



R e c e n z j a

pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Łazińskiego pt. „Procedura modelowania obiektów rzeczywistych w postaci pewnego typu obiektów mostowych”

Podstawa opracowania: Zlecenie Pana Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 26.10.2009 r. – znak RB-0/4020/09/10.

1. Charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca doktorska liczy 162 strony maszynopisu plus 18 stron dodatkowych, obejmujących spis treści, wykaz oznaczeń i skrótów oraz spis literatury, liczący 169 pozycji. Zawiera ponadto 144 rysunki i 44 tablice.

Składa się z 9 rozdziałów, obejmujących: cel i zakres pracy (R1), opis próbnych obciążeń obiektów mostowych (R2), przegląd literatury (R3), opis badań własnych (R4), opis zastosowanych modeli obciążeniowych (R5), analizę wpływu zmienności cech betonu na wyniki badań (R6), analizę wpływu wyposażenia badanego obiektu mostowego na wyniki badań (R7), propozycję adekwatnej procedury modelowania i planowania badań odbiorczych omawianego typu obiektów rzeczywistych (R8) oraz wnioski (R9).

Praca jest doświadczalno-teoretyczna i dotyczy ważnego zagadnienia oceny wiarygodności próbnych obciążeń konstrukcji mostowych w określaniu ich rezerw bezpieczeństwa i przydatności do eksploatacji.

2. Ocena merytoryczna pracy

2.1. Ocena doboru tematu

Temat rozprawy jest trafny i dotyczy dość rzadko rozpatrywanego w mostownictwie zagadnienia wiarygodności tzw. obciążeń próbnych, dopuszczających do użytkowania nowe obiekty mostowe lub obiekty starsze po przeprowadzonych zabiegach remontowych, modernizacyjnych czy też wzmacniających. Procedury obciążeń próbnych są regulowane odpowiednimi normami odbiorczymi i zarządzeniami, ale w trakcie ich przeprowadzania

dochodzi – zwłaszcza w przypadku mostów betonowych – do dużych różnic w ugięciach rzeczywistych (mniejsze) i obliczeniowych (większe), co – najczęściej – interpretuje się jako przyrost rezerwy ich nośności w stosunku do obciążeń projektowych.

Autor rozprawy, bazując na wynikach obciążeń próbnych 65 obiektów mostowych, w których brał udział jako członek Zespołu badań terenowych Zakładu Budowy Mostów Politechniki Śląskiej, postanowił wyniki tych badań poddać szczegółowej analizie. Wyodrębnił w tym celu 6 podstawowych typów badanych obiektów stwierdzając, że średnie sprężyste ugięcia rzeczywiste obiektów żelbetowych lub z betonu sprężonego stanowią tylko 51÷55 % ugięć obliczeniowych w przyjętym modelu MOPW (czyli z zastosowaniem projektowych sztywności i cech wytrzymałościowych betonu). 85-procentową zgodność uzyskał tylko dla przęseł typu 5-stalowych dźwigarów blachownicowych, zespolonych z żelbetową płytą pomostu.

Ta duża różnica między ugięciami rzeczywistym U_s , a ugięciami obliczeniowymi U_o stanowiła dla autora pracy asumpt do próby ich wyjaśnienia. W tym celu przeprowadził szczegółową analizę obciążeń próbnych 8-miu obiektów typu „4” – najczęściej występujących w przeprowadzanych badaniach odbiorczych (42 %), a to dwubelkowych mostów w postaci sprężonych belek trapezowych połączonych płytą pomostową. Uzyskał w nich stosunek U_s/U_o w granicach 0,51÷0,76 (średnio 0,585), przy czym najwyższy wynik – 0,76 dotyczył próbnego obciążenia wiaduktu po 66 dniach od betonowania ustroju nośnego. Natomiast w pozostałych 7-miu przypadkach, gdzie stosunek ten wyniósł średnio $\overline{U_s}/U_o = 0,56$ – okres ten wahał się od 121 do 534 dni. Pozwoliło to autorowi na spostrzeżenie, czy spadek wartości stosunku U_s/U_o jest funkcją czasu jaki upływa od momentu betonowania do próbnego obciążenia. Ten zaś znacznie ingeruje w przyrost własności wytrzymałościowych (wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości) betonu.

