

prof. dr hab. inż. Krzysztof Dyduch*
dr inż. Rafał Szydłowski**

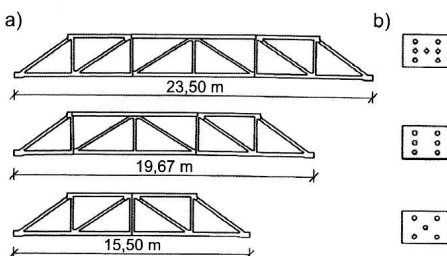
Analiza stanu technicznego estakad z betonu sprężonego

Destruction state analysis of prestressed concrete pipelines trestle bridges

Budowane w Polsce w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia estakady z betonu sprężonego znajdowały zastosowanie przede wszystkim w dużych zakładach chemicznych. Po 60 latach eksploatacji w środowisku o dużej agresji chemicznej wystąpiła znaczna ich degradacja techniczna. Estakady te są nadal użytkowane i ze względów ekonomicznych nie przewiduje się ich wymiany. Awaria prześlą estakady, opisana w publikacjach [1] i [2], wymusiła konieczność wykonania kompleksowych badań całego ciągu estakad sprężonych. W pobliżu badanych przeseł w ciągu godziny z kominów wydmuchiwane jest ok. 3 kg azotanu amonowego. Celem publikacji jest przedstawienie zakresu i metody badań, oceny stanów granicznych estakad i propozycja wzmocnień.

Opis konstrukcji

Konstrukcję nośną badanych estakad stanowią prefabrykowane kratownice żelbetowe z dolnym pasem sprężonym (rysunek 1). Kratownice tworzone z 5 typów żelbetowych prefabrykatów o modułowej długości ok. 4 m, używając w zależności od konfiguracji elementów rozpiętości w osiach podpór 24, 20 i 16 m. Sprężenie pasa dolnego stanowią kable typu Freyssineta $12\phi 5$ kotwione w zakotwieniach stalowych. W zależności od rozpiętości może być ich 7, 6 i 5. Każde przeseł estakady stanowią dwie bliźniacze, sprężone kratownice w rozstawie 2,45 m, połączone dodatkowo w górnych i dolnych węzłach żelbetowymi poprzecznkami. Stanowią one poprzeczne stężenie kratownic oraz są elementami nośnymi dla rurociągów, które na nich



Rys. 1. Schematy kratownic (a) oraz przekrój ich pasa dolnego (b)

sposzczywiają lub są do nich podwieszono. Kablobetonowe dźwigary kratowe opierają się na słupowych podporach pośrednich lub oporowych. Wszystkie słupy oparte są na żelbetowych blokach fundamentowych.

Zakres badań

Analiza obliczeniowa stanów granicznych konstrukcji estakad sprężonych po 60 latach eksploatacji opierała się na szczegółowych wynikach kompleksowych badań. Obejmują one:

- inwentaryzację zbrojenia elementów konstrukcji estakady;
- inwentaryzację rys i pęknięć w elementach nośnych i podporach estakady;
- badania doraźne stanu korozji i iniekcji kabli sprężających oraz stopnia korozji zbrojenia zwykłego;
- badania stanu technicznego zakotwień kabli sprężających w pasie dolnym kratownic żelbetowo-sprężonych;
- badania chemiczne stopnia korozji betonu i iniekcji w kanałach kablowych w kratownicach.

Wyniki inwentaryzacji zbrojenia w kratownicach żelbetowo-sprężonych. Z uwagi na konieczność oceny nośności konstrukcji przeseł badanych estakad niezbędne było dokładne określenie w nich przekroju i rozmieszczenia miękkiego zbrojenia. Badania te wykonano za pomocą Ferroskanu PS200, ustalając liczbę prętów zbroje-

nia i ich średnicę oraz otulenie w trzech typach kratownic żelbetowo-sprężonych o rozpiętościach 24, 20 i 16 m. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki skanowań zbrojenia w kratownicy A1. W wyniku badań ustalono, że:

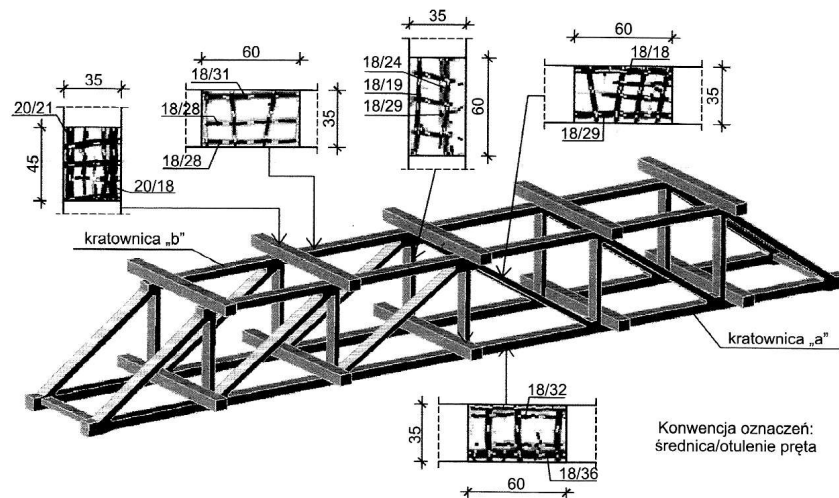
- zbrojenie w pasach dolnych kratownic stanowią cztery pręty o średnicy $\phi 18$ mm;
- zbrojenie pasów górnych w segmencie środkowym to $4\phi 18$ mm górną i $4\phi 18$ mm dołem, zaś w prefabrykowanych elementach skrajnych zbrojenie to $3\phi 18$ mm dołem i $3\phi 18$ mm górną;
- zbrojenie słupków stanowią cztery pręty $\phi 18$ mm na każdym boku, zaś zbrojenie krzyżulców stanowią cztery narożne pręty $\phi 18$ mm;
- w poprzecznicach górnych zlokalizowano cztery pręty $\phi 20$ mm górną i tyle samo dołem, zaś w poprzecznicach dolnych po pięć prętów $\phi 20$ mm przy górnej i dolnej powierzchni.

Ocena stanu sprężenia pasów dolnych kratownic. Do oceny zastosowano metodę odwiertów do kabli sprężających. Określenie stopnia naciągu oszacowano na podstawie oględzin odkrytych kabli. W przypadku braku iniekcji lub częściowej iniekcji, kable sprężające nienapięte lub pojedyncze nienapięte druty można w łatwy sposób przemieszczać w obrębie kanału. Najtrudniej określić stopień naciągu w przypadku obecności pełnej iniekcji. Wówczas należy zweryfikować stan napięcia kabla w dodatkowych odwiertach do badanego kabla. W wyniku badań metodą odwiertów wszystkich kabli w pasach dolnych w wybranych losowo miejscach stwierdzono, że:

- kable sprężające były w pełni sprężone;
- luźne kable sprężające były bez żadnego sprężenia;

* Krakowska Akademia im. J.F. Modrzewskiego
** Politechnika Krakowska

- były luźne druty w kablach sprężających;
 - kompletnie brak było iniekcji kabli lub iniekcja była niepełna.
- Znając charakterystykę sprężenia pasów dolnych kratownic z badań obliczono wartość wyężenia w betonie pasów dolnych i prawdopodobieństwo powstania zarysowań pasa dolnego. W celu określenia rzeczywistej siły sprężającej przyjęto charakterystykę stali sprężającej z okresu wykonywania kratownic sprężonych i wytycznych ówczesnej normy PB-57/B-03320 *Konstrukcje z betonu sprężonego. Obliczenia statyczne i projektowanie*. Norma ta przyjmuje stal sprężającą II gatunku o $R_r = 1500$ MPa i $Q_{r0,2} = 1200$ MPa, zatem naprężenia dopuszczalne trwałe na rozciąganie w kablach sprężających wyznaczało się z dwóch warunków:
- $$\sigma_s \leq 0,85 Q_{r0,2} = 0,85 \times 1200 = 1020 \text{ MPa} \quad (1)$$
- $$\sigma_s \leq 0,65 R_r = 0,65 \times 1500 = 975 \text{ MPa} \quad (2)$$



Rys. 2. Skanowanie zbrojenia w kratownicy A1

zaś naprężenie ostateczne w stali po wszystkich stratach wynosiło $\sigma_{s,sc} = 790$ MPa. Przyjmując przekrój kabla $12\phi 5$ jako równy $2,35 \text{ cm}^2$, można obliczyć siłę sprężającą kabla $12\phi 5$ po wszystkich stratach jako równą $2,35 \times 10^{-4} \times 790 \times 10^6 = 185,65 \text{ kN}$. Jeśli przyjąć graniczne odkształcenie stali sprężającej przy zerwaniu $\epsilon_s = 1\%$ oraz odkształcenie stali wywołane naciągiem jednego kabla $12\phi 5$ siłą po stratach $185,65 \text{ kN}$ jako równe $\epsilon_{sm} = 0,00395$, to pozostaje jeszcze do zerwania kabla odkształcenie $\Delta\epsilon_s = 0,0100 - 0,00395 = 0,00605$. Zatem siła zrywająca sprężony kabel wynosi $284,35 \text{ kN}$.

Inwentaryzacja rys i pęknięć w elementach nośnych i podporach estakady pozwoliła wyróżnić we wszystkich przęsłach i podporach badanych ciągów estakad:

- liczne odspojenia betonu i braki otuliny zbrojenia miękkiego;
- mocno rozwiniętą korozję zbrojenia, wynoszącą w przekrojach odsłoniętych nawet 40% przekroju prętów zbrojenia;
- odsłonięte i skorodowane zakończenia kabli sprężających;
- widoczne pęknięcia w otulinie betonowej świadczące o zaawansowanej korozji kabla sprężającego;
- widoczną korozję betonu badanych estakad;
- widoczne rysy w dolnych pasach kratownic sprężonych, w których siła sprężająca jest mniejsza od siły rozciągającej pasy w wyniku działających obciążeń.

Badania chemiczne stopnia korozji betonu i iniekcji kabli sprężających

nia strukturalne obrazowały zniszczoną strukturę betonu, odwapnienie fazy CSH, w której występowały zmiany korozyjne związane z produktami korozji chlorkowej.

Analiza statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji nośnej estakady i ocena stanu bezpieczeństwa

Analizę statyczno-wytrzymałościową konstrukcji wykonano na podstawie:

- badań rozkładu ilości zbrojenia miękkiego w elementach kratownic A1, A2 i A3 oraz oceny stopnia jego skorodowania;
- badań drutów kabli sprężających kompletnie skorodowanych w zakończeniach oraz mocno zaawansowanej korozji wżerowej zakotwień stalowych;
- obrazu kabli odkutych w miejscu pęknięcia betonowej otuliny i widocznych kompletnie skorodowanych drutów kabla sprężającego;
- stanu iniekcji kabli sprężających, która nie wypełnia kabli i nie ochroni ich przed korozją;
- obrazu naciągu kabli sprężających w losowo wykonanych odwiertach (część kabli całkowicie lub częściowo nienaprzężonych);
- stanu zniszczenia korozyjnego betonu, w którym stwierdzono znaczną destrukcję i który stracił właściwości ochronne kabli sprężających przed korozją.

W wyniku obliczeń stanu granicznej nośności stwierdzono, iż stan kratowych dźwigarów żelbetowo-sprężonych w niektórych przęsłach badanych estakad jest przedawaryjny. Takie jest np. przęsło nr 12 w ciągu przedstawionym w tabeli. Przy luźnych kablach sprężających obliczone naprężenia wskazały na rozciąganie pasa dolnego w dźwigarze „a”, co wywołało powstanie regularnie rozmieszczonych rys szerokości do 0,3 mm. Powstała zatem konieczność pilnej naprawy i wzmocnienia żelbetowo-sprężonych kratownic, aby nie dopuścić do katastrofy. Opracowano dwa warianty biernego wzmocnienia tych kratownic przy pełnym zachowaniu geometrii i wymiarów:

- **wariant pierwszy** (rysunek 3a) obejmuje wzmocnienie wszystkich pasów dolnych i słupków najbardziej wyężonych stalowymi przekrojami zespolonymi z pasami dolnymi przez przyklejenie i zamocowanie mecha-

nych. Przeprowadzono je na próbkach betonu pochodzących z pasów dolnych kablobetonowych dźwigarów estakady. Określono: odczyn pH wyciągu wodnego, zawartość jonów SO_4^{2-} i Cl^- . Przeprowadzono też analizę strukturalną w mikroskopie skaningowym.

Na podstawie badań stwierdzono bardzo złą jakość betonu, z silną destrukcją i praktycznie brakiem właściwości ochronnych w stosunku do stali sprężającej i zbrojeniowej. Odczyn wyciągu wodnego badanych betonów wynosił nawet $\text{pH} = 8,0$, co powoduje silną destrukcję, a zawartość jonów Cl^- oraz SO_4^{2-} przekraczała wartości dopuszczalne w betonach. Bada-

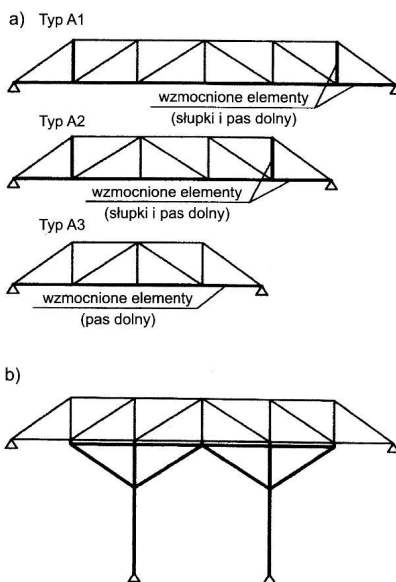
Liczba kabli, wartość sił i naprężeń w pasie dolnym kratownic w stanie projektowanym i obecnym w wybranym ciągu estakad

