

inż

Dr hab. inż. Lucyna Domagała, prof. P<sup>r</sup>  
Katedra Inżynierii Materiałów Budowl.  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechnika Krakowska

Kraków, 21.11.2021 r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Jakuba Krzakały**

**„Wyznaczenie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych konstrukcji mostowych”**

### 1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Dyscypliny *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* Politechniki Śląskiej z dnia 21 września 2023 r. oraz zlecenie Przewodniczącego Rady, Pana dr. hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ (pismo z dnia 10 października 2023 r.).

### 2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PRACY

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Krzakały, dotycząca zagadnienia możliwości oznaczenia miarodajnej wartości modułu sprężystości betonu wbudowanego w konstrukcje sprężone obiektów mostowych z uwzględnieniem rzeczywistych warunków dojrzewania materiału. Praca została wykonana na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej pod kierunkiem promotora: Pana prof. dr. hab. inż. Marka Salamaka oraz promotora pomocniczego: Pana dr. inż. Piotra Łazińskiego.

Rozprawa doktorska ma charakter pracy studialno-badawczej, opracowanej w formie książki na 206 stronach druku. Obejmuje: wykaz stosowanych oznaczeń, definicji i skrótów, 7 głównych rozdziałów, bibliografię, 3 główne załączniki oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Spis literatury, łącznie obejmujący 212 pozycji, zawiera wykaz: 149 publikacji naukowych, 38 norm i wytycznych, 14 dokumentacji projektowych i baz danych oraz 11 stron internetowych. W pracy zamieszczono 177 rysunków oraz 106 tablic.

Moduł sprężystości betonu jest jedną z najistotniejszych charakterystyk materiałowych uwzględnianych przy projektowaniu konstrukcji betonowych. Przyjęcie jego miarodajnej wartości do obliczeń ma zasadniczy wpływ na prognozowane zachowanie się konstrukcji podczas jej realizacji oraz eksploatacji. W szczególności sprężone konstrukcje mostowe, z uwagi na swoją specyfikę i duże rozpiętości w porównaniu z innymi obiektami budowlanymi, wykazują znaczną wrażliwość na wpływ modułu sprężystości betonu na wartość generowanych przemieszczeń i naprężeń. Tymczasem na etapie projektowania tego typu konstrukcji rzadko

kiedy udaje się przyjąć wartości modułu, które zbliżone są do tych odpowiadających rzeczywistemu materiałowi wbudowanemu w obiekt. Na taki stan rzeczy wpływ mają przede wszystkim różne warunki termiczne i wilgotnościowe dojrzewania betonu na budowie w stosunku do normowych warunków laboratoryjnych przechowywania próbek do badań, jak również niemożność w większości przypadków uwzględnienia na etapie projektowania konstrukcji wpływu rzeczywistego składu betonu, a w szczególności rodzaju użytego kruszywa, na zakładaną wartość modułu sprężystości. Zagadnienie wyznaczenia miarodajnej wartości modułu sprężystości betonu wbudowanego w konstrukcję dodatkowo komplikuje fakt niejednoznacznych, a w niektórych przypadkach rozbieżnych procedur normowych obowiązujących przy wyznaczeniu wartości modułu sprężystości. W rezultacie w praktyce często obserwuje się istotne różnice pomiędzy rzeczywistymi i obliczeniowymi wartościami przemieszczeń i naprężeń konstrukcji. Ich wyeliminowanie wpłynęłoby korzystnie z jednej strony na ekonomiczne aspekty procesu realizacji obiektów mostowych, z drugiej strony na bezpieczeństwo ich użytkowania.

Wobec powyższego, największym walorem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest analiza i weryfikacja rozbieżności pomiędzy prognozowanym i rzeczywistym zachowaniem się wytypowanych sprężonych ustrojów nośnych obiektów mostowych oraz podjęcie próby opracowania procedury badawczej umożliwiającej wyznaczenie miarodajnej wartości modułu sprężystości betonu wbudowanego w tego typu objekty, umożliwiającej korektę założeń projektowych.

W rozdziale 1, stanowiącym wstęp do niniejszej rozprawy, Autor opisał dynamikę rozwoju technologii realizacji konstrukcji mostowych z betonu sprężonego na tle obiektów tego typu z betonu zbrojonego i stali oraz problemy związane z określeniem rzeczywistej sztywności ustrojów nośnych tych konstrukcji. Następnie Doktorant scharakteryzował przedmiot rozprawy, za który przyjął wyjaśnienie rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych, a odpowiedzią na obciążenie statyczne rzeczywistej konstrukcji obiektów mostowych z betonu sprężonego. Autor we wstępie postawił również jedną, rozbudowaną tezę pracy, w której wskazał, że głównymi przyczynami rozbieżności między wynikami obliczeń numerycznych metodą MES betonowych przeseł mostów sprężonych i odpowiedzią na obciążenie rzeczywistej konstrukcji są różnice pomiędzy zakładanymi właściwościami betonu, przyjmowanymi w oparciu o wytyczne normowe a rzeczywistymi charakterystykami wbudowanego w ustrój nośny materiału. Tezę kończy stwierdzenie, że skonstruowanie prawidłowego modelu obliczeniowego uwarunkowane jest uwzględnieniem rzeczywistych charakterystyk betonu wyznaczonych w badaniach laboratoryjnych z odwzorowaniem warunków dojrzewania betonu w konstrukcji. Dodatkowo Autor sformułował pięć uzupełniających celów pracy. Rozdział 1 kończy opis struktury i zakresu rozprawy.

Rozdział 2 to główna część studialna pracy, stanowiąca analizę literatury tematycznej oraz zależności normowych. Omówiono tu zagadnienia dotyczące odkształcalności betonu, a w szczególności wielkości modułu sprężystości. Kolejno opisano definicje i rodzaje modułów sprężystości oraz rzeczywiste i uproszczone zależności naprężenie-odkształcenie. Scharakteryzowano wpływ czynników materiałowych, takich jak kruszywo i cement na wartość modułu sprężystości betonu. W zakresie czynników technologicznych omówiono

wpływ warunków wiązania i twardnienia betonu, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu temperatury otoczenia i betonu, wilgotności i czasu trwania pielęgnacji. Uwzględniono również wpływ zastosowania technologii transportu pompowego mieszanki na kształtowanie wartości modułu sprężystości. Następnie Autor scharakteryzował zależność wartości modułu od innych charakterystyk betonu, takich jak: wytrzymałość na ściskanie, gęstość i zawartość powietrza. W kolejnych podrozdziałach Doktorant opisał moduł sprężystości w ujęciu standardów europejskich, Modele Code, norm amerykańskich oraz normy australijskiej, kanadyjskiej, japońskiej, chińskiej, indyjskiej, nowozelandzkiej i RPA. Przedstawił również siedem modeli matematycznych modułu sprężystości, uwzględniających charakterystyki składu kompozytu betonowego, jak również inne nienormowe formuły opisujące moduł betonu jako funkcję innych charakterystyk kompozytu oraz jego składników. Ostatni podrozdział rozdziału drugiego dotyczy porównania wyników badań ugięć wytypowanych obiektów kablobetonowych pod próbnym obciążeniem oraz wyników ugięć teoretycznych obliczonych w oparciu o modele numeryczne tych obiektów, przy uwzględnieniu typu ustroju nośnego, klasy wytrzymałości zastosowanego betonu, rodzaju kruszywa użytego do jego produkcji oraz normy, w oparciu o którą przyjmowano wartości modułów. W przeprowadzonej analizie Autor wykazał istotne rozbieżności pomiędzy wartościami teoretycznymi i pomierzonymi.

Kolejne rozdziały pracy stanowią jej część badawczą.

