

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG^{1)*}
mgr inż. Mikołaj Binczyk¹⁾

Awarie mostu Cłowego w Szczecinie

Failures in Clowy Bridge in Szczecin

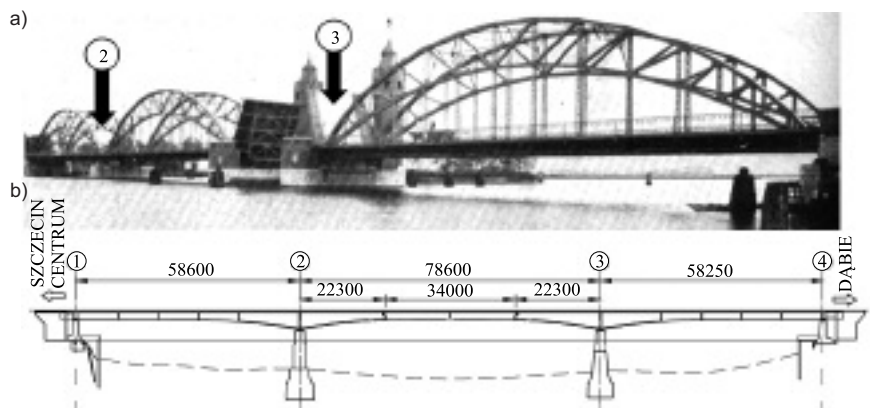
DOI: 10.15199/33.2018.01.26

Streszczenie. W artykule przedstawiono historię budowy i eksploatacji mostu Cłowego w Szczecinie. W ciągu 56 lat eksploatacji obiektu wykonano wiele ekspertyz, napraw i remontów. Ostatecznie most został zamknięty z powodu awarii stalowych kabli sprężenia zewnętrznego. Przedstawiono główne przyczyny degradacji obiektu i awarii. Opisano również obliczenia statyczne i wytrzymałościowe wykonane do koncepcji rozbiórki przęseł mostu.
Słowa kluczowe: betonowe przęsło sprężone, awaria, korozja cięgien sprężających, ocena nośności.

Abstract. This paper presents history of constructing and lifecycle of post-tensioned Clowy Bridge in Szczecin. Several expert works and repairs were performed during 56 years of service. Finally bridge was closed after serious structural failure of external prestressing cable. Main reasons of degradation are explained and concept of design of dismantling is presented.

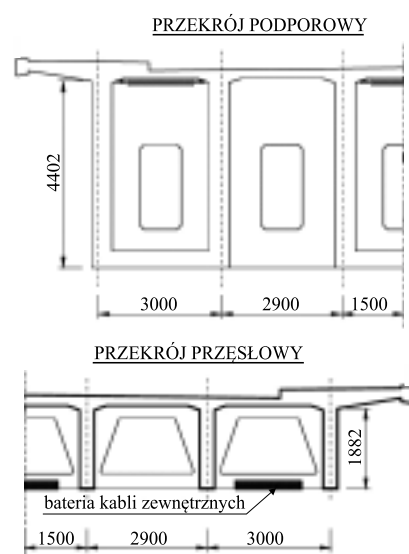
Keywords: prestressed concrete bridge, failure, corrosion of prestressed cables.

W 1955 r. opracowano nowy projekt techniczno-roboczy mostu Cłowego w Szczecinie, który po raz pierwszy został wybudowany na początku XIV w. Przyczółki i filary mostu wykonano jako żelbetowe. Korpusy przyczółków oparto częściowo na starych podporach i nowych fundamentach posadowionych na palach prefabrykowanych. Filary wykonano techniką kesonową na fundamentach starych filarów. Układ statyczny mostu stanowi trójprzęsłowa belka gerberowska (rysunek 1), a konstrukcję nośną w przekroju poprzecznym – kablobetonowy ustrój płytowo-żebrowy. Mimo że betonowe konstrukcje sprężone znane były wcześniej, to pierwsze udane realizacje w Europie pojawiły się po II wojnie światowej, gdy zastosowano cięgna (liny) sprężające o wytrzymałości ~1650 MPa. Projektanci z Biura Projektów Budownictwa Komunalnego Gdańsk (Maksymilian Wolff i Henryk Żółtowski) mieli już za sobą udane realizacje mostów sprężonych. Przęsła skrajne (wschodnie i zachodnie) wykonano jako swobodnie podparte ze wspornikami do zawieszenia przęsła środkowego. Rozpiętość przęsła wschodniego wynosi 58,25 m, zachodniego 58,60 m, natomiast wysięgi wsporników 22,30 m. Przęsła skrajne składają się z trzech zasadniczych pasm po dwa dźwigary w każdym (łącznie sześć dźwigarów w przekroju poprzecznym – rysunek 2). Każde pasmo zostało sprężone dwudziestoma czterema kablami splotowymi 37φ5 mm metodą Baur–Leonhardta (rysunek 3). System polega na ułożeniu wszystkich kabli ob-



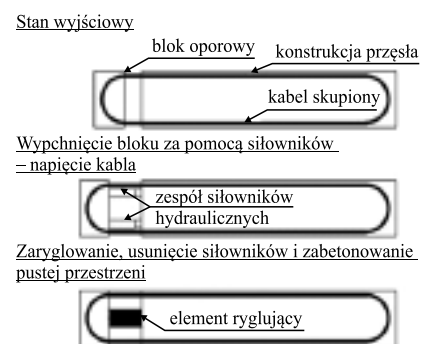
Rys. 1. Widok starego mostu Cłowego z oznaczeniem filarów wykorzystanych w nowym projekcie (a) oraz schemat układu przęseł i podpór nowego mostu (b) [7, 9]

Fig. 1. View of the old Clowy bridge with marked pillars used for new spans (a) and the scheme of the new bridge spans and supports (b) [7, 9]



Rys. 2. Przekroje poprzeczne przęsła zachodniego [9]

Fig. 2. Cross-sections of the western span [9]



Rys. 3. Sprężenie metodą Baur–Leonhardta [3]

Fig. 3. Baur–Leonhardt method of prestressing [3]

wodowo w postaci jednego pakietu. Zakotwienia realizowano jako rozproszone w betonowych blokach kotwiących na obu końcach przęsła. Sprężenie wprowadzono przez rozparcie ruchomego bloku kotwiącego i przęsła. Wszystkie kable napinano jednocześnie, co prawdopodobnie było jedną z przyczyn pierwszej awarii.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

^{*}) Adres do korespondencji: zoltowski@pg.gda.pl

W części nadpodporowej i wspornikowej płyta pomostu została sprężona dodatkowymi kablami pojedynczymi, a dźwigary połączono płytą dolną o grubości 16 cm, tworząc w ten sposób zamknięty, monolityczny przekrój skrzynkowy (łącznie trzy skrzynki w przekroju poprzecznym). Belki główne przęsła mają wysokość od 2,295 m w przegubach, przez 4,72 m nad filarami do 2,07 m na przyczółkach. Poprzecznicę przęsłową ukształtowano jako ramowe w rozstawie 10,46 m, natomiast skrajne (na przyczółkach) są masywne i stanowią jednocześnie bloki oporowe do naciągu kabli.

Część środkowa o długości 34,0 m wraz ze wspornikami przęsła skrajnych stanowi przęsło nawigacyjne o rozpiętości 78,6 m. Część zawieszona to konstrukcja zespolona składająca się z sześciu prefabrykowanych belek kablobetonowych o przekroju teowym oraz żelbetowej płyty grubości $18 \div 25$ cm wykonanej na mokro. Belki sprefabrykowano na brzegu, sprężono kablami splotowymi 37φ5 mm, a następnie przetransportowano na miejsce docelowe dźwigiem pływającym.

Charakterystyka awarii mostu

Podczas budowy mostu w 1958 r. stwierdzono pęknięcia lin sprężających w przęsle zachodnim, które budowano jako pierwsze. W związku z tym, że przęsło zwolniono z podpór montażowych, wybudowano tymczasowe podpory zabezpieczające, a po ich wykonaniu przystąpiono do naprawy konstrukcji. Przyczyn awarii nie zidentyfikowano lub nie ujawniono. Obliczenia sprawdzające po kolejnej awarii w 2016 r. wykazały poprawność założeń projektowych. Można przypuszczać, że przyczyną awarii były:

- nierówny naciąg poszczególnych kabli wynikający z braku wstępnego ich napięcia w czasie układania;
- wady materiałowe drutu ze stali węglowej będącego wówczas krajowym wyrobem prototypowym;
- brak precyzyjnego określenia siły sprężającej (posługiwano się manometrami). Kable naciągano czterema prasami o nośności 600 T każda, wprowadzając napięcia średnie o wartości 1376 MPa (83,3% wytrzymałości na zerwanie).

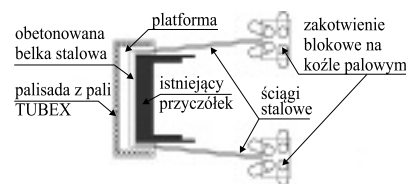
Awaria mostu wymusiła konieczność naprawy polegającej na zdublowaniu systemu sprężenia. Przecięto pierwotne, uszkodzone kable sprężające w miejscu zakotwienia i pozostawiono je w kanałach. Wykonano sprężenie zewnętrzne kablami biegnącymi

między dźwigarami każdego z trzech pasm. Kable w części otwartej przęsła zabetonowano w celu zapewnienia im ochrony antykorozyjnej, natomiast w skrzynkowej części wspornikowej prowadzono je w stalowych duktach wypełnionych iniektem. Trasy kabli zastępczych i pierwotnego kabla skupionego były identyczne. Nowe sprężenie w przęsle wykonano z trzydziestu kabli splotowych 37φ5 mm przypadających na każde pasmo. Oznacza to, że zwiększono liczbę kabli w każdym paśmie o 6 sztuk, jednocześnie redukując ich wstępne napięcie. Pierwotne sprężenie płyty w części wspornikowej nie uległo awarii, ale w celu zwiększenia bezpieczeństwa dodano sześć kabli w każdym paśmie.

Budowę przęsła wschodniego dokończono zgodnie z pierwotnym projektem, ograniczając dopuszczalne naprężenia w stali sprężającej. Wiązało się to z koniecznością zastosowania dodatkowych kabli sprężających w systemie Baur-Leonhardta. Jeden kabel skupiony składał się z dwudziestu czterech pierwotnych kabli usytuowanych wewnątrz środników oraz z dodanych w trakcie budowy sześciu kabli umieszczonych w zewnętrznych, obetonowanych ostonach. Naprężenia średnie w kablach wynosiły 919 MPa (55% wytrzymałości na zerwanie). Po przeprowadzeniu próbnych obciążeń most oddano do użytkowania 22 grudnia 1960 r.

W 1993 r. stwierdzono, że przyczółek zachodni niebezpiecznie przemieścił się w kierunku rzeki, co potwierdziły ekspertyzy wykonane przez zespół **profesora Andrzeja Jarominiaka** [5]. Odnotowano obrócenie i przechylenie korpusu przyczółka w kierunku wody, prawdopodobnie na skutek m.in. pęknięcia drewnianej ścianki szczelnej obudowującej fundament przedwojennej części przyczółka i utrzymującej skarpe gruntów organicznych. Wartości przemieszczeń poziomych wzbudziły przypuszczenia, że pale prefabrykowane mogły zostać uszkodzone.

Naprawa przyczółka wg koncepcji opracowanej przez zespół A. Jarominiaka (rysunek 4) [6] obejmowała jego wsparcie na obetonowanej belce stalowej oraz wybudowanie przed przyczółkiem od strony wody platformy żelbetowej posadowionej na palach TUBEX. Belka została zakotwiona do specjalnych fundamentów blokowych (posadowionych na palach w układzie koźłowym) za pomocą wstępnie napiętych, stalowych ściąągów rurowych. Występujące zarysowania zainiektowano, a ubytki betonu uzupełniono. W podobny sposób wzmocniono przyczółek wschodni, ale platformę połączono bezpośrednio z fun-



Rys. 4. Schemat wzmocnienia przyczółka zachodniego (rzut z góry) [6]

Fig. 4. The west bridgehead – idea of strengthening (view from the top) [6]

damentami blokowymi bez zastosowania belki i ściągów. Po naprawie nie stwierdzono dalszych ruchów przyczółków.

W 1994 r. Zakład Mostów Politechniki Wrocławskiej [1, 2] dokonał oceny stanu technicznego mostu i zakwalifikował go do klasy nośności C wg PN-85/S-10085. W 2008 r. przystąpiono do modernizacji mostu Cłowego wg projektu opracowanego przez zespół **dr. inż. Janusza Hołowatego** z Pracowni Projektowania Dróg i Mostów w Szczecinie [4], a prace zakończono w 2010 r. Obejmowały one poszerzenie obiektu przez wydłużenie wsporników; renowację przegubów przęsła zawieszzonego; wymianę urządzeń dylatacyjnych oraz kosmetykę przęsła. Pomimo dużego zakresu remontu nie zwrócono uwagi na stan techniczny sprężenia mostu.

