

Maciej MALINOWSKI¹
Andrzej AMBROZIAK²

OCENA NOŚNOŚCI STAREGO MOSTU ŁUKOWEGO W JAGODNIKU

1. Wstęp

Powstające ciekawe i innowacyjne nowe obiekty mostowe świadczą o ciągłym i dynamicznym rozwoju inżynierii mostowej w Polsce [1]. Oprócz powstających nowych konstrukcji, ważnym aspektem jest także zachowanie w należytym stanie technicznym istniejących obiektów mostowych, które wymagają podjęcia działań związanych z naprawą, przebudową lub remontem. Długi czas eksploatacji, zmienność obciążeń jak i wady projektowe i eksploatacyjne przyczyniają się do przyspieszonego procesu degradacji. Określenie nośności i przydatności eksploatacyjnej obiektów mostowych jest koniecznym elementem ocen, opinii i ekspertyz technicznych, które w przypadku nadmiernych uszkodzeń lub wad wskazują konieczność napraw, wzmocnień, podjęcia decyzji o wymianie elementów konstrukcyjnych lub nawet wyłączenia z eksploatacji obiektu. Ogólne zasady oraz reguły wykorzystywane do prawidłowej oceny nośności obiektów mostowych zebrał i przedstawił Hołowaty [2]. Zobel i inni [3] przedstawili szczegółowo metodę określania trwałości mostów drogowych, natomiast Bień [4] opisał zjawiska degradacji i uszkodzenia kolejowych obiektów mostowych. Literatura techniczna i naukowa z zakresu tematyki ocen nośności obiektów mostowych, starych i tych nowo wybudowanych jest obszerna, nie mniej jednak warto zwrócić uwagę, na kilka wybranych pozycji literaturowych związanych ze starymi obiektami mostowymi. Malinowski i Klocek [5] dokonali oceny trwałości zmęczeniowej blachownicowego mostu kolejowego z 1950 r. Chróścielewski i inni [6, 7] przedstawili ocenę nośności uszkodzonego wiaduktu w stanie awaryjnym nad Obwodnicą Gdańska oraz dokonali oceny nośności ponad 100-letniego wiaduktu kolejowego w Bydgoszczy. Rabięga i inni [8] opisali historię i rozwiązanie konstrukcyjne ponad 100 letniego mostu oraz przedstawili ocenę stanu technicznego wraz z wynikami badań stali konstrukcyjnej oraz analizą statyczną i dynamiczną. Józwiak-Niedźwiecka i Tucholsk [9] podjęli się analizy mikrostruktury starego betonu wbudowanego w wiadukt żelbetowy. Karaś [10] przedstawił proces przebudowy mostu typu Hennebique w Lublinie. Siwowski i Kulpa [11,12] przedstawili ocenę trwałości zmęczeniowej mostu stalowego według EC. Marszałek

¹ mgr inż. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

² dr hab. inż., prof. uczelni, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

i Piechota [13] opisują metodykę szybkiej oceny nośności mostów składanych opartych na podporach pływających. Jakiel i inni [14] przedstawili analizę nośności szczególnego przypadku płytowego mostu drogowego, zbrojonego szynami kolejowymi. Kamiński i inni [15] dokonali oceny stanu technicznego i przydatności użytkowej wieloprzęsłowego drogowego obiektu kratownicowego pochodzącego z lat 30. XX wieku. Furtak [16] przedstawił ocenę techniczną mostu drogowego po czterdziestu latach eksploatacji. Żółtowski i Binczyk [17] opisali główne przyczyny degradacji i awarii mostu Cłowego w Szczecinie. Rajchel i inni [18] dokonali oceny stanu technicznego 50-letniej konstrukcji stalowej prześel mostu drogowego. Wolert i inni [19] opisują proces badań nieniszczących 100-letniego mostu płytowego żelbetowej. Powyższy, zwięzły przegląd literatury wskazuje, że tematyka oceny nośności (starych jak i nowych) obiektów mostowych chętnie podejmowana jest przez liczne grono inżynierskie i naukowe.

