

ANALIZA WPŁYWU OBCIĄŻENIA TEMPERATURĄ NA STAN ODKSZTAŁCEŃ I ZAGROŻEŃ KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH

Janusz KRENTOWSKI*, Rościław TRIBIŁŁO

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy dokonano analizy wpływu zjawiska obciążenia temperaturą na procesy odkształcania i deformacji konstrukcji budowlanych. Jako przykład postawionej tezy przedstawiono analizę przyczyn awarii płyty górnej zbiornika na ciekłe medium, w której zidentyfikowano wady w postaci pęknięć wzdłuż kierunku zbrojenia głównego. Konstrukcja została zaprojektowana poprawnie przy uwzględnieniu działania obciążeń statycznych i dynamicznych. Nie uwzględniono wpływu obciążenia temperaturą, co przy wadach w projektowaniu zbrojenia rozdzielczego, skutkowało stanem degradacji konstrukcji. Podano koncepcję naprawy uszkodzonej płyty, zilustrowano proces realizacji wzmocnień. Uzasadniono tezę o możliwości wystąpienia wad konstrukcji w aspekcie pominięcia istotnego rodzaju obciążenia.

Słowa kluczowe: obciążenie temperaturą, zbiornik żelbetowy, odkształcenia, wzmocnienie.

1. Wprowadzenie

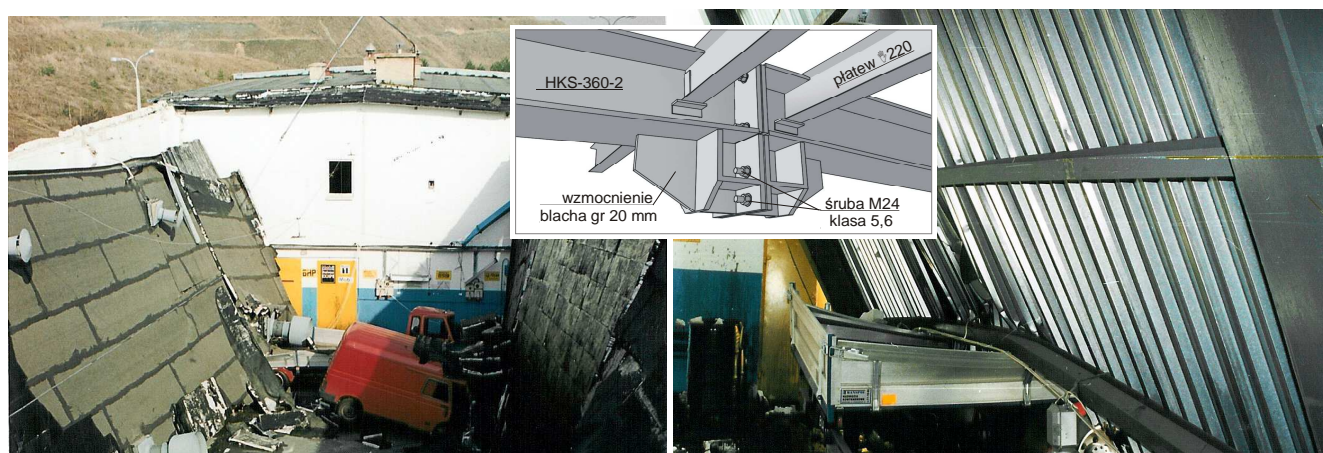
W procesie kształtowania obiektów budowlanych istotnym etapem jest poprawne ustalenie obciążeń, które mogą oddziaływać na elementy konstrukcyjne. W efekcie wieloletnich badań realizowanych przez autorów pracy wykazano, iż poza trudnymi do przewidzenia obciążeniami wyjątkowymi, których przykładowe skutki ilustrują rysunki 1 i 2, często niewłaściwie określa się również wpływ oddziaływań termicznych. Dodatkowe obciążenie, nieprzewidziane na etapie projektowania, skutkuje powstaniem stanu odkształceń, który może

wpływać na nośność konstrukcji lub na wartości estetyczne. Skutkiem obciążeń termicznych przekazywanych na powierzchnie wypraw tynkarskich, na których wykonano artystyczne freski lub reliefy, są spękania obniżające walory estetyczne lub niszczące strukturę historycznej substancji w obiektach zabytkowych lub monumentalnych (rys. 3). Niezamierzone efekty, zilustrowane na rysunku 4, w postaci nadmiernych odkształceń mogą powstać w wyniku obciążenia zmienną temperaturą powierzchni stropodachów, których warstwę przekrycia wykonywano z drewnopochodnych płyt wiórowych.

