

Wpływ obciążenia temperaturą na stan odkształceń płyty przekrywającej zbiornik wypełniony ciekłym medium

Dr inż. Janusz Krentowski, prof. dr hab. inż. Rościsław Tribiło, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Identyfikacja struktury i morfologii obciążeń w zrealizowanych i eksploatowanych konstrukcjach 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 [1]. Szczególnie istotne jest uwzględnienie konsekwencji oddziaływania obciążeń wyjątkowych w formie obciążeń pozastatycznych, m.in. wpływu temperatury na elementy konstrukcji inżynierskich, np. zbiorników, skutkującego powstaniem stadium zagrożenia [3].

2. Charakterystyka rozwiązań konstrukcyjnych zbiornika

Podziemny zbiornik przeciwpożarowy zlokalizowano w strefie magazynowej budynku centrum handlowego. Żelbetowy zbiornik

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 2, wynoszą $17,05 \times 19,60$ m. Płytę dolną o grubości $0,40$ m posadowiono na rzędnej $-3,30$ m, przyjmując rzędną lokalną posadzki magazynowej parturu równą $0,00$ m. Grubość ściany środkowej wynosi $0,30$ m, a grubości podłużnych ścian działowych, podpierających górną płytę zbiornika i zmniejszających rozpiętość przęsła, są równe $0,20$ m. Grubość ścian zewnętrznych i płyty górnej wynosi $0,30$ m. Poziom wody gruntowej określono 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 żeliwny o średnicy $\varnothing 60$ cm. Stan wnętrza magazynu z uwzględnieniem technologii użytkowania płyty stropu nad zbiornikiem pokazano na rysunku 1.

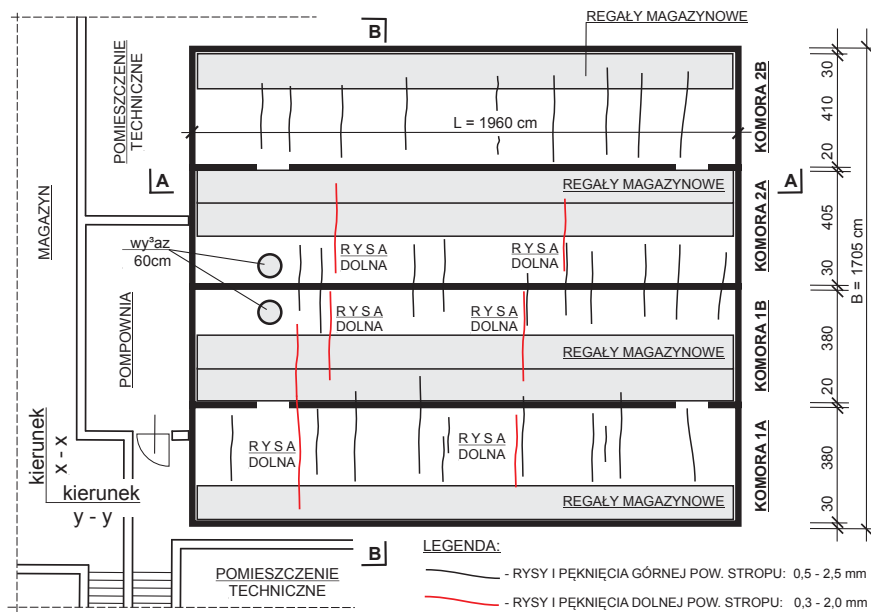
Rodzaj i stan zbrojenia głównego i prętów rozdzielczych w konstrukcji płyty górnej oraz rzeczywistą wytrzymałość betonu, a więc główne parametry ograniczające proces zarysowań, zidentyfikowano w efekcie prac badawczych.

3. Procesy kontrolne stanu destrukcji. Wady

W rezultacie przeprowadzonych badań makroskopowych potwierdzono, sygnalizowany przez użytkownika, fakt nieregularnych zarysowań posadzki, usytuowanych wzdłuż kierunku głównego zbrojenia płyty. Rysy o rozwarłości w granicach $0,5$ – $2,5$ mm, zlokalizowano w rozstawach $1,2$ – $2,0$ m. Koncentracja wad wystąpiła



Rys. 1. Widok hali magazynowej w strefie zbiornika. Przykłady działających obciążeń