2. Opis mostu łukowego w Jagodniku



Rysunek 1. Most w Jagodniku w ciągu drogi powiatowej nr 1131N: a) przed przebudową, b) w trakcie przebudowy, c) po przebudowie i oddaniu do użytkowania



Analizowany obiekt mostowy zlokalizowany jest nad leśnym kanionem w miejscowości Jagodnik, koło Elbląga w północnej Polsce, gdzie przepływa rzeka Kumiel (ciek wodny, patrz rys. 1). Konstrukcja środkowego przęsła mostu (o rozpiętości około 12,95 m) to płyta żelbetowa, połączona monolitycznie z pionowymi tarczami, które są wsparte na łuku płytowym. Most łukowy wybudowany w 1925 r. przez firmę budowlaną Karl Metzger & Co. (patrz s. 181 [20]). W 1925 roku Jagodnik (Berendshagen) był częścią dzisiejszego miasta Elbląg w Polsce. Zły stan techniczny mostu wskazywał potrzebę podjęcia działań zmierzających do przywrócenia mu należytego stanu technicznego w szczególności przeprowadzenia szczegółowej oceny technicznej obiektu jak i wyznaczenia właściwości materiałów, z których został zbudowany (patrz m.in. [21,22]) w celu przygotowania projektu przebudowy obiektu.

3. Badania laboratoryjne

W celu wyznaczenia właściwości i parametrów mechanicznych starego betonu i stali zbrojeniowej wbudowanej w obiekt mostowy przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych opisanych w niniejszym rozdziale. W związku z tym, z elementów konstrukcyjnych żeber bocznych (elementów połączonych z płytą górną podtrzymujących płytę pomostu) pobrano próbki elementów betonowych z których wykonano odwierty rdzeniowe techniką diamentową. Wymiary rdzeni betonowych do badań wytrzymałości na ściskanie betonu zostały określone zgodnie z normą PN-EN 12504-1 [23], przy stosunku $L/D = 1,0$. Wyniki wytrzymałości określone dla rdzeni betonowych $f_{c,cycl 100}$ są porównywalne z wytrzymałością $f_{c,cube}$ próbek betonowych o wymiarach $15 \times 15 \times 15$ cm ($f_{c,cube} = f_{c,cycl 100}$). Z wykonanych odwiertów rdzeniowych przygotowano dwa rodzaje próbek cylindrycznych: o średnicy $D = 100$ mm ($f_{is,cycl 100}$) i stosunku długości do średnicy rdzenia $L/D = 1$ (do testów jednoosiowego ściskania) oraz $L/D = 1,5$ (do badania modułu sprężystości).

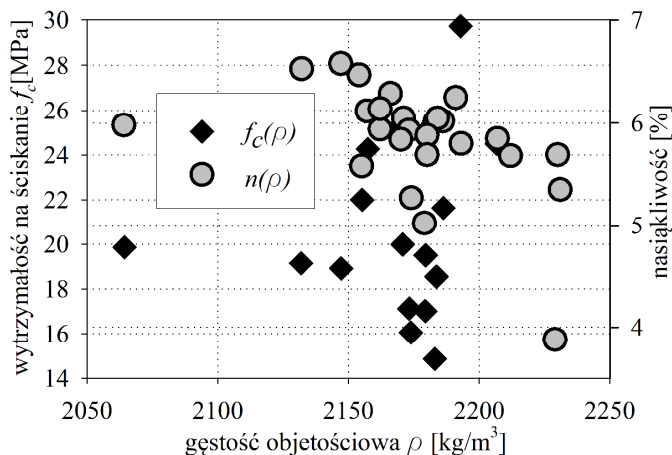
3.1. Pomiar gęstości, nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie

Do wyznaczenia gęstości starego betonu posłużono się metodą opisaną w normie PN-EN 12390-7 [24], według której próbkę suszono w wentylowanej suszarce w temperaturze $105 \pm 5^\circ\text{C}$ do zmiany masy o mniej niż 0,2%. Przed ważeniem każdą próbkę schładzano do temperatury bliskiej pokojowej w suchym, hermetycznym naczyniu. Badania nasiąkliwości przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 13369, załącznik G [25]. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, iż średnia gęstość objętościową (w stanie suchym) wynosi 2165 kg/cm^3 (minimalna wartość 2064 kg/cm^3 , maksymalna 2231 kg/cm^3 , patrz rys. 2). Zgodnie z normą PN-EN 206 [26], badany stary beton można zakwalifikować jako beton o normalnym ciężarze, gdyż gęstość objętościowa w stanie suchym mieści się w zakresie od 2000 kg/m^3 do 2600 kg/m^3 . Badania nasiąkliwości wykazały, iż średnia nasiąkliwość starego betonu jest na poziomie 5,8% (w zakresie od 3,9 do 6,6%, patrz rys. 1). Norma PN-S-10040 [27] wskazuje, że nasiąkliwość betonu stosowanego w konstrukcjach mostowych nie powinna być większa niż 5%.