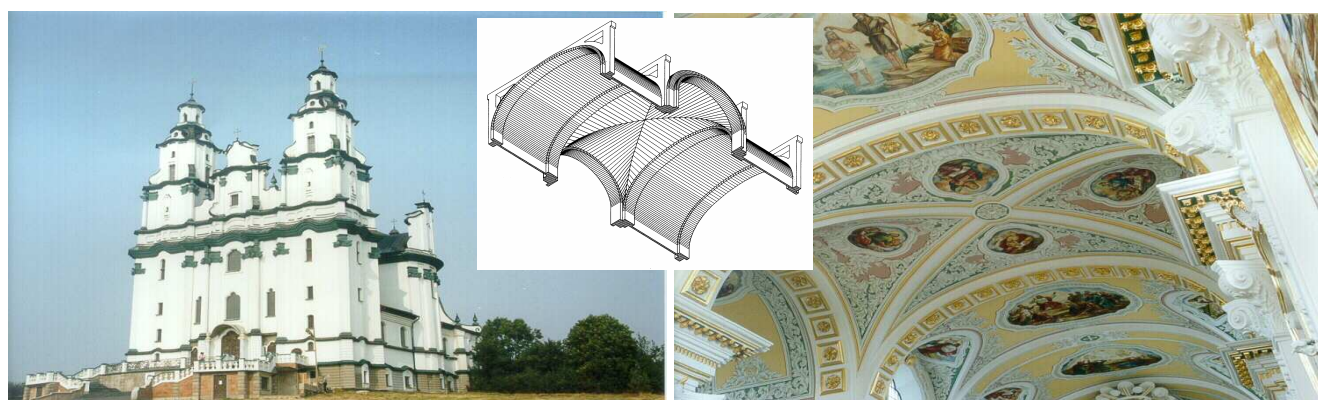


Rys. 1. Efekty działania obciążenia wyjątkowego w postaci wybuchu pyłu drzewnego

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.krentowski@pb.edu.pl



Rys. 2. Katastrofa stalowej konstrukcji przekrycia w efekcie ponadnormowego obciążenia śniegiem



Rys. 3. Elementy konstrukcji budynku monumentalnego narażone na działanie obciążenia termicznego



Rys. 4. Nadmierna deformacja drewnopochodnych elementów stropodachu niewentylowanego

Identyfikacja struktury i morfologii obciążeń w zrealizowanych i eksploatowanych konstrukcjach oraz ocena przyczyn ich powstawania stanowi istotny aspekt badań naukowych. Właściwy dobór metod badawczych, poprawna interpretacja wyników badań i analiz oraz dobór odpowiednich technologii weryfikacji założeń i wniosków muszą być udokumentowane zasobem wiedzy i doświadczeniem projektantów, wykonawców oraz użytkowników obiektów budowlanych (Drobiec i in., 2010). Istotne jest uwzględnienie konsekwencji oddziaływania obciążeń wyjątkowych w formie obciążeń pozastatycznych, na przykład wpływu temperatury

środowiskowej lub technologicznej na elementy konstrukcji zbiorników, skutkującego powstaniem stadium zagrożenia (Krentowski i Tribiño, 2010).

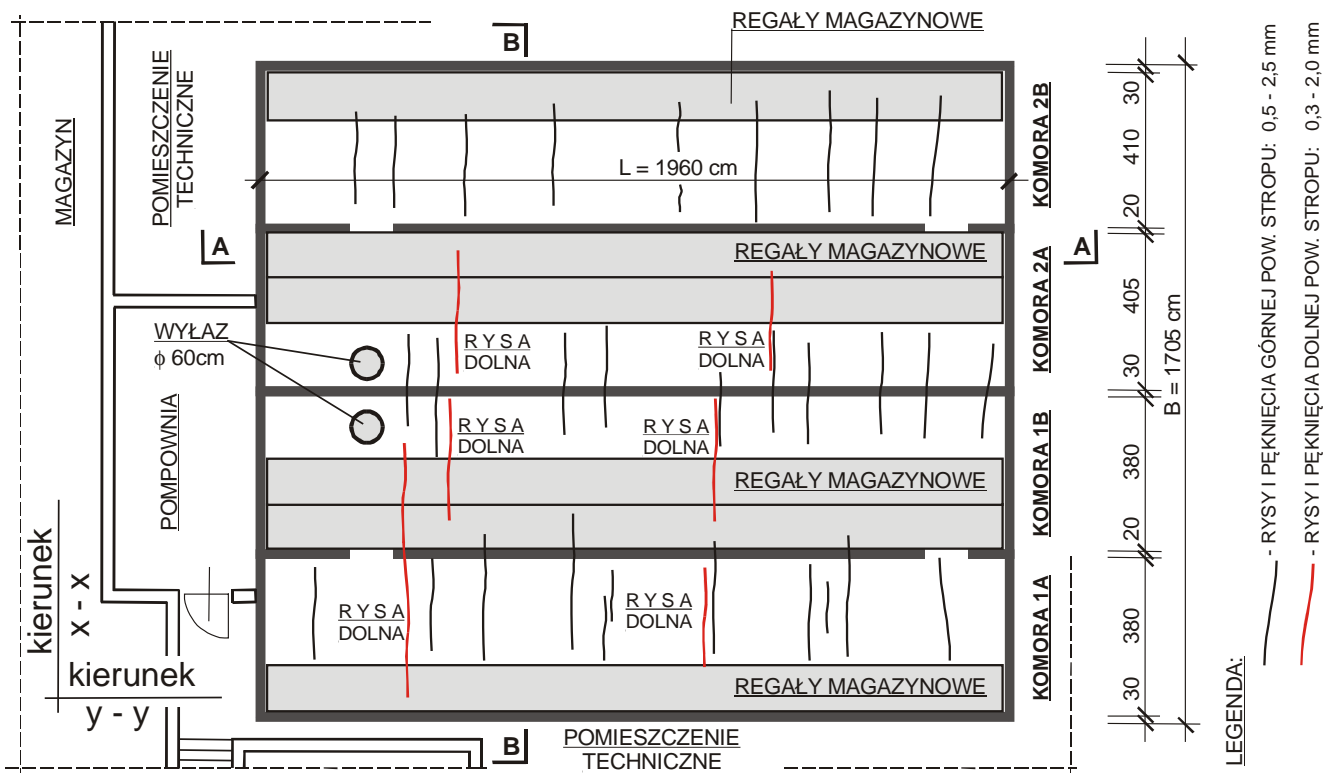
2. Charakterystyka rozwiązań konstrukcyjnych zbiornika