Rozdział 3 pracy poświęcono opisowi siedmiu obiektów mostowych stanowiących przedmiot badań i analiz w ramach recenzowanej pracy doktorskiej. Obiekty te różniły się schematem statycznym (4 - belka ciągła, 2 - belka wolnopodparta, 1 - łuk z jazdą dołem ze ściąganiem), ustrojem nośnym (4 - płytowo-belkowy, 2 - skrzynkowy, 1 - łukowy z pomostem płytowo-belkowym), technologią budowy (5 - deskowania stacjonarne, 1 - nasuwanie podłużne, 1 - betonowanie nawisowe) oraz klasą betonu (3 - C35/45, 1 - C40/50, 3 - C50/60). W przypadku wszystkich wytypowanych do analiz obiektów opisano ich geometrie oraz podano skład mieszanki betonowej.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki numerycznych analiz statyczno-wytrzymałościowych dla pięciu z siedmiu wytypowanych obiektów przy uwzględnieniu różnych technologii ich wykonania, zastosowaniu betonów klasy C40/50 wykonanych na 5 różnych kruszywach (normowym referencyjnym, bazaltowym litym, wapienno-dolomitowym, granitowym i bazaltowym porowatym) oraz przyjęciu stałej i zmiennej w czasie wartości modułu sprężystości. Przeprowadzone analizy porównawcze obrazują wpływ rodzaju zastosowanego kruszywa oraz przyjętego modelu numerycznego konstrukcji obiektów mostowych na wartości maksymalnych przemieszczeń i skrajnych naprężeń w różnych strefach tych obiektów.

Rozdział 5 obejmuje omówienie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz badań in-situ dotyczących czterech z siedmiu wytypowanych obiektów mostowych. W tej części pracy Doktorant przedstawił system odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji, metodykę badań laboratoryjnych, w szczególności wykonanie, pielęgnację i przygotowanie próbek do badań, jak również procedury oznaczenia modułu sprężystości. Badanie modułu sprężystości przeprowadzono dwiema normowymi metodami (A i B wg PN-

EN 12390-13) oraz jedną metodą autorską, zwaną w pracy metodą bezpośrednią, a opisaną w Załączniku B. Przeprowadzono 16 serii badań. Łącznie analizie poddano wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości oznaczonych na prawie 400 próbkach walcowych 150/300 mm, obejmujących: próbki formowane przechowywane w normowych warunkach laboratoryjnych, próbki formowane przechowywane w warunkach odwzorowanych, tj. warunkach odpowiadających tym panującym w betonowej konstrukcji poszczególnych obiektów mostowych, oraz próbki rdzeniowe pobrane ze specjalnie do tego celu zaformowanych testowych bloków betonowych. Badania charakterystyk betonu były realizowane w różnym wieku dla różnych serii betonów; od 3 dni maksymalnie do 365 dni. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w Załączniku A składającym się z 16 arkuszy odpowiadających poszczególnym seriom badań. W rozdziale 5 podano jedynie uogólnione wnioski z analiz tych wyników oraz zestawienie średnich wartości modułu sprężystości oznaczonego w ramach badań wstępnych różnymi metodami na próbkach przechowywanych w warunkach normowych i odwzorowanych. W kolejnych podrozdziałach tej części pracy Autor przedstawił wyniki inwentaryzacji geodezyjnej konstrukcji nośnych trzech analizowanych obiektów mostowych w zakresie rzędnych po betonowaniu i po sprężeniu oraz ugięć rzeczywistych i obliczeniowych. W przeprowadzonych analizach numerycznych zastosowano modele numeryczne opisane w rozdziale 4. Następnie Doktorant omówił metodykę badań konstrukcji mostowych pod obciążeniem próbnym. Dokonano pomiarów następujących charakterystyk: przemieszczeń pionowych przęseł, osiadania podpór oraz zgniotu łożysk. Wyniki inwentaryzacji geodezyjnej oraz badań pod próbnym obciążeniem statycznym umożliwiły weryfikację rzeczywistej odkształcalności betonu, dając podstawę do oceny poprawności wyników badań laboratoryjnych.

W rozdziale 6 przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników badań laboratoryjnych oraz pomiarów przemieszczeń konstrukcji w czasie budowy i pod próbnym obciążeniem statycznym. Na podstawie dokonanej analizy porównawczej Autor stwierdził, że miarodajną reprezentacją betonu wbudowanego w ustrój nośny są próbki pielęgnowane w warunkach odwzorowanych. Zastosowanie w analizach obiektów mostowych wyników badań modułu przeprowadzonych na tych próbkach zapewniło uzyskanie wysokiej zgodności ugięć teoretycznych z pomierzonymi ugięciami ustroju nośnego. Dodatkowo w rozdziale tym Doktorant przedstawił koncepcję procedur wyznaczania miarodajnego modułu sprężystości umożliwiających uzyskanie zgodności rzeczywistych ugięć ustroju nośnego w czasie realizacji obiektu mostowego z tymi przewidywanymi na podstawie analiz numerycznych. Same procedury, z uwzględnieniem sposobu realizacji inwestycji (projekt – budowa, projektuj i buduj) zostały opisane w Załączniku C.