Dla jednego z tych obiektów przeprowadził także badania próbne w różnych fazach jego realizacji, a to w stanie surowym – bez płyt (kap) chodnikowych – faza I, z płytami chodnikowymi – faza II oraz z pełnym wyposażeniem (nawierzchnia, barieroporęcze) – faza III. Wyniki tych badań oraz równoległych badań rozwoju cech wytrzymałościowych zastosowanego betonu w czasie pozwoliły autorowi na wyciągnięcie interesujących wniosków dotyczących pożądanej procedury przy obciążeniach próbnych tego typu obiektów. Procedury – uwzględniającej nie tylko wzrost modułu sprężystości betonu w czasie dojrzewania, ale również wzrost sztywności przęseł mostowych, spowodowanych współpracą z nimi płyt chodnikowych, połączonych podatnie z dźwigarami głównymi.

Reasumując, temat podjęty przez autora rozprawy należy uznać za ważny i aktualny dla potrzeb polskiego mostownictwa oraz bezpieczeństwa budowanych i remontowanych obiektów mostowych.

2.2. Teza pracy

Teza pracy jest jednoznacznie sformułowana następująco: „Próbné obciążenie jest doświadczeniem identyfikacyjnym, w którym model obliczeniowy powinien odzwierciedlać rzeczywistą pracę konstrukcji. Występujące różnice relacji ugięć w badanych obiektach rzeczywistych i modelach obliczeniowych nie są zapasem nośności konstrukcji rzeczywistej, lecz modelu obliczeniowego. Dlatego badania próbných obciążeń należy przeprowadzać opierając się na adekwatnym modelu obliczeniowym eliminującym różnice sztywności pomiędzy obiektem rzeczywistym i obliczeniowym”.

Teza ta jest oryginalna, a jej udowodnienie konsekwentnie wypełniają kolejne rozdziały opiniowanej pracy doktorskiej.

Osobiście mam uwagę do powtarzanego kategorycznie kilka razy w tekście pracy sformułowania, że różnice w ugięciach U_s i U_o nie są zapasem nośności rzeczywistej konstrukcji. Z pewnością nie jest takim zapasem wzrost sztywności spowodowany płytami chodnikowymi czy wyposażeniem mostu. Ale wzrost cech wytrzymałościowych betonu w czasie powoduje nie tylko wzrost sztywności EJ, ale także i wzrost wytrzymałości obliczeniowych betonu na ściskanie i rozciąganie, powodujący wzrost nośności przekrojów żelbetowych i sprężonych. Ten wzrost, niekoniecznie adekwatny do przyrostu sztywności EJ, jest jednak wyraźnie zauważalny – a to jest dodatkowa rezerwa nośności.

2.3. Ocena wartości naukowej rozprawy

Praca jest z zakresu mostownictwa. Mostownictwo jest dziedziną działalności naukowo-technicznej, w której obowiązuje znajomość wiedzy w stopniu dobrym – z wielu specjalności z obszaru budownictwa, mechaniki, geotechniki i nauk podstawowych. Nie jest to jednak dyscyplina dysertabilna i rzadko kiedy młody człowiek decyduje się na pracę doktorską z mostownictwa. Jest ona raczej domeną ludzi starszych, z odpowiednim stażem i dużym doświadczeniem.

Młodzi „mostowcy” doktoryzują się zazwyczaj z dziedziny nauk podstawowych, jak teoria sprężystości i plastyczności, dynamika i aerodynamika budowli, informatyka stosowana, teoria wrażliwości, inżynieria materiałowa itp. Stąd należy podkreślić dużą odwagę doktoranta w

podjęciu typowo mostowego tematu pracy doktorskiej. Z tego też punktu widzenia należy ją ocenić.