Podziemny zbiornik przeciwpożarowy o kształcie prostokątnym ukształtowano z dwóch komór, z których każda została przedzielona ścianą konstrukcyjną z dwoma prostokątnymi otworami, umożliwiającymi przepływ

wody w warunkach opróżniania. Zewnętrzne wymiary zbiornika, oznaczone na rysunku 5, wynoszą $17,05 \times 19,60$ metrów. Płytę dolną o grubości $0,40$ m posadowiono na rzędnej $-3,30$ m, przyjmując rzędną lokalną posadzki magazynowej parteru równą $0,00$ m. Grubość ściany środkowej wynosi $0,30$ m a grubości podłużnych ścian działowych podpierających górną płytę zbiornika i zmniejszających rozpiętość przęseł są równe $0,20$ m. Grubość ścian zewnętrznych i płyty górnej wynosi $0,30$ m. Poziom wody gruntowej stabilizował się na rzędnej $-2,10$ m. Wynika stąd, iż wysokość słupa wody obciążającej zewnętrzne ściany i dno zbiornika odpowiada $h = 1,20$ m. Fakt ten jest istotny w fazie opróżniania komory zbiornika, kiedy na płytę denną

komory będzie działało skierowane ku górze obciążenie odporem gruntu. Elementy konstrukcyjne zbiornika zaprojektowano z betonu klasy B30, a wymagania w zakresie szczelności oznaczono symbolem W8. Dostęp do każdej z komór zbiornika umożliwia jeden wąż zeliwny o średnicy $\phi \square 60$ cm.

Stan wnętrza magazynu z uwzględnieniem technologii użytkowania płyty stropu nad zbiornikiem pokazano na rysunku 6. Rodzaj i stan zbrojenia głównego i prętów rozdzielczych w konstrukcji płyty górnej oraz rzeczywistą wytrzymałość betonu, a więc główne parametry ograniczające proces zarysowań, zidentyfikowano w efekcie prac badawczych.



Rys. 5. Układ komór zbiornika. Morfologia stanu zarysowań



Rys. 6. Widok hali magazynowej w strefie zbiornika. Przykłady działających obciążeń

3. Procesy kontrolne stanu destrukcji. Identyfikacja wad

W rezultacie przeprowadzonych badań makroskopowych potwierdzono, sygnalizowany przez użytkownika, fakt nieregularnych zarysowań posadzki, usytuowanych wzdłuż kierunku głównego zbrojenia płyty. Rysy o rozwarości w granicach 0,5-2,5 mm, lokalizowano w rozstawach 1,2-2,0 m. Koncentracja wad wystąpiła wzdłuż środkowej ściany podłużnej oraz na pozostałych przestrzeniach komunikacyjnych, narażonych między innymi na zmienne w czasie obciążenie wózkami z towarem. Morfologię występujących wad, widocznych na powierzchni płyty, zilustrowano na rysunku 5. W trakcie prowadzenia prac badawczych opróżniono zbiornik umożliwiając dokonanie oględzin dolnej powierzchni stropu. Szczegółowe badania makroskopowe potwierdziły hipotezę występowania rys i spękań również na dolnej powierzchni płyty zbiornika. Szerokość rozwarcia wad zinwentaryzowanych na dolnej powierzchni płyty wynosiła około 0,3-2,0 mm.

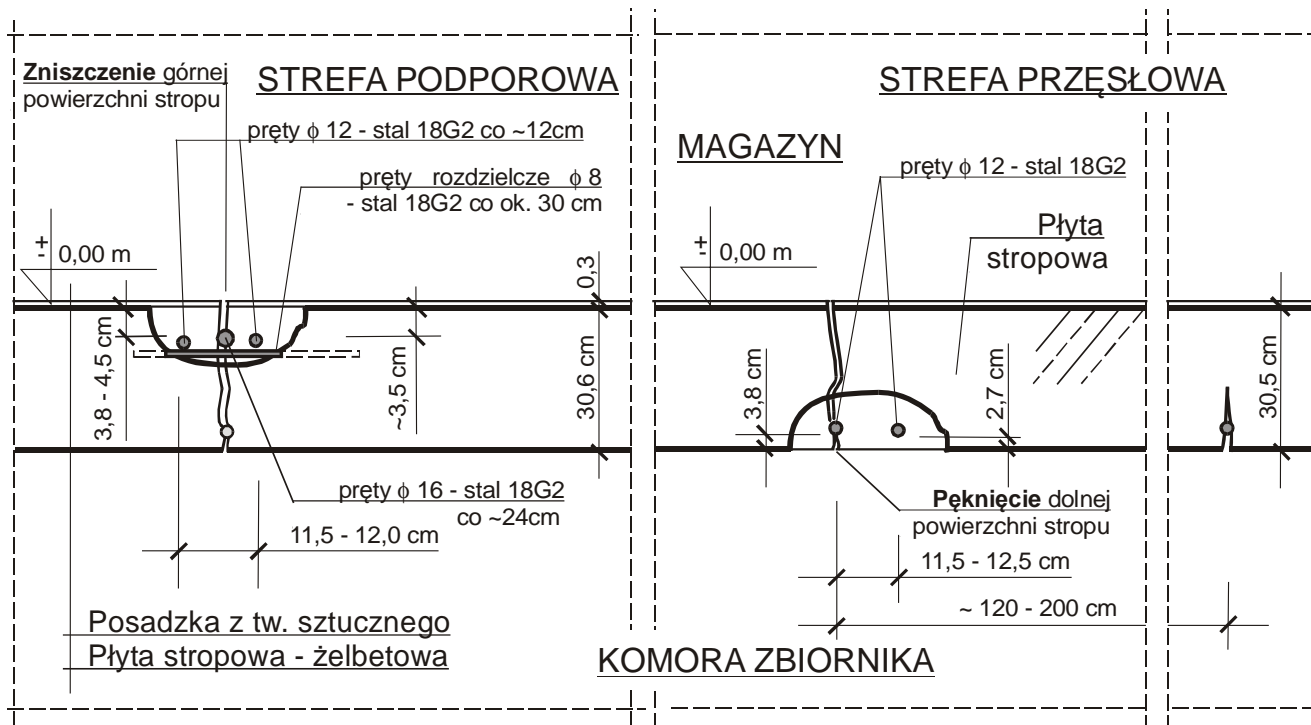
Badania stanu zbrojenia elementów żelbetowych realizowano stosując wstępne pomiary Fe-metryczne, co pozwoliło ograniczyć liczbę odkrywek i procesów niszczących (Runkiewicz, 2006). Identyfikując układ zbrojenia potwierdzono, iż rzeczywiste rozstawy prętów oraz sposób ich kształtowania są zgodne z rozwiązaniami projektowymi konstrukcji zbiornika (rys. 7). Płytę stropu zbiornika wykonano jako monolityczną o grubości około 30 cm, a zbrojenie górne w strefie podporowej usytuowano na wysokości około 3,5-4,5 cm poniżej powierzchni płyty. Pręty zbrojenia głównego i rozdzielczego wykonano ze stali klasy A-II, gatunku 18G2. Nie stwierdzono objawów korozji elementów

stalowych (Instrukcja ITB nr 361, 1999). W efekcie przeprowadzonych badań niszczących potwierdzono fakt pęknięcia płyty na pełnej grubości struktury żelbetowej.

Stan graniczny ugięć zidentyfikowano na podstawie pomiarów niwelacyjnych rzeczywistych odkształceń płyty. Największe przemieszczenia uzyskiwano w strefach destrukcji na całkowitej grubości płyty, wykazując lokalne stany zagrożeń w strefach pęknięć. Uzasadniono spełnienie warunku stanu granicznego użyteczności scharakteryzowanego nierównościami normowymi. Aktualną wytrzymałość betonu określono wstępnie na podstawie nieniszczących badań sklerometrycznych. Rzeczywistą klasę betonu zweryfikowano i potwierdzono w efekcie badań niszczących na podstawie normy PN-EN 12391-3:2002.

4. Stan obciążenia i wyteżenia płyty zbiornika

Płyta górna zbiornika przejmowała obciążenia wynikające z ciężaru stałego płyty, ciężaru palet z magazynowanymi towarami oraz ciężaru i ruchu środków transportowych. W analizowanym stanie ciężar regałów z produktami powodował największe wyteżenie materiału. Pasma transportowe usytuowano osiowo wzdłuż środkowej, podłużnej ściany zbiornika. W strefie transportowej wózki poruszały się w sposób nieregularny i uwarunkowany rozwiązaniami technologicznymi, uzasadnione więc było określenie pasma transportowego w sposób równomiernie rozłożony. W konfiguracji obciążeń uwzględniono również fakt, iż w pasmach składowania palet nie obciąża się płyty środkami transportowymi, a pasmo transportowe nie jest blokowane składowaniem palet. Analizowane przypadki obciążeń zilustrowano na rysunku 6.



Rys. 7. Detale zbrojenia płyty określone w efekcie prac inwentaryzacyjnych

W strefie dolnej płyty zbiornika zidentyfikowano zbrojenie z prętów ze stali 18G2 o średnicy $\phi \square 12$ mm, usytuowanych w rozstawach co 12 cm. Dla wysokości płyty $h = 0,30$ m graniczna wartość momentu zginającego przeszła wynosi $M_{Rd} = 75,92$ kNm. Maksymalny obliczeniowy moment przeszłowy określony na podstawie obliczeń jest równy $M_o = 32,64$ kNm.

Spełniony jest zatem warunek stanu granicznego nośności:

$$M_{Rd} = 75,92 \text{ kNm} > M_{Sd} = M_o = 32,64 \text{ kNm}, \quad (1)$$

określony w normie PN-B-03264:1984, którą wykorzystywano do projektowania konstrukcji.

W strefie górnej płyty zidentyfikowano zbrojenie z prętów ze stali 18G2 o średnicy $\phi \square 12$ mm, usytuowanych w rozstawach co 12 cm oraz dodatkowo z prętów

o średnicy $\phi \square 16$ mm, usytuowanych w rozstawach co 24 cm. Graniczna wartość momentu zginającego w strefie podpory wynosi $M_{Rd} = 135,10$ kNm. Maksymalny obliczeniowy moment przeszłowy określony na podstawie obliczeń wynosi $M_o = 75,25$ kNm. Również w tym przypadku spełniony jest warunek stanu granicznego nośności:

$$M_{Rd} = 135,10 \text{ kNm} > M_{Sd} = M_o = 75,25 \text{ kNm}, \quad (2)$$

określony w normach, co uzasadnia, iż proces zginania płyty w strefach przęseł i podpór jest bezpieczny.

Ponieważ analiza stanu nośności granicznej w kierunku „x-x” określonego przez pręty zbrojenia głównego nie wyjaśniła zaistniałego procesu zarysowań i spękań, poddano analizie stan zginania pasm płytowych w kierunku „y-y”, wskazanym na rysunku 5.

Najważniejszym parametrem weryfikującym stan zginania płyty górnej zbiornika w kierunku „y-y” jest różnica między temperaturą obu powierzchni przegrody (Krentowski i in., 2007). Wartości parametrów T_d i T_g , czyli rzeczywistych temperatur na dolnej i górnej powierzchni płyty zidentyfikowano metodą pomiarów pirometrycznych. Badania realizowano w sezonie zimowym. Dla wartości $\Delta T = +3^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C} = -11^\circ\text{C}$ obliczono, iż jeden metr szerokości płyty jest zginany momentem o wartości $M_y(\Delta T) = 33,40$ kNm/m.

Minimalny przekrój zbrojenia usytuowanego przy rozciąganej krawędzi przekroju, wg PN-B-03264:2002, w elementach zginanych bez udziału siły podłużnej, powinien wynosić $A_{s1,min} = 0,0013bd = 3,25$ cm². W kierunku „y-y” płyty zbiornika usytuowano pręty rozdzielcze o średnicy 8 mm ze stali 18G2 w rozstawie co 30 cm. Rzeczywisty procent zbrojenia jest zatem równy $A_{s1} = 1,67$ cm² < $A_{s1,min} = 3,25$ cm², co uzasadnia wykorzystanie analizy rozkładu naprężeń w określeniu nośności granicznej jak dla przekroji betonowych. Momenty zginające płytę określone są wzorem (Kączkowski, 2000):

$$M_y = -D(1+\nu) \frac{\alpha_t \cdot \Delta T}{h}, \quad (3)$$

gdzie: D jest sztywnością płyty, ν jest współczynnikiem Poissona, h jest grubością płyty, α_t jest współczynnikiem rozszerzalności liniowej betonu, $\Delta T = T_d - T_g$ oznacza największą różnicą temperatur między dolną a górną powierzchnią płyty.