Wszystkie ww. główne rozdziały pracy zamykają krótkie podsumowania syntetycznie opisujące najważniejsze treści w nich zawarte oraz wynikające z nich konkluzje. Całość rozprawy kończy natomiast ogólne podsumowanie, w których Doktorant nie tylko potwierdził słuszność założonej w pracy tezy, ale i sformułował wiele szczegółowych wniosków dotyczących wpływu na zgodność wyników analiz numerycznych ustrojów nośnych obiektów mostowych i pomiarów in-situ: typu analizowanej konstrukcji, warunków dojrzewania betonu, metody pomiaru modułu sprężystości. Ponadto postawiono uzupełniające wnioski odnośnie do

rozwoju właściwości betonu na cemencie hutniczym w czasie w porównaniu do betonów z cementem portlandzkim oraz wpływu rodzaju kruszyw na relację siecznego modułu początkowego i ustabilizowanego. Ostatni rozdział pracy kończy wykaz dalszych kierunków prac, będących kontynuacją badań i analiz prowadzonych w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej. Jako najważniejszy z nich wskazano zbadanie wpływu rzeczywistych warunków dojrzewania betonu w konstrukcji na jego właściwości reologiczne.

### 3. OCENA PRACY

Recenzowana rozprawa doktorska to kompleksowe opracowanie zagadnienia miarodajnej oceny modułu sprężystości betonu wbudowanego w konstrukcje sprężone mostów betonowych przy uwzględnieniu: różnego typu ustrojów nośnych tych obiektów, różnej klasy betonów zastosowanych do ich wykonania, różnego ich składu, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu rodzaju użytego kruszywa i cementu, różnego wieku betonów, różnych warunków temperaturowo - wilgotnościowych dojrzewania betonów oraz różnych metod pomiarowych modułu. Bardzo obszerny zrealizowany program badań, poprzedzony studiami literatury tematycznej oraz analizami dokumentacji istniejących obiektów mostowych, obejmował nie tylko badania materiałowe betonów, ale również modelowanie numeryczne wytypowanych konstrukcji mostowych, ich badania, w szczególności podczas próbnego obciążenia, oraz weryfikację uzyskanych wyników. Z uwagi na swoją specyfikę i zakres recenzowana praca doktorska zawiera wyniki badań, analizy i wnioski cenne nie tylko z naukowego, ale i praktycznego punktu widzenia.

Doktorant wykazał się umiejętnością planowania badań doświadczalnych, zarówno laboratoryjnych, jak i in situ, doboru odpowiedniej metodyki badań, projektowania stanowisk badawczych, prowadzenia badań, analizy uzyskanych wyników oraz modelowania numerycznego obiektów mostowych. Potrafi również dokonać krytycznej oceny zarówno obowiązujących zapisów normowych, cytowanych badań innych naukowców, jak i własnych wyników badań i analiz, oraz formułować poprawne wnioski o charakterze poznawczym.

Na uwagę zasługuje również wysoka estetyka recenzowanej rozprawy doktorskiej oraz bardzo poprawny pod względem stylistycznym i interpunkcyjnym, syntetyczny język, jakim posługuje się Autor. Do wszystkich rozdziałów, rysunków i tabel w całej pracy zastosowano jednakową, spójną formę graficzną. W szczególności należy podkreślić, że rysunki pochodzące z innych źródeł, zostały przerysowane, a nie wklejone w ich oryginalnej, ale zróżnicowanej pod względem jakości i estetyki formie. Czynniki te korzystnie wpływają na czytelny i jednoznaczny odbiór treści zawartych w pracy. Warto również zwrócić uwagę na bardzo niewielką liczbę błędów edycyjnych i tzw. literówek, co dodatkowo potwierdza staranność Autora przy opracowywaniu rozprawy.

Do najważniejszych, oryginalnych osiągnięć naukowych Doktoranta, zaprezentowanych w recenzowanej rozprawie, należy zaliczyć:

- przegląd i porównanie wytycznych do szacowania wartości modułu sprężystości zawartych w kilkunastu dokumentach normowych dotyczących projektowania konstrukcji z betonu, obowiązujących w różnych krajach na świecie;

- wykazanie, w oparciu o bardzo rozbudowane zestawienie danych archiwalnych z badań odbiorczych ponad dwudziestu obiektów mostowych zrealizowanych w Polsce, zasadniczych różnic pomiędzy pomierzonym ugięciem sprężystym przęseł tych obiektów, a ich ugięciem teoretycznym, obliczonym na podstawie modeli numerycznych, przy uwzględnieniu 4 typów ustrojów nośnych tych konstrukcji, zróżnicowanych klas zastosowanego betonu, różnych rodzajach kruszyw z podaną identyfikacją ich złoża oraz zakładanych wartościach modułu sprężystości betonu na podstawie dwóch norm (PN-S-10042 i PN-EN 1992). Szczególne znaczenie mają tu bardzo zróżnicowane wyniki uzyskane dla obiektów wykonanych z betonów zawierających kruszywo granitowe, tak powszechnie stosowane w polskim mostownictwie. Autor wykazał, że wobec różnych właściwości granitów pochodzących z różnych złóż, sama identyfikacja wpływu kruszywa na moduł sprężystości betonu jedynie poprzez określony jego rodzaj, jest niewystarczająca;
- przeprowadzenie kompleksowych numerycznych analiz statyczno-wytrzymałościowych dla wytypowanych obiektów mostowych przy uwzględnieniu różnych technologii ich wykonania oraz zastosowaniu betonów jednej klasy, ale wykonanych na 5 różnych kruszywach, najczęściej stosowanych w mostownictwie polskim. Przeprowadzone analizy porównawcze obrazują wpływ rodzaju zastosowanego kruszywa oraz przyjętego modelu numerycznego konstrukcji obiektów mostowych na wartości maksymalnych przemieszczeń i skrajnych naprężeń w różnych strefach tych obiektów.
- zaprojektowanie i realizacja unikatowego systemu odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji obejmującego układ czujników temperatury wbudowany w ustrój nośny analizowanych obiektów mostowych, rejestrator, serwer oraz piec laboratoryjny;
- realizacja bardzo rozbudowanego programu badań modułu sprężystości próbek betonów wbudowanych w wytypowane obiekty mostowe, obejmującego trzy metody pomiarowe oraz trzy rodzaje warunków dojrzewania betonu: laboratoryjne, odwzorowane i rzeczywiste;
- weryfikacja poprawności założenia, że wyznaczenie modułu sprężystości betonu dojrzewającego w warunkach odwzorowanych gwarantuje największą zbieżność wyników analiz numerycznych odkształcalności betonu ustrojów nośnych wytypowanych obiektów mostowych i wyników pomiarów dokonanych podczas próbnych obciążeń statycznych tych konstrukcji.

### 3.1. Uwagi krytyczne i wątpliwości

#### Uwagi ogólne:

- i. W pracy co prawda podano, co jest jej przedmiotem, ale nigdzie wprost nie zdefiniowano głównego jej celu, w przeciwieństwie do pozostałych celów.
- ii. Teza pracy w postaci, w jakiej została sformułowana, jest zbyt rozbudowana, a w jej pierwszej części wydaje się oczywista.
- iii. W odniesieniu do wszystkich analizowanych wyników badań własnych brak informacji na temat rozrzutu wyników (np. współczynnika zmienności czy odchylenia standardowego). Z kolei w przypadku analizy wyników badań innych badaczy Autor skupia się na poziomie istotności z pominięciem innych kluczowych charakterystyk, takich jak np. wartości średnie.

