

Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Konstrukcji Inżynierskich

Gdańsk, 30.05.2022

Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Tomasza Howiackiego:

Analysis of cracks in concrete structures with the use of distributed optical fibre measurements.

Analiza zarysowań w konstrukcjach betonowych przy zastosowaniu światłowodowych pomiarów rozłożonych

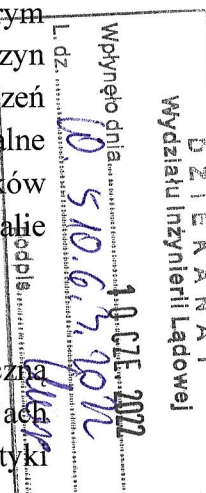
1. Podstawa formalna opracowania

Opinię opracowano na wniosek Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, przekazanej w piśmie dziekana prof. dr hab. inż. Andrzeja Szaraty (pismo z dnia 16.03.2022).

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy zagadnień technicznych i teoretycznych związanych z zastosowaniem światłowodów technicznych do diagnostyki konstrukcji żelbetowych. Światłowody były znane od stuleci. Jednak dopiero w wieku XIX zaczęto obserwować i opisywać zjawiska zachodzące w liniowych ośrodkach mogących nie tylko być magistralą dla światła, ale także za pomocą światła przekazywać informacje. Obecnie włókna światłowodowe poza powszechnym wykorzystaniem w telekomunikacji służą do zbierania danych pomiarowych w ośrodku, w którym się znajdują. W zastosowaniach inżynierskich światłowody są wykorzystywane do pomiarów odkształceń i temperatury ośrodka, z którym są związane. Obecnie technika światłowodowa jest podstawą monitoringu pracy maszyn i urządzeń w szeroko rozumianym przemyśle. Potrzeba monitoringu struktur i urządzeń wynika z ich złożoności, funkcji, niezawodności i bezpieczeństwa. Obecnie odpowiedzialne konstrukcje inżynierskie często wyposażone są w system SHM, czyli zespół czujników i oprogramowania badających parametry konstrukcji i sygnalizujących potencjalne anomalie lub zagrożenia.

W tym kontekście recenzowana praca porusza aktualną problematykę techniczną i bada przydatność oraz skuteczność nowych rozwiązań pomiarowych w konstrukcjach żelbetowych. Praca w niektórych aspektach stanowi pionierskie podejście do problematyki



pomiary zarysowania w betonie i określenia wczesnych oznak jego przeciążenia.

Celem szczegółowym pracy doktorskiej jest zbadanie skuteczności pomiaru odkształceń, a szczególnie rys w betonie przy wykorzystaniu różnych dostępnych na rynku światłowodów technicznych lub specjalnie dedykowanych czujników światłowodowych.

Cechą szczególną techniki światłowodowej jest możliwość pomiaru ciągłego odkształceń na długości światłowodu. Daje to unikatowe możliwości kompleksowego diagnozowania konstrukcji żelbetowych lub sprężonych. Obecnie mocno rozwija się nauka i technika diagnozowania konstrukcji sprężonych szczególnie w świetle obserwowanych uszkodzeń, awarii lub katastrof. Tematyka pracy jest zatem wysoce aktualna.

Charakteryzując ogólnie pracę należy podkreślić, że jest ona połączeniem rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych zakończonych praktycznymi wnioskami. Stanowi zatem komplet zagadnień potrzebnych tym, którzy będą chcieli podjąć rozważaną tematykę w dalszych badaniach lub w praktyce.

Opiniowana rozprawa została napisana w języku angielskim, liczy 448 stron maszynopisu i składa się z 8 rozdziałów, streszczenia, obszernego streszczenia w języku polskim, spisu bibliografii, podziękowań i spisu zawartości. Zamieszczono 424 rysunki, wykresy lub fotografie, 87 tabel, 246 pozycji literatury i 57 pozycji komercyjnych materiałów źródłowych lub materiałów branżowych.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do tematyki monitoringu konstrukcji, a w szczególności systemy i techniki monitorowania konstrukcji betonowych z uwypukleniem potrzeby bezpośredniej detekcji lokalnych uszkodzeń. Przedstawiono podstawowe zalety i ograniczenia technik pomiarowych stosowanych do pomiarów i analizy zarysowań. Zwrócono uwagę na znaczne ograniczenia pomiarów punktowych oraz na znaczenie trwałości czujników i powtarzalności pomiarów

Rozdział 2 przedstawia przegląd literatury tematu. Omówiono podstawy teoretyczne pomiaru ciągłego w czujnikach światłowodowych. Następnie zwrócono uwagę na specyfikę pomiaru odkształceń w kontekście zgodności odkształceń mierzonego ośrodka i czujnika liniowego. Podkreślono rolę osłonki włókna światłowodowego oraz parametry mechaniczne kompozytu składającego się z włókien pomiarowych i struktur osłonowych. Dokonano przeglądu typów światłowodowych włókien pomiarowych zwracając uwagę na przydatność poszczególnych wyrobów do konkretnych typów pomiarów. Omówiono także podstawowe metody ich instalacji, w tym metody powierzchniowe dla istniejących konstrukcji oraz dedykowane do zatapiania wewnątrz nowo wznoszonych obiektów. Przedstawiono podstawy teoretyczne związane z mechanizmem przenoszenia odkształceń z betonu na włókno pomiarowe wewnątrz czujnika (lub kabla) w obrębie rysy. Omówiono także podstawowe modele analityczne stosowane do opisu tego zjawiska przy zastosowaniu kompozytowych (wielowarstwowych) czujników liniowych. Niewątpliwym osiągnięciem autora jest zebranie i omówienie olbrzymiego materiału bibliograficznego. Obszerność i zakres wykorzystanych materiałów przedstawia poniższa tabela (zaczepnięta z pracy) przedstawiająca strukturę wykorzystanych prac.

No.	Category	Number of items: May 2017			percentage of Polish items
		Polish	English	Together	
1	articles	15	336	351	4.3
2	books and monographies	23	7	30	76.6
3	diploma thesis	2	28	30	6.7
4	company materials	3	36	39	7.7
5	others	17	14	31	54.8
6	patents	0	24	24	0.0
-	summary	60	455	505	-

Na koniec, zaprezentowano możliwości czujników światłowodowych w detekcji rys w różnego rodzaju elementach betonowych oraz algorytmy obliczeniowe do szacowania szerokości rys na podstawie zarejestrowanego rozkładu odkształceń.

Rozdział 3 zawiera tezy rozprawy i plan ich realizacji.

Teza 1: Możliwe jest zapewnienie połączenia światłowodu pomiarowego z betonem, co pozwoli na wykrycie pęknięć podczas pomiarów cyklicznych przy zmiennych warunkach obciążenia.

Teza 2: Możliwe jest oszacowanie rzeczywistej szerokości rys (zmian) w betonie z dokładnością nie gorszą niż 0,05mm, uwzględniając pomiary cykliczne przy zmiennych warunkach obciążenia.

Dla realizacji tez pracy sformułowano złożony program badań laboratoryjnych, obejmujący badania wstępne i badania główne dotyczące drobnowymiarowych próbek betonowych, pełnowymiarowych płyt sprężonych i belek żelbetowych. We wszystkich badaniach położono szczególny nacisk na skuteczność pomiarów wykonanych przy pomocy różnych typów czujników światłowodowych.

Rozdział 4 to opis badań poświęconych skuteczności pomiarów przy wykorzystaniu różnych typów komercyjnych światłowodów technicznych do pomiaru odkształceń. Przeprowadzono testy rozciągania na specjalnie do tego przygotowanym stanowisku i zbadano skuteczność zastosowanych światłowodów, zwracając uwagę na negatywne efekty działania warstw otuliny na wyniki. Rozdział zawiera również opis wstępnych badań drobnowymiarowych próbek walcowych. W badaniach analizowano m.in. możliwość zastosowania włókna światłowodowego do pomiarów powierzchniowych betonowego walca. Badania pokazały efektywność czujników światłowodowych w identyfikacji mikro-rys (0.05mm). Stwierdzono natomiast rozrzuty pomiarów przy rysach większych. Powodem, zdaniem autora jest podatna osłona włókna światłowodowego.

Rozdział 5 to opis badań skuteczności pomiarowej na próbkach walcowych o ustalonej geometrii, ale przy zmiennym uziarnieniu (20 walców, w tym 10 z kruszywem max 8 mm i 10 z kruszywem max 16 mm). Walce oklejono przewodem światłowodowym w trzech liniach: po tworzącej i w dwóch przekrojach po obwodzie. Badano dwa sposoby przyklejenia światłowodu (bezpośredni i na powierzchnię przygotowaną). Badania pokazały możliwości jakie daje technika światłowodowa w pomiarach odkształceń. Uzyskano nie tylko rozkłady odkształceń po wysokości walca na trzech tworzących, ale także dzięki pomiarom

odkształceń obwodowych uzyskano pomiar współczynnika Poissona i zanotowano jego zmienność (wzrost) w stanie tuż przed zniszczeniem. Dodatkowo dla kontroli zamontowano extensometr. Na podstawie analizy uzyskanych danych pomiarowych stwierdzono także, że wielkość kruszywa oraz metoda montażu włókna na powierzchni betonu mają pomijalne znaczenie z punktu widzenia interpretacji fizycznej wyników odkształceń. W rozdziale poddano ocenie efektywną wielkość przestrzennej rozdzielczości pomiarowej przyjętej do pomiarów. Ostatecznie zdecydowano (i zarekomendowano do dalszych badań) o przyjęciu rozdzielczości równej 10 mm (100 punktów pomiarowych na jeden metr włókna), co odpowiada zaleceniom producenta stosowanego reflektometru optycznego.

Rozdział 6 to opis badań pełnowymiarowych żelbetowych płyt strunobetonowych. W testach badano skuteczność czujników zalanych w betonie i powierzchniowych. Te pierwsze, to prototypowe czujniki zespolone złożone z kompozytowego rdzenia (FRP) z wklejonym (w rowku podłużnym) włóknem światłowodowym. Czujniki powierzchniowe to światłowody techniczne z powłoką akrylową. Dzięki takiej bazie pomiarowej możliwe było analizowanie całej historii odkształceń w betonie od procesu dojrzewania poprzez sprężenie aż do zniszczenia. Niestety, w pracy zajęto się pomiarem odkształceń tylko przy próbie nośności przy zginaniu czteropunktowym. Efektem badań jest krytyczna ocena przydatności czujników powierzchniowych i wgłębnych oraz dokładności otrzymanych wyników. Czujniki wgłębne (zespolone) były mniej wrażliwe na identyfikację rys od powierzchniowych. Generalnie zauważono negatywny wpływ poślizgu międzywarstwowego czujników światłowodowych na wyniki w miejscach zarysowanych.

Rozdział 7 to opis badań laboratoryjnych belek żelbetowych wyposażonych w dwa typy czujników zespolonych (światłowod zatopiony w pręt FRP - pręt sztywny) oraz dwóch typów światłowodów technicznych (miękkie) z trzywarstwową osłoną syntetyczną o dwóch średnicach. Badano dwa typy belek (razem 6 sztuk) o zróżnicowanym zbrojeniu na zginanie w celu uzyskania zróżnicowanego rozstawu rys. Wszystkie badane wersje czujników światłowodowych były zatopione w betonie. Już we wstępnym etapie badań zwrócono uwagę na obiektywne trudności w montażu i prawidłowym ułożeniu światłowodów „miękkich” w deskowaniu i utrzymaniu prawidłowej geometrii w procesie betonowania. Wszystkie czujniki umieszczono wewnątrz belek na poziomie zbrojenia głównego w strefie ściskanej i rozciąganej. Przeprowadzono badania odkształceń i temperatury w procesie dojrzewania belek. Zobrazowano efekty skurczowe i zidentyfikowano mikrorysy powstałe w wyniku efektów termicznych i skurczowych. Belki poddano testowi na wytrzymałość przy zginaniu czteropunktowym. W wyniku badań otrzymano morfologię rys w belkach w kolejnych krokach obciążania. Prowadzono przy tym ciągły pomiar odkształceń na czujnikach światłowodowych i prowadzono w kolejnych przyrostach obciążeń pomiary optyczne rozwarości rys z zastosowaniem mikroskopu z przetwarzaniem numerycznym obrazu. Badania wykazały przewagę czujników zespolonych (pręt FRP z włóknem) nad światłowodami „miękkimi” z uwagi na problemy z poślizgiem między warstwowym i przede wszystkim na przydatność techniczną w przemyśle. Badania nie tylko potwierdziły przydatność czujników światłowodowych do badań konstrukcji żelbetowych, ale także pokazały wady światłowodów technicznych (standardowo stosowanych w telekomunikacji). Szczególnie zwrócono uwagę na światłowody z wzmacniającą wkładką stalową. Wkładka ta z uwagi na duży poślizg międzywarstwowy poważnie ogranicza możliwości identyfikacji i wielkości zarysowań. W badaniach poddano krytycznej ocenie dwa typy komercyjnych

monolitycznych czujników światłowodowych (SHM) wskazując ich walory i ograniczenia.

Rozdział 8 to podsumowanie badań. Składa się z grupy syntetycznych wniosków dotyczących przydatności światłowodów do diagnostyki konstrukcji żelbetowych oraz z praktycznych porad dotyczących diagnostyki z wykorzystaniem czujników światłowodowych.

3. Ocena rozprawy.

Pracę można podzielić na trzy obszary. Pierwszy to bogaty przegląd literatury tematu, wskazujący na wyróżniającą pracowitość i wnikliwość w analizie problemu. Drugi obszar to prace projektowe zawierające identyfikację podstawowych (zglobionych w literaturze) problemów badawczych związanych z problematyką wykorzystania czujników światłowodowych, ale także mocno usadowiony w praktycznym wykorzystaniu metod badawczych. Trzecia część to szerokie badania eksperymentalne mające na celu weryfikację przyjętych metod i produktów komercyjnych, ale także identyfikację unikatowych parametrów fizycznych, będących podstawą do kalibracji zastosowanych czujników w obszarze badań zarysowanego betonu.

Z formalnego punktu widzenia praca jest zredagowana starannie. Podział na rozdziały i podrozdziały jest czytelny i strukturalnie prawidłowy. Strona graficzna jest niemal bez zarzutu.

Recenzent nie czuje się być profesjonalnie kompetentnym w zakresie języka angielskiego, ale pracę przeczytał bez trudności w zrozumieniu zagadnień ogólnych i szczegółów. Nie wnosi zatem w tym zakresie uwag.

3.1. Uwagi pozytywne

Zdaniem recenzenta praca zawiera oryginalne osiągnięcia, będące niewątpliwym wkładem doktoranta w rozwój wiedzy dotyczącej diagnostyki konstrukcji. Należy tu wymienić w kolejności następujące osiągnięcia:

1. Bogaty przegląd literatury tematu zawierający publikacje książkowe, artykuły naukowe oraz publikacje i specyfikacje techniczne.
2. Sformułowanie i wykonanie oryginalnego programu badań pokazujących unikatowe wyniki, dające pogląd na wykorzystanie światłowodów w diagnostyce konstrukcji żelbetowych.

Na szczególną uwagę i pozytywną ocenę zasługuje zakres i różnorodność badań laboratoryjnych. Badanie te to nie tylko osobisty wysiłek doktoranta, ale także umiejętność organizowania procesu badawczego i zorganizowania grupy osób wspomagających proces.

Bardzo pozytywnie należy się odnieść do warsztatu badawczego. We wszystkich

badaniach starano się weryfikować wyniki innymi znanymi metodami. Ponadto dokonano statystycznej oceny wyników tym samym podnosząc ich wiarygodność.

Innym pozytywnym aspektem pracy jest techniczny i aplikacyjny charakter prowadzonych badań i analiz. Widać tutaj współpracę doktoranta z przemysłem w zakresie wdrażania i stosowania badanych metod pomiarowych.

Na docenienie zasługuje również fakt napisania rozprawy w języku angielskim. Dzięki temu wyniki pracy doktorskiej stają się wprost dostępne na świecie.

3.2 Uwagi dyskusyjne

Trudno poddać krytyce ocenianą pracę, jednak można sformułować szereg uwag i pytań, które się nasunęły w trakcie czytania.

Celem szczegółowym pracy jest analiza możliwości i przydatności techniki światłowodowej do identyfikacji i pomiarów rys w konstrukcjach żelbetowych. Już na etapie studiów literatury wyłoniono główny problem dotyczący zgodności odkształceń badanej konstrukcji i elementu światłowodowego. Jako główny i zasadniczy określono problem poślizg między warstwowej konstrukcji światłowodu. Czy zatem nie należało się w badaniach bardziej skupić na laboratoryjnych testach małowymiarowych elementów zarysowanych przy zginaniu, tak aby bardziej precyzyjnie określić wpływ „rozmycia odkształceń” w obrębie jednej rysy. Taką rysę można zainicjować przez wprowadzenie imperfekcji (np. w postaci nacięcia w betonie). Wtedy można ją precyzyjnie diagnozować również innymi metodami.