Nośność graniczną struktury betonowej klasy B30 w kierunku „y-y” określa nierówność normowa:

$$M_y(\Delta T) = 33,40 \text{ kNm} > R_{bbz} \cdot 0,292 \cdot b \cdot h^2 = 23,91 \text{ kNm} \quad (4)$$

a niespełnienie warunku normowego, w postaci obliczonej silnej nierówności, dokumentuje przyczynę powstania zniszczeń struktury betonu.

Naprężenia w skrajnych pasmach betonu klasy B30 wynoszą

$$\sigma_y = \frac{M}{W_f} = \frac{M}{0,292 \cdot b \cdot h^2} = 1,27 \text{ MPa} > R_{bbz} = 0,91 \text{ MPa} \quad (5)$$

uzasadniając spękania i zniszczenie płyty górnej i są przyczyną stanu awaryjnego płyty.

Analizując normatywne wartości obliczeniowe stwierdzono, iż ekstremalne obciążenia temperaturą mogą wystąpić w okresie letnim i zwiększyć efekty procesów zginania obliczone w analizie nośności metodą stanów granicznych. Sformułowane wnioski potwierdzają zrealizowane badania pirometryczne uwzględniające procesy nasłonecznienia i parowania.

Wykorzystując fakt, iż $M_x(\Delta T) = M_y(\Delta T)$ obliczono momenty zginające M_x rozciągające dolne zbrojenie płyty, osłabiające nierówność normową, jednak spełniony pozostaje warunek

$$M_{Sd} = M_x = M_{ox} + M_{ox}(\Delta T) = 32,64 + 33,40 = 66,04 \text{ kNm} < M_{Rd} = M_{gr} = 75,92 \text{ kNm} \quad (6)$$

Stan konstrukcji płyty w strefie podłużnych ścian podporowych nie jest poprawny również w zakresie projektowania prętów rozdzielczych. Stosunek nośności prętów rozdzielczych N_{or} do nośności zbrojenia górnej strefy płyty N_{on} nie spełnia warunku konstrukcyjnego normy, ponieważ

$$N_{or} / N_{on} = 0,09 < 0,10. \quad (7)$$

Uzasadniono zatem, iż wydzielone kolejnymi rysami pasma płytowe stwarzały stan zagrożenia, szczególnie podczas zmian obciążenia spowodowanego dynamicznym oddziaływaniem środków transportowych, przy równocześnie procesie obciążania materiałami magazynowymi. Skokowo zmienna, nieciągła funkcja siły poprzecznej $Q(P_V)$ między dwoma sąsiednimi pęknięciami, mogła spowodować „tąpnięcie” betonu i katastrofę powodującą zniszczenie fragmentu stropu.