- iv. W wielu miejscach pracy ciężar objętościowy podawany jest jako właściwość betonu. Właściwością betonu jest jego gęstość, a nie ciężar.
- v. W części studialnej pracy omówiono jedynie jakościowy wpływ głównych czynników materiałowych i technologicznych na kształtowanie modułu sprężystości. W rezultacie z przedstawionych treści trudno wnioskować, który z omawianych czynników ma najistotniejszy wpływ.
- vi. W rozdziale 2 pominięto omówienie wpływu warunków badania modułu sprężystości betonu na jego wartość. Z punktu widzenia podjętego tematu rozprawy i różnych warunków temperaturowo-wilgotnościowych realizacji badań modułu sprężystości takie zagadnienie powinno być uwzględnione w pracy.
- vii. W kluczowym rozdziale 5.4 dotyczącym wyników badań laboratoryjnych znajduje się wiele uogólnień, które nie wiadomo do czego się odnoszą. Weryfikacja zamieszczonych tu wniosków jest o tyle trudna, że wyniki badań, które są analizowane, nie zostały zamieszczone w treści, tylko w załącznikach. Uogólnienia dotyczące rozwoju właściwości betonu w czasie budzą wątpliwości wobec faktu, że betony badane były w różnym wieku i okres prowadzenia obserwacji był różny (min. 28 dni, max. 365 dni). Odbiór rozdziału dodatkowo komplikuje fakt, że na wszystkich kilkudziesięciu wykresach w Załączniku A., obrazujących rozwój wytrzymałości i modułu sprężystości w czasie, wyniki dla warunków odwzorowanych i normowych są zamienione w stosunku do tych podanych w odpowiednich tabelach Załącznika.
- viii. W analizie wyników badań modułu sprężystości nie uwzględniono wpływu wilgotności betonu na wynik pomiaru. Z opisu zawartego w 5.3.2 wynika, że próbki normowe badano w stanie nasyconym, odwzorowane i rdzeniowe w stanie wilgotnym, ale na pewno nienasyconym.

#### **Uwagi szczegółowe:**

- i. Str. 2.: Podane definicje betonu zwykłego i betonu wysokiej wytrzymałości nie odpowiadają definicjom normowych, zamieszczonym w PN-EN 206, zgodnie z którymi najwyższą klasą betonu zwykłego jest C50/60, a nie jak podano w rozprawie C60/75.
- ii. Str. 2: Zdefiniowano termin „cyfrowy bliźniak”, który jednak ani razu nie pojawia w treści rozprawy.
- iii. Str. 7: Moduł sprężystości nie jest kątem nachylenia, a tangensem tego kąta.
- iv. Str. 11: Koncentracja naprężeń w strefie stykowej kruszywa i zaczynu, nie tyle powoduje mikropęknięcia oraz utratę wiązania pomiędzy kruszywem i stwardniałym zaczynem cementowym, co może je spowodować. To czy dojdzie do zarysowania strefy stykowej zależy od jej wytrzymałości, w znacznej mierze zdeterminowanej przyczepnością zaczynu do kruszywa, i poziomu naprężeń w tej strefie.
- v. Str. 11: W ogólnym przypadku wpływ zawartości kruszywa na moduł sprężystości ma istotne znaczenie. Może być pomijalny w przypadku optymalizacji doboru składu betonów na kruszywach zwykłych, gdy ze względów ekonomicznych i osiąganych właściwości kompozytu dąży się do jak największego udziału kruszywa w jednostce betonu. Zatem podanie w pracy informacji na temat braku istotnego wpływu zawartości kruszywa na moduł sprężystości bez odniesienia się do uwarunkowania