30 maja 2016 r. nastąpiło gwałtowne zerwanie części kabli sprężających przęsła zachodniego. Betonowe otulenia kabli oderwały się od konstrukcji i wpadły do wody. Po awarii ograniczono ruch na obiekcie i przeprowadzono przegląd [9], ujawniając wiele uszkodzeń. W wyniku korozji postępującej przez wiele lat doszło do przerwania części kabli sprężających znajdujących się w zewnętrznej baterii skrajnego, południowego pasma. Bezpośrednią przyczyną były niesprawne urządzenia odwadniające oraz sączki. Wskutek gwałtownego zerwania części kabli nastąpiło ścięcie poprzecznic w przęsle zachodnim (fotografia). Kable sprężające w paśmie północnym przęsła zachodniego (pod ściekiem przykrawężnikowym) również uległy korozji. Jedynie środkowe pasmo tego przęsła pozostało w dobrym stanie technicznym głównie ze względu na brak przecieków.



Ścięte poprzecznicę w przęsle zachodnim [9]
Shear damage of crossbeam in the western span [9]

Ocena nośności obiektu po awarii

Pierwszym elementem prac eksperckich po oględzinach konstrukcji było studium dokumentacji technicznej i opracowanie modelu teoretycznego przęsła. Na podstawie dokumentacji archiwalnej [3, 8] wykonano model numeryczny mostu w środowisku MES SOFiSTiK (rysunek 5), który składał się z czterowzłowych elementów powłokowych o zadanej grubości oraz



Rys. 5. Model numeryczny MES w środowisku MES SOFiSTiK [10]

Fig. 5. The FEM numerical model in SOFiSTiK environment [10]

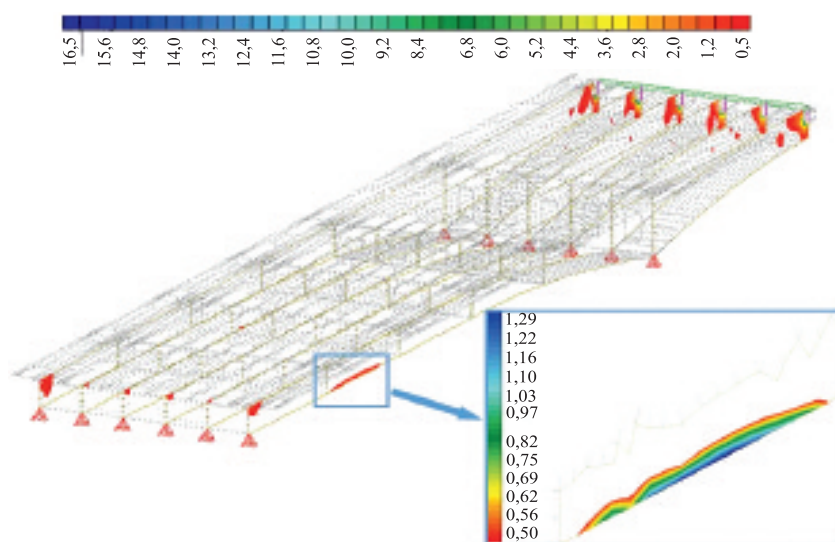
dwuwzłowych elementów belkowych o zadanym przekroju poprzecznym. Przęsło zawieszono zamodelowano jako powłokowo-belkowe, natomiast przęsło zachodnie i wschodnie jako powłokowe. W modelu MES wprowadzono sprężenie przęsła skrajnych i przęsła zawieszzonego zgodnie z dokumentacją powykonawczą po pierwszej awarii. Przeglądy konstrukcji [9] nie dostarczyły jednoznacznej informacji o liczbie zerwanych cięgien w baterii sprężenia pasma południowego przęsła zachodniego. W związku z tym przeanalizowano wpływ stopnia sprężenia w południowym paśmie przęsła zachodniego na stan wyężenia dźwigarów głównych. Na rysunku 6 przedstawiono naprężenia rozciągające w dźwigarach głównych przęsła zachodniego w przypadku braku 15 z 30 kabli w baterii sprężenia pasma południowego.

Wnioski z analizy modelu globalnego:

- pasmo południowe przęsła zachodniego zachowało po awarii ok. 50% sprężenia zewnętrznego (w baterii); gdyby uszkodzeniu uległ większy procent sprężenia, dźwigary tego pasma powinny się zarysować; podczas przeglądów nie ujawniono zarysowania konstrukcji;

- rozbiórkę mostu należy poprzedzić wykonaniem tymczasowego podparcia przęsła zachodniego za pomocą podpory tymczasowej w nurcie rzeki.