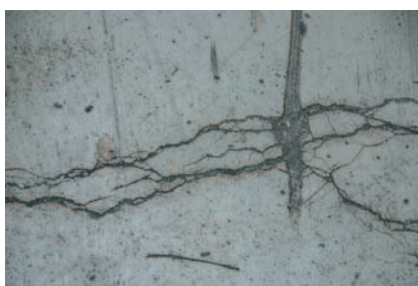
Rys. 2. Układ komór zbiornika. Morfologia stanu zarysowań

wzdłuż środkowej ściany podłużnej oraz na pozostałych przestrzeniach komunikacyjnych, narażonych, m.in. na zmienne w czasie obciążenie wózkami z towarem. Morfologię występujących wad, widocznych na powierzchni płyty, zilustrowano na rysunkach 2 i 3. W trakcie prowadzenia prac badawczych opróżniono zbiornik umożliwiając dokonanie oględzin dolnej powierzchni stropu. Szczegółowe badania makrosko-

powe 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, [2]. Identyfikując układ zbroje-

nia potwierdzono, iż rzeczywiste rozstawy prętów oraz sposób ich kształtowania są zgodne z rozwiązaniami projektowymi konstrukcji zbiornika. Dokładne parametry określono na podstawie zminimalizowanej liczby badań niszczących (por. rys. 4). 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 [7]. W efekcie przeprowadzonych badań niszczących potwierdzono fakt pęknięcia płyty na pełnej grubości struktury żelbetowej (por. rys. 5).

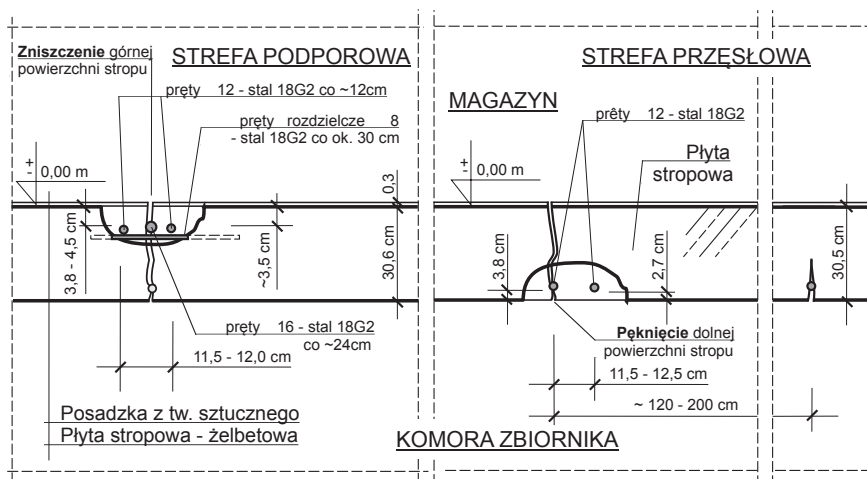
Stan graniczny ugięć zidentyfikowano na podstawie pomiarów niwelacyjnych rzeczywistych odkształceń płyty. Największe przemieszczenia uzyskiwano w strefach destrukcji na całkowitej grubości płyty, wykazując lokalne stany zagrożeń w strefach pęknięć. Uzasadniono spełnienie warunku stanu granicznego użyteczności scharakteryzowanego nierównością normową [8]. Aktualną wytrzymałość betonu określono wstępnie na podstawie



Rys. 3. Zarysowania posadzki zbiornika. Wnętrze komory zbiornika przeciwpożarowego



Rys. 4. Odkrywki zbrojenia płyty stropowej zbiornika w strefie pęknięcia



Rys. 5. Detale zbrojenia płyty określone w efekcie prac inwentaryzacyjnych

nieniszczących badań sklerometrycznych. Rzeczywistą klasę betonu zweryfikowano i potwierdzono w efekcie badań niszczących [10].

4. Stan obciążenia 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 wyężenie 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 środ-

kami transportowymi, a pasmo transportowe nie jest blokowane składowaniem palet. Analizowane przypadki obciążeń zilustrowano na rysunku 1.

5. Stan wyężenia płyty zbiornika

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

Spełniony jest zatem warunek stanu granicznego nośności, $M_{Rd} = 75,92$ kNm $>$ $M_{Sd} = M_o = 32,64$ kNm, określony w normie [8] oraz normie [4], którą wykorzystywano do projektowania konstrukcji.

W strefie górnej płyty zidentyfikowano zbrojenie z prętów ze stali

18G2 o średnicy $\varnothing 12$ mm, usytuowanych w rozstawach co 12 cm oraz dodatkowo z prętów o średnicy $\varnothing 16$ mm, usytuowanych w rozstawach co 24 cm. Graniczna wartość momentu zginającego w strefie podpory wynosi $M_{Rd} = 135,10$ kNm. Maksymalny obliczeniowy moment przęsłowy określony na podstawie obliczeń wynosi $M_o = 75,25$ kNm.