- przeprowadzonych badań może prowadzić do błędnego uogólnienia. W szczególności, że na str. 13 Autor stwierdza, że procentowa zawartość kruszywa ma większy wpływ na moduł betonu niż moduł sprężystości kruszywa.
- vi. Podrozdział *Wbudowanie mieszanki betonowej* (2.4.2) powinien poprzedzać podrozdział *Warunki wiązania i twardnienia* (2.4.1)
  - vii. Str.23: *Przy stałej zawartości kruszywa, gęstość rośnie wraz z gęstością kruszywa [100], co może świadczyć o mniejszej porowatości i większej sztywności samego kruszywa.* – o mniejszej porowatości i większej sztywności kruszywa może świadczyć już sama większa gęstość kruszywa, a nie betonu.
  - viii. 2.5.3: Termin *zawartość powietrza* stosuje się do mieszanki betonowej, a nie betonu stwardniałego. W tym ostatnim przypadku bardziej właściwy jest termin *porowatość*. Podane w podrozdziale wytyczne GDDKiA również odnoszą się do mieszanki betonowej, a nie betonu stwardniałego. Ponadto nie doprecyzowano, że zakres zawartości powietrza w mieszance betonowej na poziomie 4,5 – 6,0 % obowiązuje dla określonego maksymalnego wymiaru kruszywa.
  - ix. Str. 33, 34: *...badania mieszanki betonowej...* - betonu stwardniałego, nie mieszanki.
  - x. Str. 34, rys. 26: brak legendy.
  - xi. Str. 54, rys. 34 – w tytule rysunku powinna być informacja, że dotyczy on kruszywa granitowego.
  - xii. Str. 86. Powołanie się na Załącznik B wcześniej niż na Załącznik A (str. 88).
  - xiii. 5.3.4. W treści podrozdziału powinien znaleźć się opis metody zaproponowanej przez Autora. Tymczasem podano tu opisy znanych metod normowych, a procedurę autorską zawarto w Załączniku.
  - xiv. Str. 90, Tabela 47. Tytuł tabeli wskazuje, że podano w niej wyniki badań po 28 dniach. Tymczasem w tabeli podane są wyniki badań betonu w różnym wieku.
  - xv. Str. 105: *Zestawienie wyników badań z wynikami pomiarów przemieszczeń przęseł wyraźnie pokazuje wyższość proponowanej metody pielęgnacji próbek nad sposobem opisanym w normie PN-EN 12390-2.* Ww. norma opisuje procedurę przechowywania próbek do badań właściwości betonów, wynikających z jego składu, a nie warunków dojrzewania czy różnej wilgotności betonu.
  - xvi. Str. 107: Stwierdzenie *W niniejszej rozprawie wykazano, iż wyniki uzyskiwane na próbkach pielęgnowanych w sposób normowy są zawyżone, dając w efekcie złudny zapas bezpieczeństwa,* analogicznie jw., wskazuje na niezrozumienie, do czego służy ww. norma. Powszechną wiedzą jest, że warunki dojrzewania betonu w konstrukcji w stosunku do warunków normowych wpływają na pogorszenie właściwości betonu, co znalazło swoje odzwierciedlenie w sposobie oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji wg PN-EN 13791.
  - xvii. Str. 111: Zakwestionowanie wpływu poziomu wytrzymałości betonu na zależność  $E_{C,0}$  i  $E_{C,s}$  przy równoczesnym wskazaniu rodzaju zastosowanego kruszywa jako czynnika determinującego tę relację, jest bezpodstawne wobec stosunkowo niewielkiej liczby badanych betonów. PN-EN 12390-13 podaje, że różnica między tymi wartościami wskazuje na podatność betonu na mikrozarysowania. Podatność ta związana jest ze strukturą betonu, nie tylko kruszywa, co potwierdzają inne dostępne w literaturze badania dotyczące modułu sprężystości.

- xviii. Str. 111: Ostatni akapit podrozdziału 7.2 (Wnioski) nie stanowi wniosku w pracy o charakterze naukowym.
- xix. Str. 141 Rys. A 4.2 i Rys. A.4.3 są identyczne.