Pracę cechuje przede wszystkim bardzo logiczny układ, systematyczność w postępowaniu i chęć dopowiedzenia każdego wątku do końca. Nieraz nawet z przesadą, jak np. w pkt. 7.3.3, czy 8.2.3 i 8.2.4. Cel pracy jest bardzo praktyczny, wnikliwość autora ponad przeciętną. Zdarza się, że autor czasem przekracza dopuszczalne ramy w analizie jak np. w rozdziale 4.4.4, gdy liczy odchylenie standardowe $s(f)$ tylko z trzech prób i na tej podstawie wnioskuje o wskaźniku zmienności wytrzymałości $v(f)$ i w konsekwencji ocenie jednorodności i klasie wytrzymałości betonu. Co prawda błąd wynikły z tego podejścia nie jest znaczący. Przyjmując kryteria (4-6) – jak dla małej próby $n < 15$ – uzyskalibyśmy w tabelicy 4-13 charakterystyczne wytrzymałości f_{ck} na poziomie odpowiednio: 34,8; 43,0; 43,2; 49,8 MPa, zamiast: 37,1; 42,2; 43,0 i 49,2 MPa.

Podobnie niewłaściwie oceniono moduł sprężystości betonu E w tabelicy 4-14. Należało poprzestać na wartościach E_{cm} , gdyż takie są podawane w normach i Eurokodzie 2, a nie liczyć wartości charakterystycznego modułu sprężystości E_{ck} i jeszcze na podstawie odchylenia standardowego z 3 prób. Wartości te, f_{ck} i E_{ck} są następnie podawane jako wiążące na wykresie – rys. 4-42, a następnie w analizach pkt. 6.6 i na rys. 6-24÷6-29. Podejście tego typu nie zwiększa dokładności analiz, a wręcz – trochę je zniekształca.

Podobne uwagi można mieć do badań wytrzymałości betonu przedstawionych w tabl. 4-17÷4-20, gdzie dla 6 próbek (mała próbka $n < 15$) obliczono także odchylenie standardowe i w oparciu o nie szacowano f_{ck} i klasę wytrzymałości betonu. Tutaj błąd w ocenie tych wielkości jest mniejszy niż przy 3 próbkach, ale z naukowego punktu widzenia nie powinno to mieć miejsca. Z porównania danych w tablicach 4-13, 4-17, 4-18, 4-19 i 4-20 widać wyraźnie, jak rośnie wskaźnik zmienności $v(f)$ przy wzrastającej liczbie próbek, od 3 ($\bar{v}(f) = 8,0 \%$) przez 6 ($\bar{v}(f) = 8,5 \%$) do 12 ($\bar{v}(f) = 12,8 \%$).

Również niedokładnie i niepotrzebnie oszacowano wartości charakterystyczne E_{cmt} na rys. 4-67. Natomiast na rys. 4-68 i 4-69 zestawiono ze sobą prawidłowe wartości f_{cm} z nieprawidłowymi wartościami E_{cmt} . Różnice są nieduże, ale poprawności naukowej tu nie ma. Wartość niewłaściwą $E_{cmt} = 44,8 \text{ GPa}$ (zamiast $E_{cm} = 46,7 \text{ MPa}$) przyjęto w rozdziale 5 przy analizie modeli obliczeniowych.

Wykazane wyżej nieścisłości nie mają większego wpływu na przeprowadzone przez autora rozprawy analizy, ale zmieniają trochę proporcje ostatecznych wyników. Wyjaśnienia wymaga także obliczenie przez autora modułu sprężystości E_{cm} betonu. Autor przyjął obliczenie tej wartości w granicach natężeń $\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 0,4 f_{cm}$. Jest to zgodne z EC2, ale szczegółowe

instrukcje (np. Instrukcja 194 ITB) zakładają $\sigma_{\min} = 0,5 \text{ MPa}$, co autor wspomina na stronie 6-20. Wiadomo, że przy niskim naprężeniu $\sigma \leq 0,5 \text{ MPa}$, krzywa zależności $\sigma - \varepsilon$ zachowuje się na ogół niestabilnie. Jak sobie autor poradził z tym problemem?

Ważnym elementem pracy jest przeprowadzenie przez autora szczegółowej analizy teoretycznej problemu przez wykonanie obliczeń komputerowych dla 9-ciu modeli obliczeniowych w środowisku programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Wykazał tu autor dużą wiedzę i dużą pomysłowość. W efekcie udowodnił, że najlepsze dopasowanie ugięć obliczeniowych U_o do ugięć rzeczywistych U_s zachodzi dla modelu 5-bryłowego, klasy (e^3, p^3) . Drugi w kolejności okazał się model płytowy klasy $(e^2, p^2) - 3W4$, w którym grubości zastępcze płyt składowych dobrano tak, aby globalny moment bezwładności (względem osi poziomej) przekroju zastępczego był równy rzeczywistemu. Model ten, dzięki prostocie kształtowania czyni zadanie numeryczne o umiarkowanej wielkości, przy dużej poprawności otrzymanych przemieszczeń. Model ten jest zalecany przez autora rozprawy do analiz numerycznych podobnych (klasy „4”) obiektów mostowych.

Z innych osiągnięć naukowych autora należy wymienić:

- precyzyjne rozdzielenie zadań stojących przed:
 - modelem projektu budowlanego (MPB),
 - modelem obciążenia próbnego wstępnego (MOPW),
 - modelem obciążenia próbnego zweryfikowanego (MOPZ),
- precyzyjne zdefiniowane składowych modelu obliczeniowego mostu w postaci::
 - modelu geometrycznego,
 - modelu obciążenia,
 - modelu materiału,
- udowodnienie ewidentnego wpływu rosnącego w czasie modułu sprężystości betonu $E_{cm}(t)$ na wyniki obciążenia próbnego,
- udowodnienie ewidentnego wpływu wyposażenia obiektu mostowego (zwłaszcza sztywności płyty chodnikowej) na wyniki obciążenia próbnego,
- podanie własnej, unikalnej propozycji procedury modelowania i planowania badań odbiorczych obiektów mostowych klasy „4”.

Podsumowując, praca ma poważne walory naukowe i aplikacyjne, spełniając kryteria wymagane od prac doktorskich.

2.4. Ocena metodyki badań

Przeprowadzone w ramach opiniowanej pracy badania nie nasuwają większych zastrzeżeń, a nawet można je uznać za wzorcowe. Próbné obciążenia mostów zostały przeprowadzone fachowo, z zachowaniem wszelkich procedur. Na uwagę zasługują poszerzone badania odbiorcze wybranego obiektu, w którym zainstalowano w dźwigarze głównym czujnik do pomiaru „naprężeń” w betonie Model 4370 Geokon, czujnik do pomiaru odkształceń betonu zatopiony w konstrukcji Model 4200 Geokon – służący równocześnie do ciągłego pomiaru temperatury wnętrza betonowego – oraz jednokanałowy rejestrator do pomiaru ciągłego Model 8001 Geokon. Czujnik 4200 Geokon posłużył autorowi w wygenerowaniu laboratoryjnych warunków przechowania próbek betonowych tak jakby tężały one we wnętrzu zabetonowanej konstrukcji.

Badania próbek betonowych – walców ϕ 15/30 cm – dla określenia wytrzymałości modułu sprężystości betonu w funkcji czasu i warunków dojrzewania przeprowadzono zgodnie z aktualnymi normami PN-EN. Wyniki wszystkich badań zostały w rozprawie szczegółowo udokumentowane i przeanalizowane.

