

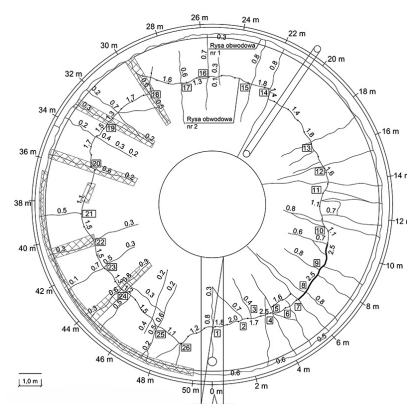
ZBIORNIKI NA MATERIAŁY SYPKIE I CIECZE

a zbrojenie promieniowe kopuły z prętów $\phi 10$ mm w rozstawie 0,20 m w dolnej części kopuły, natomiast w miejscu maksymalnych naprężeń rozciągających co 0,13 m. Pręty tworzą ostatecznie dwie siatki zbrojeniowe ułożone po wewnętrznej i zewnętrznej stronie kopuły. Zgodnie z projektem budowlanym położenie tych siatek należało stabilizować rozpórkami dystansowymi średnicy $\phi 12$ mm w liczbie 4 szt./m². Dotychczasowe ocieplenie kopuły stanowiła warstwa styropianu grubości 0,05 m. Powierzchnię kopuły wykonano wyprawą cementową, na której ułożono gonty dachowe na lepiku. Przekrój zbiornika WKF pokazano na rysunku 1.

Od momentu oddania do użytkowania, zbiornik przez przeszło 11 lat stanowił najważniejszy element inwestycji. Powódź w maju 2010 r. spowodowała długotrwałą (ponaddwuletni) przestój obiektu, doprowadzając do sedymentacji osadu i zatkania rurociągów komory. Po dokonaniu niezbędnych robót remontowych i napełnieniu zbiornika pojawiły się wycieki z pęknięć i rys w dolnej części kopuły.

Wyniki badań doświadczalnych

W celu określenia przyczyn stanu awaryjnego oraz opracowania metody przywrócenia obiektu do użytkowania przeprowadzono badania doświadczalne. Zakres prac obejmował: inwentaryzację zarysowania; badania nieniszczące betonu; weryfikację lokalizacji zbrojenia kopuły oraz pobranie materiału do analizy chemicznej. Na podstawie pobranego materiału określono w laboratorium alkaliczność betonu (pH) i zawartość jonów chlorkowych. Morfologię i szerokość rys na górnej powierzchni kopuły zbiornika przedstawiono na rysunku 2. Oględziny obiektu ujawniły występowanie dwóch głównych rys obwodowych, pierwszej w miejscu połączenia ściany z kopułą, a drugiej w odległości ok. 2,40 m od zewnętrznej krawędzi ściany. Szerokość pierwszej rysy obwodowej wynosiła 0,3 – 0,6 mm, a drugiej średnio 1,6 mm, jednak lokalnie szerokość rys wynosiła 2,5 mm. Ponadto zinwentaryzowano w kopule 40 rys promienistych szerokości 0,2 – 1,1 mm. Na podstawie badań nieniszczących betonu, za pomocą sklerometru, określono wytrzymałość betonu kopuły na ściskanie. Średnia jej wartość wyniosła 31,98 MPa, przy odchyleniu standardowym $s = 3,56$ MPa i współczynniku zmienności $v = 6,68\%$. Weryfikacji lokalizacji zbrojenia i pomiaru grubości otuliny beto-



— szerokość rysy w > 2 mm
— szerokość rysy 1 mm < w < 2 mm
— szerokość rysy 0,2 mm < w < 1 mm

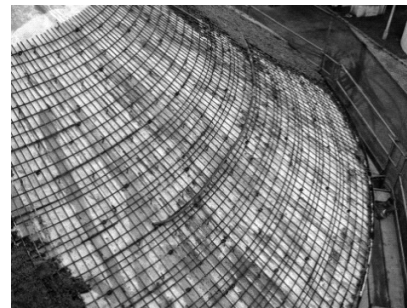
Rys. 2. Inwentaryzacja zarysowania kopuły stożkowej
Fig. 2.

nowej dokonano za pomocą femetru. Z pomiaru wynika, że zastosowano zbrojenie $\phi 10$ mm, a jego rozstaw pokrywa się z założeniami projektu. Grubość otuliny jest zróżnicowana i wynosi $51 \div 77$ mm. Beton poddano analizie chemicznej zgodnie z [3, 4, 5]. Jej wyniki wykazały zbliżoną wartość pH pobranych próbek, która wynosiła $11,30 \div 12,00$. Otrzymana wartość odczynu wodnego w każdym przypadku była wyższa od minimalnej (pH = 10,80), zapewniającej właściwości ochronne stali zbrojeniowej [6]. Skażenie jonami chlorkowymi otuliny kopuły nie przekraczało dopuszczalnej wartości, która w przypadku konstrukcji żelbetowych wynosi 0,4% masy spoiwa. Ponadto wykonano kompleksową analizę statyczną kopuły zbiornika WKF w programie numerycznym. W ramach analizy zestawiono wszystkie istotne oddziaływania na zbiornik w okresie eksploatacji (zbiornik ocieplony, nieocieplony), biorąc pod uwagę również możliwość chwilowego przepelnienia (sytuacja awaryjna). Analiza numeryczna ściany i kopuły zbiornika wykazała możliwość wystąpienia naprężeń rozciągających przekraczających średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe ($f_{ctm} = 2,6$ MPa dla C25/30). Maksymalne naprężenia rozciągające na kierunku południkowym o wartości $\sigma = 3,10$ MPa występują w odległości ok. 2,4 m od zewnętrznej krawędzi ściany i powodują powstanie rys obwodowych na górnej powierzchni kopuły. W kierunku równoleżnikowym naprężenia rozciągające na zewnętrznej powierzchni o wartości $\sigma = 3,01$ MPa powodują miejscowe zarysowanie konstrukcji na kierunku południkowym.