Testy jednoosiowego ściskania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej sterowanej komputerowo ze stałą prędkością obciążenia i zakresie $0,6 \text{ MPa/s}$ zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [28]. Średnia charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie próbek starego betonu wynosiła $f_{c,m(n),is} = f_{is,cycl100} = 20,5 \text{ MPa}$, przy czym minimalna wyznaczona wytrzymałość wynosiła $f_{c,i,lowest} = 14,9 \text{ MPa}$, patrz rys. 1. Na duży rozrzut wytrzymałości wpływ miały zidentyfikowane po badaniu zanieczyszczenia znajdujące się w próbkach betonu, patrz rys. 3. Wytyczne dotyczące wykonywania



konstrukcji żelbetowych [29] wydane w 1916 r. przez Niemiecki Komitet ds. Betonów Konstrukcyjnych określały dwie główne klasy wytrzymałości betonu 14,7 MPa (150 kg/cm²) i 17,7 MPa (180 kg/cm²). Natomiast przepisy [30] wskazywały najwyższą wytrzymałość betonu na poziomie 19,62 MPa (200 kg/cm²).



Rysunek 2. Wytrzymałość na ściskanie i nasiąkliwość w odniesieniu do gęstości objętościowej



Rysunek 3. Widok na próbki starego betonu po badaniach wytrzymałościowych

Na podstawie przeprowadzonych testów jednoosiowego ściskania oraz normy PN-EN 13791 [31] wyznaczono charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie w konstrukcji $f_{ck, is, cube}$ a następnie obliczeniową wytrzymałość betonu w konstrukcji $f_{cd, is}$ według zależności [22]:

$$f_{ck, is, cube} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{c, m(n), is} - k_n \cdot s \\ f_{c, is, lowest} + M \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20,5 - 1,81 \cdot 1 \\ 14,9 + 2 \end{array} \right\} = 16,9 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$f_{cd, is} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck, is}}{\gamma_c} = 1,0 \frac{0,8 \cdot 16,9}{1,4} = 9,7 \text{ MPa}$$

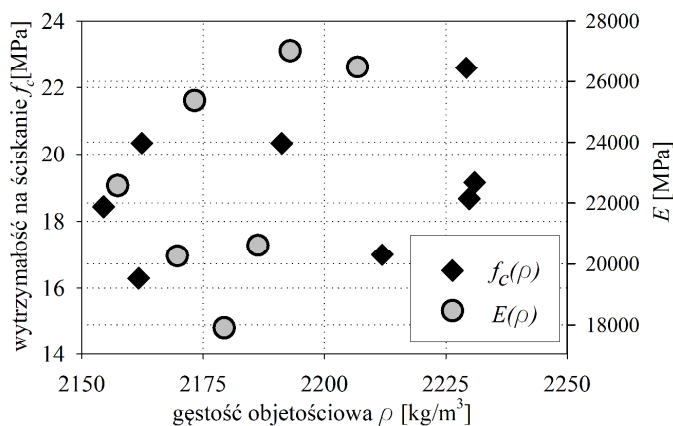
gdzie $f_{c, m(n), is}$ – średnia wartość wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, k_n – współczynnik zależny od liczby wyników badań, s – odchylenie standardowe,



$f_{c, is, lowest}$ – najmniejsza z oznaczonych wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, M – współczynnik korekcyjny, γ_c – współczynnik bezpieczeństwa, według aneksu krajowego PN-EN 1992-1-1 [32].

3.2. Mrozoodporność i moduł sprężystości

Mrozoodporność starego betonu wyznaczono zgodnie z wytycznymi podanymi w normie PN-B-06250 [33]. Zastosowano komorę zamrażalniczą z systemem chłodzenia i ogrzewania sterowanym temperaturowo i czasowo. Przeprowadzono 50 cykli zamrażania, które składały się z zamrażania w temperaturze $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 4 godziny i rozmrażania przez całkowite zanurzenie w wodzie o temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 4 godziny. Średnia wytrzymałość na ściskanie po przeprowadzeniu 50 zamrażania i odmrażania wynosiła $f_{ck, cycl 100}^{F50} = 17,9 \text{ MPa}$, patrz rys. 4. W zakresie oceny mrozoodporności zgodnie z normą PN-B-06250 [33] wytrzymałość na ściskanie nie spadła o więcej niż 20% w stosunku do próbek bazowych, oraz próbki nie wykazywały pęknięć, tak więc badany stary beton można uznać za spełniający stopień mrozoodporności F50 [21].



Rysunek 4. Wytrzymałość na ściskanie po badaniu mrozoodporności i moduł sprężystości w odniesieniu do gęstości objętościowej

Do wyznaczenia modułu sprężystości wykorzystano wytyczne normy ASTM C469M [34]. Na podstawie przeprowadzonych testów sieczny moduł sprężystości, w zakresie od 0 do 40% wytrzymałości granicznej (wg normy PN-EN 1992-1-1 [35]), wynosi 22,9 GPa, patrz rys. 3. Przepisy [30] opublikowane w 1926 roku wskazywały, że dla wytrzymałości betonu na ściskanie większej lub równej 13,73 MPa należy przyjmować moduł sprężystości równy 14 715 MPa ($150\,000 \text{ kg/cm}^2$).

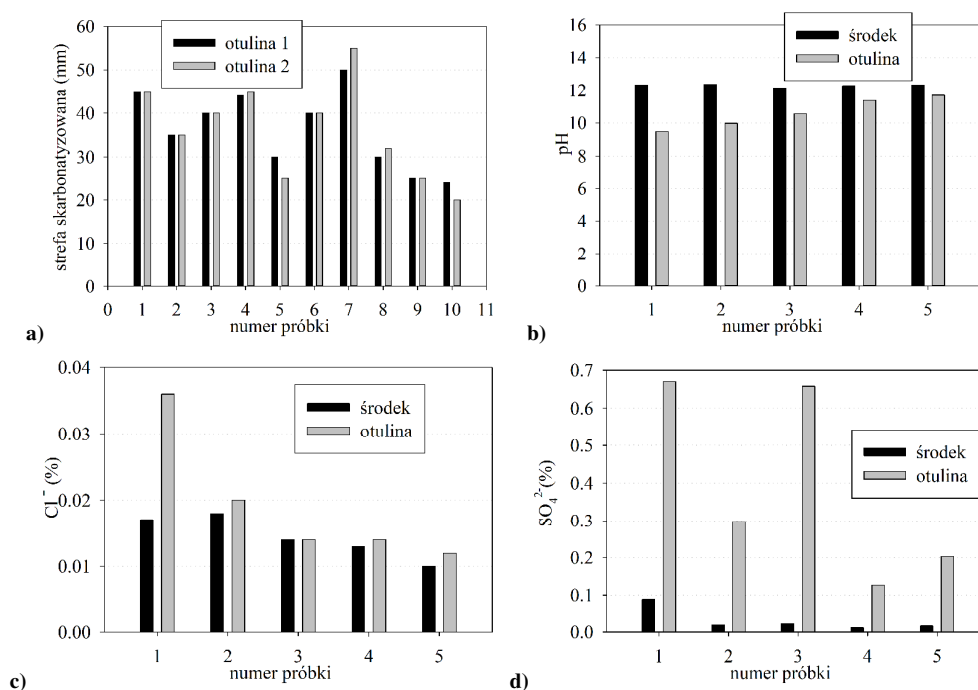
3.3. Badanie głębokości karbonatyzacji, pH, zawartości chlorków Cl^- i siarczków SO_4^{2-}

Grubość badanych elementów betonowych wynosiła około 15 cm (rys. 5), tak więc możliwy był pomiar głębokości karbonatyzacji na dwóch powierzchniach (oznaczonych na rys. 6a jako 'otulina 1' i 'otulina 2'). Głębokość karbonatyzacji zmierzono przez nałożenie wskaźnika fenoloftaleinowego na powierzchnię świeżego przełamu próbki [36], patrz rys. 5. Głębokość karbonatyzacji próbek betonowych zawiera się w zakresie od około 20 mm do 55 mm (patrz rys. 6a), a średnia wartość wynosi 36 mm.





Rysunek 5. Badanie głębokości karbonatyzacji

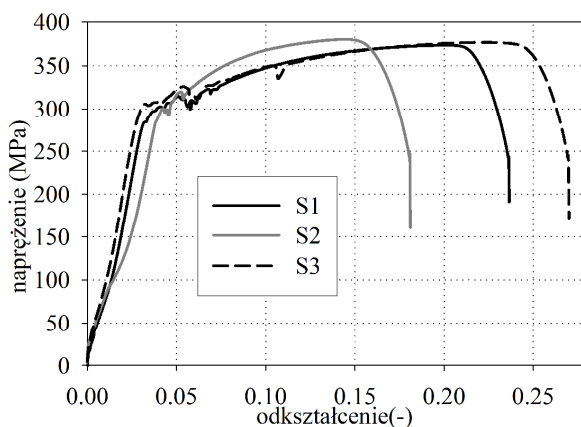
Rysunek 6. Wyniki badania głębokości karbonatyzacji (a), pH (b), zawartości chlorków Cl⁻ (c) i siarczków SO₄²⁻ (d)

Pomiar pH wykonano zgodnie z PN-EN ISO 10523 [37]. Wyznaczono, iż średnie pH w warstwie otuliny betonu wynosi 10,6 natomiast w części środkowej próbek starego betonu wynosi 12,3, patrz rys. 6b. Odczyn pH świeżego betonu wynosi 11,8÷12,6. Przyjmuje się, iż spadek zasadowości betonu do pH 10÷11,8 powoduje utratę stabilności warstewki pasywnej na stali. Badanie zawartości chlorków Cl⁻ i siarczków SO₄²⁻ wykonano zgodnie z normą PN-EN 1744-1+A1 [38]. Wyznaczone wartości zawartości chlorków Cl⁻ i siarczków SO₄²⁻ w suchej masie (patrz rys. 6c i 6d) przeliczono na średnią zawartość jonów chlorkowych i siarczanowych w betonie jako procent masy cementu. Zawartość chlorków w próbkach betonu wyrażona jako procent jonów chlorkowych w masie cementu wynosi 0,14%, a w warstwie otuliny i 0,10% w części środkowej próbek betonu, i nie przekracza granicznej wartości 0,2% dla konstrukcji żelbetowych określonej w normie PN-EN 206 [26]. Średnia procentowa zawartość jonów siarczanowych SO₄²⁻ w masie cementu wynosi 2,83% dla

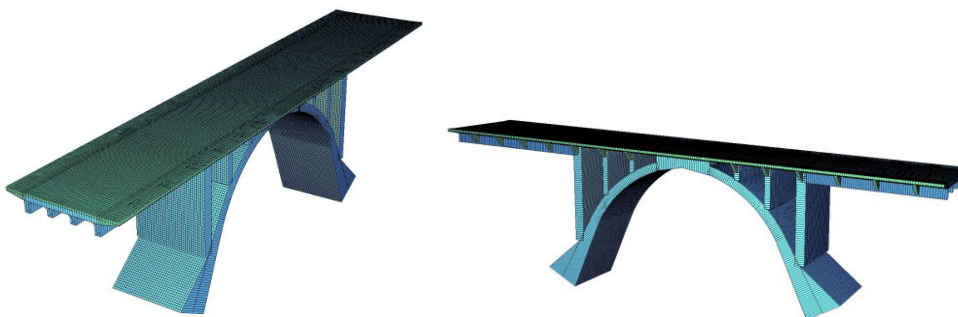
otuliny i 0,22% dla warstwy środkowej próbek betonu i nie przekraczały 4% masy cementu w przeliczeniu na całkowitą ilość siarczanu rozpuszczalnego podanego w normie BS 8110-1:1985 [39].

3.4. Badanie wytrzymałości stali na rozciąganie

Pobrane z elementów konstrukcyjnych próbki prętów stalowych poddano badaniu zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1 [40]. Określona w badaniach laboratoryjnych charakterystyczna średnia wartość granicy plastyczności wynosi $f_{yk} = 291$ MPa, patrz rys. 7. W przepisach [30] wskazano, iż granicy plastyczności prętów zbrojeniowych stosowanych do wykonywania konstrukcji żelbetowych nie powinna być mniejsza niż 294 MPa (3000 kg/cm^2). Na tej podstawie można wyznaczyć obliczeniową wytrzymałość na rozciąganie w konstrukcji obiektu mostowego jako $f_{yd} = f_{yk}/1,15 = 257$ MPa.



Rysunek 7. Wykres naprężenie-odkształcenie badanej stali zbrojeniowej



Rysunek 8. Widok na trójwymiarowy model numeryczny mostu

4. Analiza statyczno-wytrzymałościowa

Wykonano trójwymiarowy model MES mostu łukowego (patrz rys. 8) oraz przeprowadzono obliczenia numeryczne i analizy analityczne dla klasy obciążenia ruchem C według normy PN-S-10030 [41]. W obliczeniach numerycznych wykorzystano system SOFiSTiK. Model obliczeniowy ustroju przyjęto, jako przestrzenny układy płytowo-belkowy, w którym wykorzystano 4-węzłowe, powłokowe elementy skończone oraz 1-wymiarowe, 2-węzłowe



przestrzenne elementy belkowe typu Timoszenki klasy C^0 o liniowych funkcjach kształtu. Model obliczeniowy składał się z: 42223 węzłów, 776 elementów belkowych, 45075 elementów powłokowych oraz 940 więzów podporowych. W modelu obliczeniowym uwzględniono wzajemne położenie poszczególnych elementów konstrukcyjnych (mimośrod) oraz parametry geometryczne i materiałowe przyjęte na podstawie własnych pomiarów inwentaryzacyjnych oraz na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Na podstawie obliczeń numerycznych i analitycznych wyznaczono ekstremalne wartości sił wewnętrznych i naprężeń w konstrukcji nośnej. Ekstremalne wartości momentów zginających i sił normalnych w konstrukcji nośnej w reprezentatywnych przekrojach, z najbardziej niekorzystnych kombinacji obciążeń stałych i eksploatacyjnych wg PN-S-10030 [41] przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wyniki ekstremalnych sił wewnętrznych i analizy nośności

Obciążenia	Przęsło skrajne		Przęsło środkowe – łukowe		
	dz. skrajny	dz. wew.	plyta pomostowa	łuk	
	M (kNm)	M (kNm)	M (kNm)	M (kNm)	N (kN)
L1 – obciążenie charakterystyczne ciężarem własnym	9.8	10.0	1.3	56.3	560.4
L2 – obciążenie charakterystyczne ciężarem wyposażenia	5.1	6.1	0.8	16.2	115.0
L3 – obciążenie charakterystyczne ruchome, normowe q	1.5	1.9	0.5	6.8	37.6
L4 – obciążenie charakterystyczne ruchome, normowe K bez wsp. dyn ϕ	17.0	15.1	9.2	35.6	196.8
Suma obciążeń $L1 \div L4$	33.3	33.1	11.8	114.8	909.7
wsp. dynamiczny ϕ	1.318		1.325	1.284	
razem wartości obliczeniowe ze wsp. dynamicznym ϕ	55.1	53.8	21.7	172.6	1280.3

Tablica 2. Wyniki ekstremalnych naprężeń w konstrukcji w stali zbrojeniowej i betonie

Właściwości	Przęsło skrajne		Przęsło środkowe – łukowe	
	dz. skrajny	dz. wew.	plyta pomostowa	łuk
zbrojenie (dolne)	6#20		14#12	5#12/m
obliczeniowa wytrzymałość stali	$f_{yd} = 257$ MPa			
obliczeniowa wytrzymałość betonu	$f_{cd} = 9.70$ MPa			
naprężenia w stali zbrojeniowej [MPa]	32.7	31.9	78.6	145.6
naprężenia w betonie [MPa]	2.2	2.2	3.3	9.3

Wyznaczone maksymalne naprężenie w stalowych prętach zbrojeniowych w elementach konstrukcyjnych wynosi 145,6 MPa, co stanowi około 57% obliczeniowej granicy plastyczności zbrojenia, $f_{yd} = 257$ MPa, patrz tablica 2. Naprężenia wyliczono przy założeniu podanego w tablicy 2 stopnia zbrojenia, określonego na podstawie odkrywek inwentaryzacyjnych. Oszacowane maksymalne naprężenie ściskające w betonie wynosi 9,3 MPa, co wynosi około 96% obliczeniowej wytrzymałości betonu na ściskanie $f_{cd} = 9,7$ MPa.



5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań i wykonanej analizy statyczno-wytrzymałościowej (patrz m.in. [21,22]) można sformułować następujące wnioski:

- Analiza statyczno-wytrzymałościowa wykazała, że 95-letnia betonowa konstrukcja mostu łukowego spełnia wymagania SGN i SGU w klasie obciążenia ruchem C wg normy PN-S-10030 [41].
- Badane próbki rdzeniowe starego betonu charakteryzowały się dużym rozrzutem wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 14,9 MPa do 29,7 MPa.
- W badanych próbkach betonu stwierdzono dużą liczbę zanieczyszczeń, które zawierały fragmenty drewna, kawałki gliny, gruboziarniste kruszywa z pustkami i porami.
- Próby rozciągania stali zbrojeniowej potwierdziły, że wyznaczona w badaniach wartość charakterystycznej granicy plastyczności jest skorelowana z przepisami [30] wydanymi w okresie budowy mostu łukowego w Jagodniku.
- Średnia gęstość w stanie suchym starego betonu określona w badaniach wynosi 2165 kg/m³. Stary beton spełnia warunki dla kategorii betonu normalnego wg normy PN-EN 206 [26].
- Wyznaczona charakterystyczna wytrzymałość starego betonu na ściskanie w konstrukcji wynosi 16,9 MPa, zgodnie z normą PN-EN 13791 [31]. Obliczona i zastosowana w analizie statyczno-wytrzymałościowej wytrzymałość na ściskanie starego betonu wynosi 9,7 MPa.
- Średnia wartość wyznaczonego modułu sprężystości wyniosła 22,9GPa i jest o około 15% niższa od wartości określonej w normie PN-EN 1992-2 [42] dla klasy betonu C12/15.
- Średnia wartość pH wynosiła 10,6 i 12,3 odpowiednio dla warstwy wierzchniej (otuliny) i warstwy środkowej w badanych próbkach starego betonu. Otrzymane wartości pH starego betonu wskazują na brak korozji stalowych prętów zbrojeniowych.
- Zawartość procentowa chlorków w starym betonie określona na podstawie badań laboratoryjnych nie przekracza granicznej wartości 0,2% dla konstrukcji żelbetowych określonej w normie PN-EN 206 [26]. Elementy starego betonu poddane badaniom nie był narażony na działanie chlorków. Niskie stężenie jonów siarczanowych w starych próbkach betonu wskazywało, że niskie zanieczyszczenie było spowodowane źródłami zewnętrznymi.
- Przeprowadzone badania starego betonu i stali oraz wykonane obliczenia statyczno-wytrzymałościowe potwierdziły słuszność przyjętych rozwiązań projektowych. W ramach przebudowy mostu, zaprojektowano na istniejącej starej konstrukcji pomostu nową płytę pomostu (dodatkowa warstwa żelbetowa) oraz zabezpieczenia całej powierzchni starego betonu zaprawami naprawczymi.

Literatura

- [1] BILISZCZUK J., Inżynieria mostowa w Polsce Niepodległej (1918–2018). Inżynieria i Bud 2018;74:371–82.
- [2] HOŁOWATY J., Sposób oceny rezerw nośności mostów dźwigarowych. Mosty 2011:44–7.
- [3] ZOBEL H, ALKHAFABI T, WRÓBEL M., Metoda określania trwałości mostów drogowych. Inżynieria i Bud 2017;11:582–7.



- [4] BIEN J., Zjawiska degradacji i uszkodzenia kolejowych obiektów mostowych. *Przegląd Komun* 2010;34–40.
- [5] MALINOWSKI M, KLOCEK T., O możliwościach eksploatacji uszkodzonych mostów stalowych. *Inżynieria i Bud* 1995;268–70.
- [6] CHRÓŚCIELEWSKI J, BANAŚ A, MALINOWSKI M, SITARSKI A, SOCHACKI J., Stan awaryjny wiaduktu kolejowego w Bydgoszczy. *Przegląd Bud* 2014;85:44–50.
- [7] CHRÓŚCIELEWSKI J, BANAŚ A, MALINOWSKI M., Awaria wiaduktu nad obwodnicą Trójmiasta. *Inżynieria i Bud* 2013;69:400–4.
- [8] RABIEGA J., SADOWSKI K., BILISZCZUK J. HP. Evaluation of bearing capacity of Zwierzyniecki Bridge across old Odra river in Wrocław (Ocena nośności mostu Zwierzynieckiego nad Starą Odrą we Wrocławiu). *Inżynieria i Bud* 2005;61:265–8.
- [9] JÓŹWIAK-NIEDŹWIECKA D, TUCHOLSKI Z., Reinforced concrete viaduct from beginning of the 20th century – Microstructure analysis of 100 years old concrete (Wiadukt żelbetowy z początków XX wieku - Analiza mikrostruktury stuletniego betonu). *Drog i Most* 2010:23–38.
- [10] KARAS S., Unique Hennebique Bridges in Lublin, Poland. *Am J Civ Eng Archit* 2013;1:47–51. <https://doi.org/10.12691/ajcea-1-2-5>.
- [11] SIWOWSKI T, KULPA M., Ocena trwałości zmęczeniowej istniejącego mostu stalowego według eurokodów. *Czas Inżynierii Lądowej, Środowiska i Archit* 2014;z. 61, nr:269–85.
- [12] KULPA M, SIWOWSKI T., Ocena trwałości zmęczeniowej pomostu ortotropowego mostu Grota-Roweckiego w Warszawie. *Arch Inst Inżynierii Lądowej* 2014:59–71.
- [13] MARSZAŁEK J, PIECHOTA M., Metoda szybkiej oceny nośności mostów składanych opartych na podporach pływających. *Bull Mil Univ Technol* 2014;63:135–45. <https://doi.org/10.5604/12345865.1131468>.
- [14] JAKIEL P, LABISZ A, NIEROBIŚ A., Ocena nośności żelbetowego mostu płytowego z nietypowym zbrojeniem. *Arch Inst Inżynierii Lądowej* 2014:27–43.
- [15] KAMIŃSKI T, BIEN J, HILDEBRAND M, KUŻAWA M, RABIEGA J., Ocena kondycji mostu kratownicowego przez Wisłę w Puławach. *Wrocławskie Dni Most., Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne*; 2016.
- [16] FURTAK K., Ocena możliwości eksploatacyjnych mostu drogowego po czterdziestu latach użytkowania. *Arch Inst Inżynierii Lądowej* 2017:89–99. <https://doi.org/10.21008/j.1897-4007.2017.24.06>.
- [17] ŻÓŁTOWSKI K, BINCZYK M., Awarie mostu Cłowego w Szczecinie. *Mater Bud* 2018;1:88–90. <https://doi.org/10.15199/33.2018.01.26>.
- [18] RAJCHEL M, KULPA M, SIWOWSKI T., Ocena stanu technicznego i nośności mostu drogowego o stalowej konstrukcji powłokowej. *Inżynieria i Bud* 2020; 76:220–7.
- [19] WOLERT PJ, KOŁODZIEJCZYK MK, STALLINGS JM, NOWAK AS., Non-destructive Testing of a 100-Year-Old Reinforced Concrete Flat Slab Bridge. *Front Built Environ* 2020;6:1–12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00031>.
- [20] LOCKEMANN T., *Elbing*. Berlin-Halensee: Deutscher Architectur und Industrie – Verlag; 1926.
- [21] AMBROZIAK A, HAUSTEIN E, NIEDOSTATKIEWICZ M., Chemical, Physical, and Mechanical Properties of 95-Year-Old Concrete Built-In Arch Bridge. *Materials (Basel)* 2020;14:20. <https://doi.org/10.3390/ma14010020>.
- [22] AMBROZIAK A, MALINOWSKI M., A 95-Year-Old Concrete Arch Bridge: From Materials Characterization to Structural Analysis. *Materials (Basel)* 2021;14:1744. <https://doi.org/10.3390/ma14071744>.