3. Ocena strony formalnej pracy

Praca napisana jest czytelnie i starannie, dobrą polszczyzną. Niepotrzebne są liczne powtórzenia. Podsumowania cząstkowe zawarte po każdym rozdziale są cenne, ale w wielu przypadkach zawierają te same dane i podobne wnioski. Rysunki i tablice są bardzo przejrzyste, świadczące o dużym „uporządkowaniu” autora pracy. Do zauważalnych usterek natury formalnej należą:

- str. 2-5 - błąd na rys. 2-3, „słupki brązowe” nad konstrukcjami sprężonymi i zespolonymi są przedstawione,
- str. 3-1⁹ - jest: z pośród; ma być: spośród,
- str. 3-1¹⁶ - niefortunne zdanie: internet umożliwia dostęp do informacji, ale informacja to jeszcze nie wiedza,
- str. 3-5-4. akapit – jest: są; ma być: jest,
- str. 3-7⁶ - jest: które; ma być: według którego,
- str. 4-9⁹ - jest: procenta; ma być: stopnia,
- str. 4-11¹² - jest: konstrukcji; ma być: konstrukcjach,
- str. 4-17⁹ - to jest chyba niemożliwe, może $0,7 R_b^G$, a po 28 dniach też nie $2 R_b^G$; naparzenie powoduje raczej powolny przyrost wytrzymałości w późniejszym okresie czasu,

- str. 4-20-3. akapit – za duże uogólnienie, można je odnieść tylko do autostrady A-2,
- str. 4-21² - skreślić: z innymi drogami,
- str. 4-29₃ - dlaczego nie zastosowano 3 czujników elektrooporowych na obwodzie, jak to się powszechnie czyni?
- str. 4-32³ - przy betonach mostowych, wyższych wytrzymałości – to nie zachodzi,
- str. 4-32⁵ - nie: struktury, a: mikrostruktury,
- str. 4-33⁸ - nie: $\sigma = (0,3 \div 0,6) f_c$, ale $\sigma = 0 \div (0,3 \div 0,6) f_c$,
- str. 4-35₈ - skąd określenie $E_{ck,7}$?
- str. 4-36 - rys. 4-42 – naniesiono nie f_{cm} tylko f_{ck} (i to źle obliczone) oraz „charakterystyczne” E_{ck} jako E_{cm} !
- str. 4-36₃ - wzrost → w stosunku do czego? Obliczono to w stosunku do betonu klasy B35, a przecież badany beton był klasy C 35/45, czyli B45 – dla którego $E_{cm} = 37,8$ GPa; powinno być od $18,3 \div 24,5$ % lub lepiej, gdy porównać do $E_{cm}(t)$ – od $20,8 \div 32,5$ %,
- str. 4-43 - tabl. 4.15 - dodać: średnia masa płyty,
- str. 4-47-5. akapit – próbki przechowywane w laboratorium nie przeszły „rozgrzania” przez pierwsze 24 godziny, a mogło to mieć istotny wpływ na ich późniejszą wytrzymałość,
- str. 4-53-2. akapit – dlaczego nie od -8 °C do $+8$ °C, jak wynika z rys 4-61?
- str. 5-2-4. akapit – model materiału zależy jeszcze od składu mieszanki betonowej i właściwości jej składników (nie tylko rodzaju kruszywa),
- str. 5-16 - wzór (5-6) – to jest równanie różniczkowe płyty izotropowej, a nie ortotropowej; parametry $D_{xy} = D_{yx}$ i $D_1 = D_2$ nie występują w równaniu (5-6),
- str. 5-24₄ - jest: 4 W1; ma być: 4 W2,
- str. 5-29⁵ - jest: powłokowego; ma być: bryłowego,
- str. 5-33₁₁₋₁₂ - to jest znaczne ograniczenie modelu – przyjmowanie ciężaru proporcjonalnego do grubości wydzielonych elementów zastępczych, a nie ciężaru rzeczywistego,
- str. 6-5-3. akapit – dlaczego $E_c(t)$, a nie $E_{cm}(t)$?
- str. 6-6-2. akapit – duża przesada; nie większość i nie o 2 klasy,
- str. 6-6-3. akapit – nie podano wymagania normy PN-91/S-10042 – $n_w \leq 4,0$ %,
- str. 6-10 - akapity – $2 \div 4$ – ile wynosi σ_1 wg EC-2? Co to znaczy sieczny, przedziałowy moduł sprężystości? może to jest moduł styczny z rys. 6-11 do 6-14?
- str. 6-11÷6-13 – skąd takie „piki” na liniach żółtych rys. 6-11 do 6-14?
- str. 6-14 – rys. 6-15 - nieczytelny,

- str. 6-14 – koniec 1. akapitu – to jest nieprawda, znam przypadki, że jest inaczej,
- str. 6-14₃ - wytrzymałość długotrwała to jest coś innego (wytrzymałość pod stałym obciążeniem, zależna od poziomu tego obciążenia i czasu jego działania),
- str. 6-15² - dodać: je,
- str. 6-15⁴ - w stosunku do czego? Czy do wytrzymałości 3-dniowej?
- str. 6-16 – wzór 6-8 – nie jest autorstwa wymienionych autorów, był znany od dawna w normie PN-76/B-06250,
- str. 6-19₉ - przestawić: [109] i stwierdza
- str. 6-23÷6-28 – wartość tych porównań prognostycznych jest mała, bo nie są one niezależne; wszystkie są zależne od współczynnika β (t) wg EC-2,
- str. 6-30-4. akapit – za daleko idące wnioski,
- str. 8-2-1. akapit – dlaczego $l_t \leq 20,0$ m, a nie $l_t \leq 30,0$ m².

Wykaz literatury powinien być rozdzielony na publikacje, normy i raporty z badań.

Szereg poprawek natury stylistycznej naniesiono w tekście rozprawy.

4. Uwagi krytyczne

Większość szczegółowych uwag krytycznych podano w pkt. 2.3. Ocena wartości naukowej rozprawy. Autor recenzji liczy, że doktorant się do nich ustosunkuje, podobnie jak do uwag natury formalnej (pkt. 3 recenzji).

Uwaga krytyczna natury ogólnej jest taka, że doktorant – z uwagi na specyfikę pracy – rozważył bardzo szeroki wachlarz zagadnień, którego czasami nie były jego specjalnością naukową (jak np. zagadnienia związane z technologią betonów mostowych) i które zbyt pochopnie oceniał – jak np. b. częste osiąganie przez betony mostowe wysokich wytrzymałości, znacznie przekraczających projektowane klasy wytrzymałości betonu. Niestety nie zawsze ma to miejsce, co jest przyczyną częstych ekspertyz. Ponadto osiąganie wysokich wytrzymałości np. przez dodatek mikrokrzemionki do składu mieszanki betonowej daje niską nasiąkliwość, ale też niską mrozoodporność na skutek zbyt szczelnej struktury betonu.

5. Wniosek końcowy

Opiniowana praca doktorska mgr inż. Piotra Łazińskiego pt. „Procedura modelowania obiektów rzeczywistych w postaci pewnego typu obiektów mostowych” wykonana jest na dobrym, naukowym poziomie i dotyczy ważnego działu mostownictwa – weryfikacji stanu bezpieczeństwa i przydatności obiektów mostowych do eksploatacji. Doktorant wykazał się dużą

wiedzą, systematycznością i wnikliwością w przeprowadzanych badaniach i analizach. Pracę wykonał samodzielnie, udowodnił, że jest przygotowany do rozwiązywania skomplikowanych zadań naukowych.

Uważa zatem, że praca ta stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe i istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej budownictwo – specjalność budowa mostów, spełniając wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Piotra Łazińskiego do publicznej obrony rozprawy.