Autor w specyfikacjach dotyczących światłowodów podał możliwe do osiągnięcia dokładności pomiarowe. Doprecyzowania wymaga określenie liniowej rozdzielczości (problem jest opisany na str. 64-65 pracy). Czy należy ją rozumieć jako długość odcinka, na którym pomierzona wartość odkształcenia jest uśredniana? Jeżeli tak jest to czy przyjęcie długości pomiarowej na poziomie 10 mm nie jest powodem powstania niedokładności w pomiarze rozwartości rysy?

Badania dotyczą konstrukcji betonowych. W związku z tym powstaje pytanie czy w analizie wyników badań próbek walcowych uwzględniono rozrzuty parametrów mechanicznych betonu (np.: wytrzymałość przy ściskaniu i rozciąganiu). W tym kontekście dobrze by było pokazać standardowe wykresy siła - przemieszczenie dla oceny jednorodności badanych próbek i nanieść na nie wykresy odkształceń głównych

Bardzo ciekawe były wyniki pomiaru rozciągania po obwodzie w próbkach walcowych i oszacowany przy tej okazji wykres nieliniowej zmienności współczynnika Poissona dla betonu. Autor tłumaczy ten fenomen powstaniem mikrozarysowań w betonie. Zwraca uwagę zatem na możliwości diagnozowania procesu zniszczenia. Nieliniowość współczynnika Poissona wg rys. 232 zaczyna się na poziomie 12 MPa co przy nośności

w zakresie 32 MPa stanowi znacznie mniej niż połowę. Czy jest to początek procesu zniszczenia? Co na to literatura tematu?

Dlaczego w kolejnych testach płyt i belek nie podjęto próby pomiaru odkształceń poprzecznych. Szczególnie mogło to być ciekawe w testach płyty sprężonej, gdzie utrata nośności nastąpiła przy ściskaniu.

Jaka była teoretyczna granica nośności badanych płyt sprężonych na zarysowanie? Czy to był krok 4 obciążenia – rys. 272 i 273?

Czy pomiar w strefie rozciąganej belek żelbetowych (rys. 388-391) pozwala na zidentyfikowanie pracy betonu w 1 fazie? Czy umożliwia odczytanie wytrzymałości betonu na rozciąganie?

Recenzent zdaje sobie sprawę z ograniczeń pracy doktorskiej i ukierunkowania problem na badanie metodyki i skuteczności pomiarowej. Niemniej jednak czuje niedosyt w ważnej sprawie oceny wczesnych oznak procesu osłabienia lub niszczenia betonu.

4. Ocena końcowa

Przedstawiona do recenzji praca „*Analysis of cracks in concrete structures with the use of distributed optical fibre measurements.*” ma moim zdaniem zdecydowanie wartość pracy naukowej i spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Zwłaszcza w części badawczej dotyczącej autorskiego programu badań przydatności techniki światłowodowej do pomiarów odkształceń w konstrukcjach żelbetowych. Autor wykazał się dociekliwością w studiach literatury tematu i wysoką sprawnością w organizacji i prowadzeniu badań laboratoryjnych. Opisana i zbadana metoda identyfikacji wczesnych zarysowań w konstrukcjach żelbetowych, a szczególnie sprężonych w połączeniu z diagnostyką wyężenia konstrukcji, wpisuje się znakomicie w światowy trend nauk technicznych związanych z diagnostyką konstrukcji. Wyniki badań przeprowadzonych przez doktoranta są istotnym przyczynkiem do opracowania metody diagnostycznej dla mostowych konstrukcji sprężonych. W świetle światowego rozwoju konstrukcji sprężonych i problemów w ich utrzymaniu, prace badawcze doktoranta mogą stać się podstawą wdrożeń o zasięgu światowym.

Trzeba podkreślić, że przedstawione w pracy wyniki inspirują i otwierają nowe pola badań.

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę uważam, że praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną oraz praktyczną związaną z tematyką. Tym samym przyczynia się do rozwoju dyscypliny naukowej jaką jest Inżynieria Lądowa i Transport. Potwierdza też umiejętność prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym na podstawie art. 31 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) składam przed Wysoką Radą wniosek o przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping letters that appear to be 'KŻ' followed by a flourish.

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski prof. PG