Analizy potwierdziły, że ze względu na stan techniczny przęsła zachodniego most nie mógł być dalej eksploatowany. Poza zniszczonymi kablami stwierdzono koro-



Rys. 6. Przęsło zachodnie, 50% sprężenia – główne naprężenia rozciągające [MPa] w kierunku podłużnym obiektu w dźwigarach głównych [10]

Fig. 6. The western span, 50% of initial prestressing – main tensile stresses [MPa] in the longitudinal direction of the bridge in the main girders [10]

zję w innych linach sprężenia. Biorąc pod uwagę nośność mostu i brak możliwości jej zwiększenia z uwagi na wytrzymałość betonu, podjęto decyzję o natychmiastowej rozbiórce przęsła, co podzielił Powiatowy Inspektor Nadzór Budowlanego, wydając decyzję o demontażu przęsła i wykonaniu nowych. Aby zminimalizować skutki pogłębienia się awarii, zarządzono przesunięcie toru wodnego z przęsła środkowego pod przęsło wschodnie oraz prowadzono stały monitoring geodezyjny przęsła.

Opracowano koncepcję rozbiórki mostu [10] oraz odbudowy przęsła w konstrukcji zespolonej. Koszty oszacowano na 20 mln zł, a czas remontu na 12 miesięcy.

Podsumowanie

Popularny niegdyś system sprężenia Baur-Leonhardta polegający na naciągnięciu wszystkich kabli jednocześnie nie zapewniał równego ich napięcia, co mogło przyczynić się do awarii mostu Cłowego w trakcie budowy. System ten nie przyjął się w mostownictwie z uwagi na liczne wady. Współczesne techniki sprężania mostów eliminują te niedoskonałości. Umieszczenie sprężenia zewnętrznego pod wpustami ulicznymi potwierdza, że zbagatelizowanie przecieków prowadzi do nieodwracalnych uszkodzeń konstrukcji. Dodatkowym elementem sprzyjającym degradacji, a w następstwie awarii było pominięcie oceny kabli sprężających w przeglądach szczegółowych i w czasie ostatniego remontu [4].

Lekkie, stalowo-betonowe konstrukcje zespolone umożliwiają wykorzystanie ist-

niejących podpór w procesie przebudowy żelbetowych obiektów sprężonych. We wrześniu 2016 r. przystąpiono do remontu mostu Cłowego, wykorzystując koncepcje wykonane w ramach PFU [11]. Zdemontowano wszystkie przęsła, wykonano nowe przyczółki, wzmocniono filary oraz zmontowano konstrukcję stalową nowych przęsła zespolonych. Prace zakończono w sierpniu 2017 r.

Literatura

- [1] Bieniek Kazimierz, Przemysław Maliszkievicz, Jan Kmita. 1994. *Projekt kierunkowy remontu ustroju nośnego mostu w Szczecinie*. Wrocław. Instytut Inżynierii Lądowej PW.
- [2] Bień Jan i inni. 1994. *Projekt próbne obciążenia Mostu Cłowego w Szczecinie*. Wrocław. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej.
- [3] Historia budowy Mostu Cłowego w Szczecinie. Szczecin. 1960 r.
- [4] Hołowaty Janusz. 2008. *Projekt wykonawczy: Przeprowadzenie ścieżki rowerowej przez Most Cłowy w Szczecinie*. Szczecin. PPDiM w Szczecinie.
- [5] Jarominiak Andrzej. „Ekspertyza na temat stanu przyczółków Mostu Cłowego przez Regalicję w Szczecinie. Etap I i II”. *Fundamenty-Mosty*. Warszawa. 1993, 1994.
- [6] Jarominiak Andrzej. 1994. „Projekt techniczny wzmocnienia przyczółka zachodniego Mostu Cłowego w Szczecinie”. *Część I i II. Fundamenty-Mosty*. Warszawa.
- [7] Most Cłowy – encyklopedia.szczecin.pl.
- [8] Wolff Maksymilian i inni. Archiwalna dokumentacja projektowa Mostu Cłowego w Szczecinie. BPBK. Gdańsk. 1956, 1958.
- [9] Żółtowski Krzysztof, Marek Szafranski. 2016. *Raport z przeglądu szczegółowego Mostu Cłowego w Szczecinie po zaistniałej awarii*. Gdańsk. KBP Żółtowski.
- [10] Żółtowski Krzysztof i inni. 2016. *Koncepcja remontu Mostu Cłowego w Szczecinie*. Gdańsk. KBP Żółtowski.
- [11] Żółtowski Krzysztof i inni. 2016. *Program Funkcjonalno-Użytkowy, dla zadania: Remont Mostu Cłowego w Szczecinie, Most drogowy nad Odrą wschodnią w ciągu ul. Gdańskiej*. Gdańsk, 2016.

Przyjęto do druku: 20.06.2017 r.