- [23] PN-EN 12504-1 Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Próbki rdzeniowe – Pobieranie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2009.
- [24] PN-EN 12390-7 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2019.
- [25] PN-EN 13369 Wspólne wymagania dla prefabrykatów z betonu. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2018.
- [26] PN-EN 206+A2 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2021.
- [27] PN-S-10040 Bridges – Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete structures – Requirements and testings. Warsaw, Poland: PKN (Polish Committee for Standardization); 1999.
- [28] PN-EN 12390-3 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2009.
- [29] Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton. Berlin, Germany: DAfStB (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton); 1916.
- [30] Rules for the construction and maintenance of road bridges (Przepisy o budowie i utrzymaniu mostów drogowych). Warszawa: Pomorska Drukarnia Rolnicza SA; 1926.
- [31] PN-EN 13791 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2019.
- [32] PN-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Warsaw, Poland: PKN (Polish Committee for Standardization); 2008.
- [33] PN-88/B-06250 Normal concrete. Warsaw, Poland: PKN (Polish Committee for Standardization); 1988.
- [34] ASTM C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International (American Society for Testing and Materials); 2014.
- [35] PN-EN 1992-1-1: 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1–2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe. n.d.
- [36] PN-EN 14630 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie głębokości karbonatyzacji w stwardniałym betonie metodą fenoloftaleinową. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2007.
- [37] PN-EN ISO 10523 Jakość wody – Oznaczanie pH. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2012.
- [38] PN-EN 1744-1+A1 Badania chemicznych właściwości kruszyw – Część 1: Analiza chemiczna. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2013.
- [39] BS 8110-1:1985 Structural use of concrete. Code of practice for design and construction. London, United Kingdom: BSI (British Standards Institution); 1985.
- [40] PN-EN ISO 6892-1 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2020.
- [41] PN-S-10030 Bridges. Loads. Warsaw, Poland: PKN (Polish Committee for Standardization); 1985.
- [42] EN 1992-2 Eurocode 2: Design of concrete structures – Concrete bridges – Design and detailing rules. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization; 2005.



ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF THE OLD ARCH BRIDGE IN JAGODNIK

Summary

The scope of the paper is to perform a structural analysis of a 95-year-old concrete arch bridge located in Jagodnik (Poland). The durability and strength of an old concrete built-in arch bridge are determined based on the selected mechanical, physical, and chemical properties. The laboratory testing program consisted of the following set of tests: measurements of the dry density and depth of carbonated zone, water absorption tests, determination of concrete compressive strength and frost resistance, determination of modulus of elasticity. The tests in uniaxial tension of steel reinforcements were performed to a determination of its mechanical properties. The properties of the old concrete and reinforcement were compared with the present and previous standard requirements and guidelines. Evaluation of the bearing capacity confirms that the bridge meets today's load requirements in terms of bearing capacity and serviceability state. The designed and performed reconstruction of structural elements show how combining numerical modelling and laboratory tests can contribute to the preservation of an old arch bridge structure.

