, które mają zostać poddane analizie, a w rozdziale 4 prezentuje się wyniki obliczeń tylko dla 5 konstrukcji?
 - b. Wnioski z przeprowadzonych obliczeń można uznać za oczywiste. Ciężar własny ustroju będzie miał decydujące znaczenie w kontekście stanu wyężenia analizowanych typów konstrukcji, a moduł sprężystości będzie decydował o sztywności ustroju.
14. str. 81
 - a. Schemat przedstawiony na Rys. 72 jest mało czytelny. Nie podano żadnych informacji dotyczących budowy systemu. Czy zastosowano w badaniach własny czy komercyjny system rejestrujący temperaturę betonu? Jaki rodzaj czujników zastosowano (specyfikacja, dokładność pomiarowa, zakres pracy czujnika)? Jaką liczbę czujników umieszczano w blokach testowych? Jak wyglądało rozmieszczenie czujników w dźwigarach? Brakuje graficznej prezentacji rozmieszczenia czujników.

- b. Warunki odwzorowane zapewniał piec laboratoryjny, w którym próbki mogły być podgrzewane. A co w przypadku betonowania zimowego kiedy temperatura początkowa mieszanki wynosi np. 10°C, a w laboratorium panuje temperatura 20°C? Mieszanka betonowa (wbudowana w konstrukcje) o niskiej temp. początkowej przy niskich temperaturach otoczenia (0-5°C) może nagrzać się do temp. 20°C dopiero po 24 godzinach.
 - c. Zastanawiająca jest także mobilność zaproponowanego zestawu pomiarowego. Jak wyglądało wykonanie testów? Czy piec laboratoryjny był mobilny?
15. str. 82, Załącznik A.
- a. Dla każdego z obiektów, dla których wykonywano pomiary temperatury wewnątrz konstrukcji winien być przedstawiony rysunek z prezentacją lokalizacji punktu pomiaru temperatury. Dlaczego pomiar wykonywano wyłącznie w jednym punkcie, prawdopodobnie w warunkach adiabatycznych. Na jakiej podstawie dobrano jego lokalizację? Co z betonem w warstwach przypowierzchniowych, gdzie temp. może być nawet 20°C niższa niż we wnętrzu konstrukcji?
 - b. Brak rysunku prezentującego geometrię bloku testowego oraz ustrojów nośnych poddanych badaniom.
16. str. 84. W pkt. 5.3.2.2 Autor pisze „Pomiar temperatury betonu w konstrukcji oraz pielęgnacja próbek w piecu kończyły się w momencie wyrównania się temperatury konstrukcji z temperaturą otoczenia, co zazwyczaj miało miejsce po kilku lub kilkunastu dniach”. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób pielęgnowano próbki z warunków odwzorowywanych po tym czasie tj. np. między 10 a 28 dniem?
17. str. 86. Uwzględnienie przez autora metody bezpośredniej pomiaru modułu sprężystości stanowi ciekawy element pracy i dlatego metoda ta powinna być przedstawiona w treści głównej rozprawy, a nie w załączniku B.
18. str. 87. Rys. 84. Brak oznaczeń punktów czasowych.
19. str. 79. Z jakiego powodu nie odzwierciedlono na drodze symulacji numerycznych w rozdziale 4 również obiektów M-1 oraz WS-36, skoro w rozdziale 3 opisano te konstrukcje?
20. str. 88. Niewątpliwym niedopatrzeniem autora jest prezentacja wszystkich wyników przeprowadzonych badań wyłącznie w załączniku A. Najistotniejsze wyniki, chociażby w formie graficznej, powinny zostać przedstawione w głównym tekście rozprawy.
21. str. 89.
- a. W rozdziale zadeklarowano prezentację wyników badań laboratoryjnych betonu 4 obiektów MG-1, WG-4, M1, MD-1, ale ostatecznie ograniczono tę liczbę z uwzględnieniem próbek rdzeniowych tylko do 2, tj. MG-1 oraz WG-4. Proszę o wyjaśnienie przyczyny takiego postępowania.
 - b. Wniosek o braku wpływu metod przechowywania próbek na uzyskane wyniki badań modułu sprężystości betonu jest zgodny z wynikami przedstawionymi w literaturze przedmiotu, jednakże dotyczy wyłącznie badań wykonanych po 28 dniach dojrzewania próbek. Zaznaczyć jednak należy, że z uwagi na procesy technologiczne podczas budowy obiektu szczególnie istotna jest poprawna identyfikacja parametrów materiału w początkowym okresie dojrzewania. Dotychczasowe publikacje w tym zakresie, m.in. dr inż. Aleksandry Kurałowicz-Cudowskiej wskazują, iż w celu prawidłowej oceny charakterystyk betonu

- podczas wiązania w pierwszym okresie dojrzewania, wymagana jest pielęgnacja próbek. Dlaczego tu dyskutuje się wyłącznie wyniki po 28 dniach?
- c. Niezrozumiałe zdanie: „Co ciekawe, w przypadku betonu z kruszywem granitowym, o niskim module różnica jest większa niż w przypadku betonu z kruszywem dolomitowym i bazaltowym, o wysokim module sprężystości.”
22. str. 88. Autor pisze: „Wartość wytrzymałości uzyskiwana w trakcie ostatniego badania była o kilkadziesiąt procent (nawet do 80%) wyższa niż wartość początkowa. Wzrost modułu nie był aż tak duży, ale dalej znaczący i również wynosił kilkadziesiąt procent (do 30%).” O jakim badaniu mowa? Co to znaczy ostatniego badania? Jaki rodzaj cementu był zastosowany?
23. str. 91 Tytuł rozdziału jest mylący. Powinien on brzmieć: Porównanie wyników przemieszczeń konstrukcji podczas budowy z wynikami symulacji MES.
24. str. 91 i kolejne w rozdziale 5.5 oraz 5.6. Autor wykonał obliczenia zachowania konstrukcji podczas montażu obiektów MG-1, WG-4, MD-1 oraz podczas realizacji próbnego obciążenia MG-1, WG-4, MD-1 i MD-18. Niezrozumiałym jest jednak fakt dlaczego już w tym miejscu Autor do wykonanych obliczeń nie zastosował pomierzonych wartości modułu sprężystości do betonu, a jedynie analizy ograniczył do wartości modułu podanego w normach do projektowania konstrukcji.
25. str. 98, 99. Po co badania z oraz bez wyposażenia. Oczywiście jest, że uwzględnienie tego elementu wyposażenia w modelu MES obiektu nie będzie w sposób znaczący wpływało na przyrost deformacji spowodowany obciążeniem próbnym.
26. str. 103. Błędne stwierdzenie „zestawiono ze sobą wyniki badań laboratoryjnych z wynikami pomiarów ugięć konstrukcji w czasie budowy oraz pod próbnym obciążeniem statycznym”. Powinno być: W rozdziale dla analizowanych konstrukcji porównano ze sobą wyniki symulacji obliczeniowych z uwzględnieniem rzeczywistego modułu sprężystości z wynikami pomiarów ugięć konstrukcji w czasie budowy oraz pod próbnym obciążeniem statycznym.
27. str. 104. Tabela 56. Błędny tytuł tabeli. Prezentuje ona stosunek ugięć pomierzonych na placu budowy do wartości teoretycznych z uwzględnieniem w modelu numerycznym wartości normowego i pomierzonego w warunkach normowych oraz odwzorowanych modułu sprężystości.
28. str. 105.
- Tabela 57. Błędny tytuł tabeli. Wyjaśnienie jw.
 - Dlaczego w rozdziale 3 prezentowano 7 obiektów, które mają zostać poddane analizie, a w rozdziale 6 prezentuje się wyniki obliczeń tylko dla 2 konstrukcji na etapie budowy (WG-4, MD-1) oraz 4 konstrukcji podczas próbnego obciążenia (MG-1, WG-4, MD-1, MD-18).
29. str. 106. Niezrozumiałym jest umieszczenie meritum rozdziału w załączniku C.
30. str. 111. Sugeruję w jednym zdaniu deklorować, że „Jedynym sposobem wiarygodnego wyznaczenia modułu sprężystości betonu są badania laboratoryjne wykonywane w warunkach odwzorowanych.”
31. str. 125. Wyniki przedstawionych badań powinny zostać usystematyzowane i ujednoczone. Aktualnie dla różnych obiektów prezentowane są wyniki badań uzyskane podczas realizacji różnych procedur badawczych.
- Na Rys A1.2., Tab. A1.2. i Rys. A1.3. niespójna legenda reprezentująca warunki odwzorowane i normowe. Analogiczny błąd pojawia się w kolejnych załącznikach. Czy zatem poprawna jest prezentacja tabelaryczna czy graficzna? Wprowadza to czytelnika w błąd.

- b. Rys. A1.4 – proszę doprecyzować co to za wykresy. Z badania którą metodą? Ponadto Autor nie zamieścił w pracy wykresów z badania modułów pod obciążeniem cyklicznym.
- c. Nie ma spójności co do liczby badanych próbek, terminów badań i metod badawczych. Jest to dość chaotyczne. Proszę o uzasadnienie co było przyczyną braku spójności w prowadzonych badaniach.
- d. Brakuje danych statycznych - odchylenie standardowe i współczynnik zmienności, zarówno dla wytrzymałości jak i modułu sprężystości.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr. inż. Jakuba Krząkały pt.: „Wyznaczanie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych konstrukcji mostowych” spełnia wymagania ustawy "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm. Ponadto konstatuje, że Doktorant zrealizował problematykę badawczą nakreśloną w celu rozprawy oraz wskazał jej zasadność. Przyjęte w pracy metody badań są właściwe i potwierdzone odpowiednią analizą. Co istotne praca posiada duże znaczenie praktyczne.

Mając powyższe na uwadze, wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pana mgr. inż. Jakuba Krząkały do jej publicznej obrony.