### 3.2. Uwagi dyskusyjne / pytania do Autora

#### o charakterze ogólnym:

- i. Autor w pracy dowodzi, że wykazane różnice pomiędzy wartościami przemieszczeń / naprężeń wyznaczonych w oparciu o pomiary i obliczenia numeryczne wynikają głównie z różnic pomiędzy właściwościami betonu wbudowanego w konstrukcję i właściwościami przyjętymi na podstawie norm. W jakim stopniu przyjęty sposób modelowania konstrukcji może mieć wpływ na te różnice?
- ii. Dyskusyjna jest kwestia zastosowania do badań modułu sprężystości bazy pomiarowej 80 mm, która nie spełnia wymogów normy PN-EN 12504-1. Zgodnie z tą normą dla zastosowanych w badaniach próbek minimalna długość tej bazy to 100 mm. Co prawda Autor zastrzega, że *badania porównawcze wykazały, że w przypadku betonu z kruszywem o maksymalnym wymiarze ziaren 16 mm nie występują różnice mierzonych odkształceń wraz ze wzrostem długości bazy pomiarowej*, nie zamieszczono jednak w pracy wyników tych badań. Czy we wszystkich badanych betonach  $D_{max} = 16$  mm?
- iii. Wątpliwości budzi założenie przez Autora, że tzw. metoda bezpośrednia *wprost odzwierciedla definicję modułu sprężystości* w ujęciu PN-EN 1992-1. Czy moduł  $E_{cm}$  stosowany do stanów granicznych użyteczności może być modułem siecznym początkowym?
- iv. Owinięcie próbek folią zabezpiecza beton przed utratą wilgotności, ale czy odwzorowuje warunki wilgotnościowe dojrzewania betonu w konstrukcji?
- v. Wg Autora (str. 107) *Nie ma przeciwwskazań, aby proces ten rozszerzyć o wykonanie bloku testowego i badania odkształcalności betonu z odwzorowaniem rzeczywistych warunków dojrzewania betonu w konstrukcji*. Wydaje się, że taka procedura bardzo skomplikuje proces projektowania betonu i konstrukcji, a wymaganie żeby *warunki atmosferyczne w momencie betonowania bloku testowego były zbliżone do warunków, w których nastąpi betonowanie ustroju nośnego*, może być naprawdę trudne do spełnienia.

#### o charakterze szczegółowym:

- i. Str. 12: Jakie są kryteria podziału, przedstawionego w Tabeli 1, na betony o niskim, umiarkowanym i wysokim module sprężystości?
- ii. Str. 13, rys.8; Str. 41, Tabela 14: W jaki sposób oznaczono moduł sprężystości kruszywa?
- iii. 2.3.2., Str. 14-16: czy wpływ cementu na moduł sprężystości betonu nie powinien być rozpatrywany przez wpływ cementu na wytrzymałość kompozytu? Czy w świetle cytowanych badań znane są przypadki, aby zastosowane spoiwo, z uwzględnieniem zastosowanych dodatków, wpłynęło inaczej jakościowo na moduł sprężystości betonu, niż na jego wytrzymałość na ściskanie? To że ilościowy wpływ składu betonów jest inny w przypadku obu charakterystyk jest oczywiste, ale Doktorant nie omawia pod tym względem tego wpływu.

- iv. str. 17: Ze względu na jaką charakterystykę uznaje się, że optymalna początkowa temperatura mieszanki betonowej wynosi 10 °C?
- v. str. 20. (2.5.1. pierwszy akapit): W których dokumentach normowych obowiązujących na świecie, wartość modułu sprężystości szacuje się wyłącznie w oparciu o wytrzymałość betonu z pominięciem wpływu rodzaju kruszywa?
- vi. Str. 25, Tabela 3: Niezrozumiałe są modyfikacje modułu dla kruszywa granitowego. Wg [76] i [90] moduł należy obniżyć o 20 %, czy przyjąć go na poziomie jak dla betonu z kruszywem kwarcytowym (0%)?
- vii. Kiedy pobierano próbki rdzeniowe z bloków testowych i w jaki sposób je przechowywano do czasu badania?

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi nie tylko oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego wyznaczenia modułu sprężystości betonu wbudowanego w konstrukcje przy uwzględnieniu odwzorowania rzeczywistych warunków jego dojrzewania, ale równocześnie charakteryzuje się bardzo wartościowymi aspektami praktycznymi, które mogą mieć znaczenie w optymalizacji procesu projektowania i analiz numerycznych ustrojów nośnych obiektów mostowych. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną, warsztatem badawczym oraz umiejętnością modelowania konstrukcji, odpowiednimi do realizacji podjętego tematu rozprawy. Sformułowane na wstępie rozprawy zadania badawcze zostały w pełni zrealizowane, a dzięki eksperymentalnej weryfikacji potwierdzono również słuszność postawionej w pracy tezy. Należy podkreślić, że uwagi krytyczne i wątpliwości recenzentki zawarte w niniejszej opinii odnoszą się jedynie do wybranych elementów pracy i nie umniejszają wysokiej wartości rozprawy jako całości.

Niniejszym stwierdzam, iż rozprawa doktorska pt. „*Wyznaczenie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych konstrukcji mostowych*” spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 r. Poz. 1668, z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Jakuba Krzakały do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Recenzję podpisała  
Lucyna Domagała