Również w tym przypadku spełniony jest warunek stanu granicznego nośności,

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

określony w normach [8] oraz [4], co uzasadnia, iż proces zginania płyty w strefach przęsł i podpór jest bezpieczny.

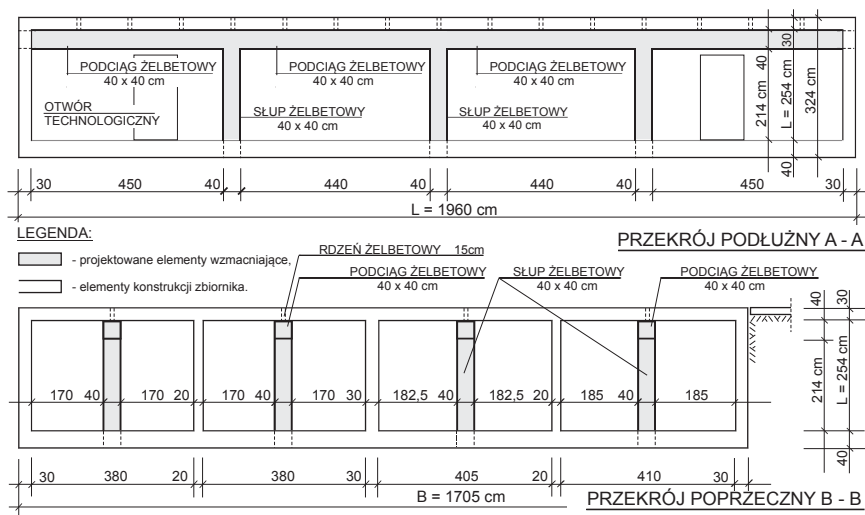
Ponieważ analiza stanu nośności granicznej w kierunku „x-x” określonego przez pręty zbrojenia głównego nie wyjaśnia zaistniałego procesu zarysowań i spękań, poddano analizie stan zginania pasm płytowych w kierunku „y-y”, wskazanym na rysunku 2.

Najważniejszym parametrem weryfikującym stan zginania płyty górnej zbiornika w kierunku „y-y” jest różnica między temperaturą obu powierzchni przegrody [5]. 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 [8], w ele-



Rys. 6. Odwierty rdzeniowe płyty zbiornika. Próbki przygotowane do badań w maszynie wytrzymałościowej [9]



Rys. 7. Koncepcja konstrukcji wzmacniającej płytę zbiornika

mentach zginanych bez udziału siły podłużnej, powinien wynosić $A_{s1,min} = 0,0013 bd = 3,25 \text{ cm}^2$. 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 $A_{s1} = 1,67 \text{ cm}^2 < A_{s1,min} = 3,25 \text{ cm}^2$, co uzasadnia wykorzystanie analizy rozkładu naprężeń w określeniu nośności granicznej jak dla przekroji betonowych.

Nośność graniczną struktury betonowej klasy B30 w kierunku „y-y” określa nierówność sformułowana w normie [4], na podstawie której projektowano obiekt:

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

Niespełnienie warunku normowego, w postaci silnej nierówności, dokumentuje przyczynę powstania zniszczeń struktury betonu.

Naprężenia w skrajnych pasmach betonu klasy B30, wg [4], wynoszą:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{M}{W_f} = \frac{M}{0,292 \cdot b \cdot h^2} = \\ &= 1,27 \text{ MPa} > R_{bbz} = 0,91 \text{ MPa} \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} M_{sd} = M_x &= M_{ox} + M_{ox}(\Delta T) = \\ &= 32,64 + 33,40 = 66,04 \text{ kNm} \\ &< M_{rd} = M_{gr} = 75,92 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

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 [8], ponieważ, $N_{or}/N_{on} = 0,09 < 0,10$.

Uzasadniono, iż wydzielone kolejnymi rysami pasma płytowe stwarzały stan zagrożenia, szczególnie podczas zmian obciążenia spowodowanego dynamicznym oddziaływaniem środków transportowych przy równoczesnym 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.

6. 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, przywracające poprawne cechy bezpieczeństwa udokumentowane obliczeniami, wykorzystując metodę nośności granicznej [11].

W celu poprawnej realizacji konstrukcji wsporczych, niezbędne było dokonanie oceny fazy pracy materiałów konstrukcyjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań i identyfikacji procesu odkształceń ustalono, iż płyta górna, mimo uzasadnionych zniszczeń, nie utraciła cech sprężystych, uogólnionych do dwuwymiarowego obszaru.



Rys. 8. Realizacja wewnętrznej konstrukcji wzmacniającej płytę zbiornika

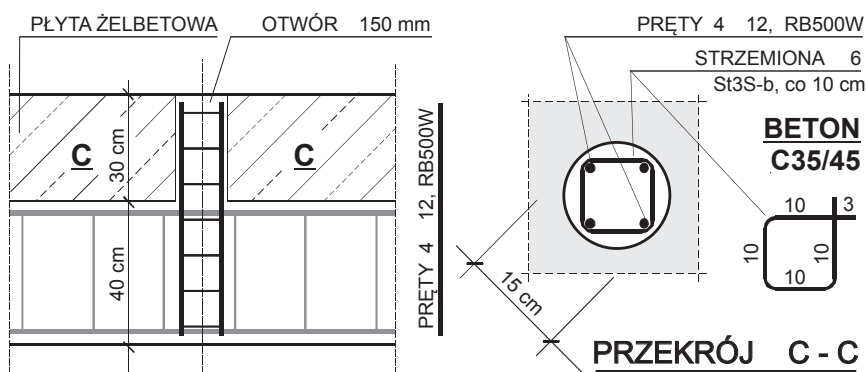
Konsekwencją wskazanych wyników prac badawczych było opracowanie koncepcji (por. rys. 7) oraz dokumentacji wykonawczej, a następnie przystąpienie do stadium realizacji wzmocnień. Żelbetową konstrukcję monolityczną wykonano z betonu klasy C35/45, w postaci czteroprzęsłowego podciągu o wymiarach 40 x 40 cm, opartego w gniazdach profilowanych w skrajnych ścianach szczytowych zbiornika oraz na słupach o przekroju kwadratowym, 40 x 40 cm. Podciągi połączono z płytą górną zbiornika indywidualnie projektowaną strukturą okrągłych trzpieni, według rysunku 9, 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 spękanych 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 $\varnothing 150$ mm, wykonane w formie odwertów. 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 koniecz-



Rys. 9. Szczegół zespolenia konstrukcji wzmocniającej z płytą żelbetową

ność wykonania iniekcji ciśnieniowej w strefach przestrzeni rys i pęknięć, przeciwdziałającej procesom korozji zbrojenia przez zamknięcie dostępu wilgotnego powietrza i równoczesne zespolenie rozwartych krawędzi. Zastosowano żywiczny materiał iniekcyjny włączony wysokociśnieniową pompą iniekcyjną [6]. Etapy realizacji konstrukcji wzmocniającej przedstawiono na rysunku 8.

Wykonana konstrukcja zabezpieczy obiekt przed procesami degradacji, a okres eksploatacji płyty górnej zbiornika zapewni trwałość równorzędną pozostałym elementom obiektu w istniejących warunkach wpływu środowiska, określonej klasą XC-4 [8].

7. Podsumowanie

Wady w projektowaniu prętów rozdzielczych zbrojenia płyty górnej zbiornika stymulowały zaistnienie stanu awaryjnego konstrukcji. Przekrój płyty w kierunku „y-y” zaklasyfikowano jako betonowy, gdyż zastosowano zbrojenie o przekroju mniejszym niż wymagany zapisami normy [8]. Nośność niezbrojonego elementu betonowego 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.

Analizując normatywne wartości obliczeniowe [5] 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 następczenia i parowania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ajdukiewicz A., i in., Stan awaryjny i sposób naprawy szczelinowego zbiornika na węgiel. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna – Awaria budowlane, Szczecin – Międzyzdroje, 2005
 - [2] Runkiewicz L., Diagnostyka konstrukcyjna obiektów budowlanych. Przegląd Budowlany, nr 3/2006, Warszawa
 - [3] Tribiňto R., Krentowski J., Awaria żelbetowych ścian zbiorników na odpady paleniskowe. Inżynieria i Budownictwo, nr 3/1998
 - [4] PN-84/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie
 - [5] PN-86/B-02015 Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą
 - [6] PN-86/B-01806 Antykorozyjne zabezpieczenia w budownictwie. Ogólne zasady użytkowania konstrukcji i napraw
 - [7] PN-88/B-01807 Antykorozyjne zabezpieczenia w budownictwie. Konstrukcje betonowe i żelbetowe. Zasady diagnostyki konstrukcji
 - [8] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie
 - [9] PN-EN 12504-1: 2002 Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Odwerty rdzeniowe – Wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie
 - [10] PN-EN 12390-3: 2002 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
 - [11] PN-EN 1504-4:2006 „Wyroby i systemy do ochrony i naprawy konstrukcji betonowych. Część 4: Łączenie konstrukcyjne”
- Artykuł opracowano w ramach pracy statutowej S/WBiłŚ/3/04