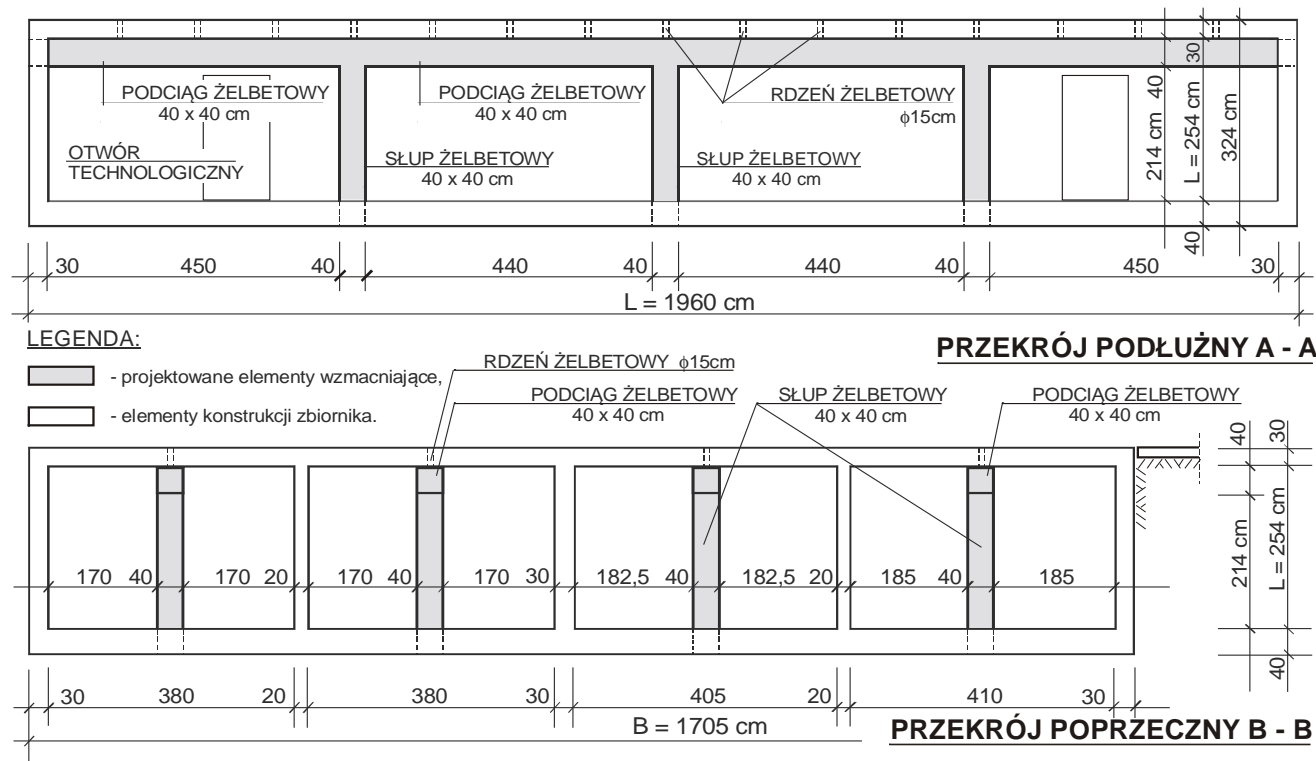
5. Konstrukcja wzmacniająca płytę stropu zbiornika

Zbiornik podziemny zlokalizowany w hali magazynowej wykonano z betonu zbrojonego. Inwentaryzowane stadium awarii objęło zasięgiem płytę górną zbiornika przy poprawnym stanie technicznym dna i ścian konstrukcyjnych. Z tego względu zdecydowano wykonać roboty naprawcze również z betonu zbrojonego, łącząc trwale konstrukcyjne elementy wsporcze, przywracając wymagane cechy bezpieczeństwa.

W celu poprawnej realizacji konstrukcji wsporczych niezbędne było dokonanie oceny fazy pracy materiałów konstrukcyjnych (Runkiewicz, 2011). Na podstawie przeprowadzonych badań i identyfikacji procesu odkształceń ustalono, iż płyta górna, mimo uzasadnionych zniszczeń, nie utraciła cech sprężystych, uogólnionych do dwuwymiarowego obszaru. Konsekwencją wskazanych wyników prac badawczych było opracowanie koncepcji (rys. 8) oraz dokumentacji wykonawczej, a następnie przystąpienie do stadium realizacji wzmocnień. Żelbetową konstrukcję monolityczną wykonano z betonu klasy C35/45, w postaci czteroprzęsłowego podciągu o wymiarach 40x40 cm, opartego w gniazdach, profilowanych w skrajnych ścianach szczytowych zbiornika oraz na słupach o przekroju kwadratowym, 40x40 cm. Podciągi połączone z płytą górną zbiornika indywidualnie projektowaną strukturą okrągłych trzpieni, redukujących wzajemne przemieszczenia w kierunku pionowym wyodrębnionych pasm płytowych, minimalizując je do wartości $\Delta Z \rightarrow 0$. Ze względu na zbliżone wysokości obu elementów, fragmenty splekanych przekroji płyt betonowych będą charakteryzowały się kątem obrotu i krzywizną zmniejszającą efekty destrukcji.

Wzmocnienie płyty górnej zbiornika realizowano etapami. Kolejność robót wynikała z procesu technologii użytkownika magazynu przez użytkownika oraz zapewnienia odpowiedniej ilości wody do celów gaśniczych. Konstrukcję betonowano poprzez otwory o średnicy $\phi 150$ mm, wykonane w formie odwiertów (rys. 9). Do procesu zagęszczania betonu klasy C35/45, wykorzystywano pogrążalne wibratory buławowe. Wszelkie łączenia prętów wykonywano na zakład o długości 60 cm. Niedopuszczalne było łączenie prętów poprzez spawanie, z uwagi na brak właściwej wentylacji w pomieszczeniach komór zbiornika.

Na trwałość współpracy zbrojenia z betonem ma wpływ środowisko powietrzne z parą nasyconą wewnątrz zbiornika i woda magazynowana wewnątrz komór. Są to zasadnicze czynniki obniżające trwałość konstrukcji, a szczególnie degradujące proces ochronny zbrojenia przed wpływem wody i wilgoci. Implikowało to konieczność wykonania iniekcji ciśnieniowej w strefach przestrzeni rys i pęknięć, przeciwdziałającej procesom korozji zbrojenia przez zamknięcie dostępu wilgotnego powietrza i równoczesne zespolenie rozwartych krawędzi. Zastosowano żywicowy materiał iniekcyjny włączany wysokociśnieniową pompą iniekcyjną. Etapy realizacji konstrukcji wzmacniającej przedstawiono na rysunku 10. Wykonana konstrukcja zabezpieczy obiekt przed procesami degradacji a okres eksploatacji płyty górnej zbiornika zapewni trwałość równorzędną pozostałym elementom obiektu w istniejących warunkach wpływu środowiska, określonego klasą XC-4. Wykonana konstrukcja powinna być monitorowana zgodnie z warunkami określonymi w ustawie (Dz. U. nr 156, 2006).



Rys. 8. Koncepcja konstrukcji wzmacniającej płytę zbiornika



Rys. 9. Odwierty rdzeniowe płyty zbiornika. Próbkę przygotowane do badań w maszynie wytrzymałościowej



Rys. 10. Realizacja wewnętrznej konstrukcji wzmacniającej płytę zbiornika

6. Podsumowanie

Wady w projektowaniu prętów rozdzielczych zbrojenia płyty górnej zbiornika stymulowały zaistnienie stanu awaryjnego konstrukcji. Przekrój płyty w kierunku „y-y”, prostopadłym do zbrojenia głównego, zaklasyfikowano jako betonowy, gdyż zastosowano zbrojenie o przekroju mniejszym niż wymagany zapisami normy. Nośność niezbrojonego elementu betonowego, obciążonego różnicą temperatur na dolnej i górnej powierzchni płyty, okazała się niewystarczającą, co skutkowało zniszczeniem struktury betonu wskutek działania momentów zginających $M_y(\Delta T)$ i powstania pęknięć płyty wzdłuż kierunku „x-x”, równoległego do kierunku zbrojenia głównego.

Wykazano, iż wpływ obciążeń termicznych, zarówno technologicznych jak i środowiskowych, skutkuje zwiększeniem stanu odkształceń i musi być uwzględniony na etapie kształtowania konstrukcji obiektu budowlanego, ponieważ może prowadzić do wystąpienia stanu zagrożenia katastrofą (Ajdukiewicz i in., 2005).

Literatura

Ajdukiewicz A., Szojda L., Wandzik G., Węglorz M. (2005). Stan awaryjny i sposób naprawy szczelinowego zbiornika na

- węgiel. W: materiały XXII Konferencja Naukowo-Techniczna – Awarie budowlane, Szczecin – Międzyzdroje.
- Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A. (2010). Diagnostyka Konstrukcji Żelbetowych. Metodologia, Badania Polowe, Badania Laboratoryjne Betonu I Stali. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Kączkowski Zb. (2000). Płyty. Obliczenia Statyczne. *Arkady*, Warszawa.
- Krentowski J., Tribiłło R. (2010). Wpływ obciążenia temperaturą na stan odkształceń płyty przekrywającej zbiornik wypełnionym ciepłym medium. *Przegląd Budowlany*, 5/2010.
- Krentowski J., Szelaż R., Tribiłło R. (2007). Stany graniczne konstrukcji zbiorników żelbetowych uogólnione o funkcje nasłonecznienia. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*, Budownictwo, No 31, Białystok.
- Runkiewicz L. (2006). Diagnostyka konstrukcyjna obiektów budowlanych. *Przegląd budowlany*, 3/2006.
- Runkiewicz L. (2011). Charakterystyka materiałowa zagrożeń, awarii i katastrof budowlanych. *Materiały budowlane*, 2/2011.
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane. *Dz.U. nr 156 z 2006 r.*, poz. 1118 (tekst jednolity z późniejszymi zmianami).
- Instrukcja nr 361/1999. Zasady oceny bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych., *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa, 1999.

**ANALYSIS OF THE IMPACT
OF TEMPERATURE LOAD ON THE BUILDING
CONSTRUCTION STRAIN STATE**

Abstract: The authors analyze the impact of the phenomenon of temperature load on the building structure deformation processes. As an example, the failure of the top plate of the tank to the liquid medium was described. Defects such as cracks along the direction of the main reinforcement in the structural elements occurred. The structure was designed properly in terms of static and dynamic loads, but without taking into account the impact of temperature load. As a result of

the analysis, errors in the design of distributive reinforcement are shown, which resulted in a state of the structure degradation. The concept of repairing a damaged tank plate is given. Authors present the course of reinforcement works. The stated thesis of the possibility of design defects or errors in terms of missed important type of load was confirmed.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach Pracy Statutowej nr S/WBiŚ/3/09