Numer przęsła	Typ kratownic	Całkowita liczba kabli w dźwigarze	Charakterystyczna siła rozciągająca [kN]	Dźwigary „a”			Dźwigary „b”		
				liczba kabli całkowicie sprężonych	siła sprężająca odpowiadająca liczbie pracujących kabli	naprężenia w betonie w sytuacji istniejącej [MPa]	liczba kabli całkowicie sprężonych	siła sprężająca odpowiadająca liczbie pracujących kabli	naprężenia w betonie w sytuacji istniejącej [MPa]
1	A3	5	362,0	4	742,6	4,53	4,91	911,5	6,54
2	A1	7	901,2	6,75	1253,1	4,19	6,75	1253,1	4,19
3	A1	7	901,2	5,41	1004,4	1,23	6,91	1282,8	4,54
4	A1	7	901,2	7,0	1299,6	4,74	7,0	1299,6	4,74
5	A1	7	901,2	6,83	1268,0	4,37	7,0	1299,6	4,74
6	A1	7	901,2	6,91	1282,8	4,54	7,0	1299,6	4,74
7	A1	7	894,6	6,0	1113,9	2,61	5,91	1097,2	2,41
8	A1	7	680,7	6,0	1113,9	5,16	6,66	1236,4	6,62
9	A1	7	680,7	5,91	1097,2	4,96	6,91	1282,8	7,17
10	A1	7	680,7	6,0	1113,9	5,16	6,83	1268,0	6,99
11	A1	7	680,7	5,66	1050,8	4,41	5,83	1082,3	4,78
12	A1	7	680,7	2,91	540,2	-1,67	3,83	711,0	0,36
13	A1	7	680,7	5,91	1097,2	4,96	7,0	1299,6	7,37
14	A1	7	680,7	6,91	1282,8	7,17	7,0	1299,6	7,37
15	A1	7	680,7	7,0	1299,6	7,37	6,91	1282,8	7,17
16	A1	7	680,7	7,0	1299,6	7,37	7,0	1299,6	7,37
17	A1	7	680,7	5,91	1097,2	4,96	6,91	1282,8	7,17
18	A3	5	377,7	5,0	928,3	6,55	5,0	928,3	6,55
19	A1	7	680,7	6,0	1113,9	5,16	6,91	1282,8	7,17
20	A1	7	680,7	7,0	1299,6	7,37	5,83	1082,3	4,78
21	A3	5	377,7	3,91	725,9	4,15	4,5	835,4	5,45
22	A1	7	680,7	5,83	1082,3	4,78	6,0	1113,9	5,16
23	A1	7	680,7	7,0	1299,6	7,37	6,91	1282,8	7,17
24	A2	6	579,5	4,91	911,5	3,95	5,50	1021,1	5,26

niczne. W tej koncepcji wzmocnienia nie zmienia się schematu statycznego dźwigarów i w pasach dolnych występuje przede wszystkim siła rozciągająca oraz niewielkie momenty zginające. Całą siłę rozciągającą mają przenosić wówczas dodatkowe przekroje stalowe zespolone z pasem dolnym kratownicy;

■ w wariacie drugim (rysunek 3b) proponuje się podparcie kratownic żelbetowo-sprężonych wsporcą konstrukcją stalową na nowych fundamentach. Zmienia się zatem schemat statyczny pracy dźwigarów. Przy takim schemacie podparcia znacznie zmniejszają się siły w prętach kratownic, co nie wymaga ich wzmocnienia.

Zalecono, aby proces naprawy konstrukcji estakad przeprowadzić z zastosowaniem produktów nowoczesnej chemii budowlanej.



Rys. 3. Proponowane wzmocnienie kratownic (a) oraz ich podparcie (b)

Abstract

The prestressed concrete grates were used in Poland to build the industrial pipelines trestle bridges from 1950 year. These are working in aggressive environment of industrial plant and often failure. The paper presents the methods of inspection and capacity evaluation of them. The propositions of strengthening are presented too.

Literatura

[1] Dyduch K., Szydłowski R.: Awaria i wzmocnienie sprężonej konstrukcji nośnej estakady w zakładach chemicznych. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 24 – 27 maja 2011.
 [2] Dyduch K., Szydłowski R.: Awaria i wzmocnienie sprężonej konstrukcji nośnej estakady. Inżynier Budownictwa, 11/2011.