Sposób naprawy kopuły

W wyniku przeprowadzonych obliczeń statycznych i badań oraz analiz studialnych [7 – 10] zaproponowano wykonanie dodatkowego, żelbetowego płaszcza na istniejącej kopule. Program naprawy analizowanej kopuły, obejmował:

- zainiektowanie głównej rysy obwodowej i rys promienistych, o szerokości powyżej 0,1 mm, kompozycjami żywic epoksydowych z regulowanym czasem wiązania do 10 min (połączenie siłowe);
- po wypełnieniu rys i oczyszczeniu powierzchni kopuły, wykonanie warstwy szczerwnej umożliwiającej lepsze zespolenie nowego betonu kopuły z istniejącym;
- osadzenie na kleju epoksydowym prętów zbrojeniowych średnicy $\phi 10$ mm, zakończonych hakiem prostym w celu stabilizacji i zespolenia zbrojenia z istniejącą powłoką oraz wykonanie siatki zbrojeniowej (fotografia) ułożonej w środkowej płaszczyźnie warstwy betonu;



Etapy realizacji naprawy kopuły zbiornika WKF
angielski

- betonowanie zewnętrznego płaszcza żelbetowego kopuły grubości min. 100 mm z betonu C30/37 o wodoszczelności W10, mrozoodporności F150 i konsystencji K2, na kruszywie bazaltowym;
- przeprowadzenie wstępnej próby szczelności zbiornika;
- wykonanie, po okresie pielęgnacji i dojrzewania betonu (min. 28 dni), warstwy termoizolacji grubości 0,10 m z wełny mineralnej ułożonej na kleju oraz pokrycia wierzchniego (z gontu bitumicznego).

Podczas betonowania zostały pobrane próbki cylindryczne średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Wytrzymałość betonu na ściskanie określona w badaniach trzech próbek cylindrycznych wyniosła $f_{cm} = 52,63$ MPa, a sieczny moduł sprężystości betonu na poziomie 0,4 obciążenia niszczonego, $E_{cm} = 47,0$ GPa, natomiast średnia wytrzymałość betonu na osiowe rozciąganie 3,05 MPa.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz numerycznych sformułowano następujące wnioski:

- powierzchnia zbrojenia kopuły przed naprawą nie spełniała aktualnych normowych warunków minimalnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych, które powinny być wodoszczelne. Po usunięciu istniejącej izolacji termicznej (styropian grubości 50 mm) uwidoczniły się ślady świadczące o próbie wypełnienia zaczynem cementowym rys powstałych w okresie dojrzewania betonu (fotografia);

- druga, główna rysa obwodowa powstała w pierwszym roku eksploatacji, w okresie zimowym, kiedy wystąpiły maksymalne naprężenia od oddziaływania termicznego (maksymalna amplituda tempe-

ratury). Rysa powstała w przekroju najbardziej wyężonym (zgodność z wynikami analizy MES);

- w trakcie eksploatacji powstałe rysy samouszczelniły się osadem i przestały częściowo przepuszczać medium;

- podczas powodzi w 2010 r. odnotowano przekroczenie projektowanego poziomu wypełnienia komory. W wyniku problemów z drożnością rur odpływowych nastąpiło przeciążenie kopuły (sytuacja awaryjna), a na poziomie maksymalnych naprężeń południkowych (2,4 m od krawędzi ściany) zwiększyła się szerokość drugiej rysy obwodowej;

- zwiększenie rzeczywistej zewnętrznej grubości betonowej otuliny zbrojenia kopuły (pomiar podczas badań in situ w granicach 51÷77 mm), w stosunku do projektowanej, przyczyniło się do powstania rys we wczesnym okresie dojrzewania betonu;

- naprężenia rozciągające w betonie kopuły przed naprawą osiągały poziom wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe, a zatem sposób naprawy z zastosowaniem dodatkowego żelbetowego płaszcza był najtańszą metodą przywrócenia zdolności eksploatacyjnej zbiornika. Zainiektowanie istniejących rys nie byłoby rozwiązaniem wystarczającym.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólnej reguły dla budynków.
- [2] PN-EN 1992-3, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze, listopad 2008.
- [3] BS 1881: Part 124 Methods for analysis of hardened concrete.
- [4] PN-EN 206-1, Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] Czarniecki L., Emmons P. H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [6] Wieczorek G., Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2002.
- [7] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, tom 1, PWN, Warszawa 2010.
- [8] Seruga A., Seruga T., Midro M., Modernizacja Wydzielonych Komór Fermentacyjnych po czterdziestu pięciu latach eksploatacji, Czasopismo Techniczne, seria: Budownictwo, 2-B/2011, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011.
- [9] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych. Zbiorniki na ciecze. PWN, Warszawa, 2013.
- [10] Dyduch K., Płachecki M., Sieńko R., Wzmocnienie żelbetowej komory fermentacyjnej i odbudowa jej przekroczenia stożkowego po wybuchu, Inżynieria i Budownictwo nr 12/2013, 642 – 654.

Przyjęto do druku: