

Analiza odkształceń i naprężeń w żelbetowym pilastrze sprężonego zbiornika kołowego

Rafał Szydłowski¹, Andrzej Seruga²

Politechnika Krakowska

Streszczenie: W konstruowaniu sprężonych zbiorników cylindrycznych, z uwagi na duże siły występujące w strefach zakotwień, powszechnie projektuje się masywne pilastry, w których wyprowadza się z powłoki i kotwi kable sprężające. Obecność pogrubień na obwodzie ściany zaburza pracę błonową i stan naprężeń w powłoce. Ich określenie w prostym inżynierskim oprogramowaniu do projektowania konstrukcji jest niezwykle trudne. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń w zrealizowanym zbiorniku cylindrycznym oraz zestawiono je z wynikami obliczeń uzyskanymi z prostego inżynierskiego programu do analizy statycznej zbiornika.

Słowa kluczowe: kablobeton, odkształcenia betonu, pilastr, zbiornik sprężony

1. Wstęp

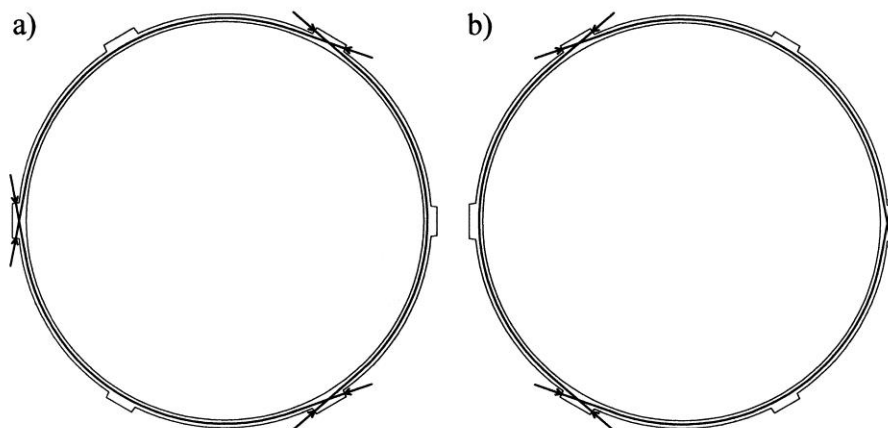
Technologia sprężania cylindrycznych zbiorników na cieczce ewaluowała w Polsce od lat 50-tych ubiegłego stulecia. Od pierwszych zbiorników sprężonych w 1957 roku w Krakowie kablami pasmowymi kotwionymi w zakotwieniach Magnela (płytki w kształcie klina kotwione w zbieżnych rowkach) [1] oraz w 1958 na Dolnym Śląsku metodą Michaiłowa (pręty stalowe naprężane przez dokręcanie nakrętek) [2], po pierwsze zastosowanie splotów sprężających do sprężenia silosu w 1984 roku (zastosowano metodę poprzecznego odkształcania zakotwionych splotów) [3]. W latach 1988-1992 zrealizowano 4 zbiorniki o pojemności jednostkowej 34 000 m³ w Sierszy k. Wieliczki na wodę pitną dla m. Krakowa z zastosowaniem wewnętrznych cięgien 5×7φ5.

Wykonywanie zbiorników o dużych pojemnościach wymaga stosowania kabli o dużej mocy, to z kolei generuje potrzebę wykonywania masywnych żelbetowych pilastrów kotwiących. Liczba pilastrów na obwodzie zbiornika cylindrycznego wynika z potrzeby ograniczenia długości, a tym samym strat siły od tarcia splotów o osłonki kablowe. W tym celu kable dzieli się na odcinki równe 1/4, 1/3 bądź 1/2 obwodu. Dodatkowo, w celu wyrównania rozkładu siły na obwodzie i na wysokości ściany, kotwienie co drugiego kabla jest przesunięte o połowę jego długości. Liczba pilastrów podwaja się. Przykładowo, w przypadku kabla o długości 1/3 obwodu potrzebne jest 6 pilastrów (rys. 1).

Z uwagi na zaburzenie błonowej pracy powłoki w miejscach pilastrów (pogrubień) oraz skomplikowany przebieg tras kabli wywołujący w tym miejscu trójosiowy stan naprężeń, określenie stanu odkształceń i naprężeń w tym miejscu, wykorzystując inżynierskie oprogramowanie do globalnej analizy konstrukcji jest niezwykle trudne. Pilastry zazwyczaj modelowane są jako pogrubienie ściany, lecz jako współosiowe ze ścianą (rys. 6b). Na przesunięcie ich osi względem osi ściany (co można w prosty sposób zrealizować w przypadku elementów belkowych) nie pozwala dostępne oprogramowanie. Znajomość rozkładu odkształceń i naprężeń może być przydatna natomiast przy racjonalnym kształtowaniu zbrojenia tych stref. W kolejnych punktach przedstawiono wyniki pomiarów poziomych odkształceń w pilastrze zrealizowanych podczas sprężania ściany zbiornika, oraz w oparciu o otrzymane wyniki, próbę oszacowania naprężeń w takim pilastrze.

¹ dr inż., rszydowski@pk.edu.pl

² prof. dr hab. inż., aseruga@pk.edu.pl



Rysunek 1: Zbiornik kołowy z kablami o długości 1/3 obwodu: kotwienie kabli parzystych (a) i nieparzystych (b)

2. Geometria zbiornika, charakterystyka sprężenia

Średnica wewnętrzna badanego zbiornika cylindrycznego wynosi 18,0 m a grubość ściany 0,30 m (rys. 2). Wysokość ściany od górnej powierzchni płyty fundamentowej do dolnej krawędzi żelbetowego dachu stożkowego wynosi 19,44 m. Ściana utwierdzona jest w płycie fundamentowej o grubości 0,60 m. Ścianę betonowano w 7 segmentach o długości pełnego obwodu i wysokości od 2,85 do 2,97 m. Jedynie najwyższy segment miał wysokość 1,75 m. Na obwodzie zbiornika zlokalizowano 4 pilastry o grubości całkowitej (razem ze ścianą) wynoszącej 0,57 m oraz szerokości 2,50 m.

Do wykonania zbiornika użyto betonu klasy C35/45 wykonanego na cemencie CEM I 42,5 R i kruszywie bazaltowym, o stosunku wodno-cementowym 0,39 i wodoszczelności W12. Zastosowanie kruszywa bazaltowego pozwoliło uzyskać wysoką wartość modułu sprężystości betonu. Po 28 dniach uzyskano wartość (na walcach $\phi 150 \times 300$ mm) równą 47,0 GPa (rys. 3b). Średnia walcowa wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wynosiła 56,0 MPa (rys. 3a).

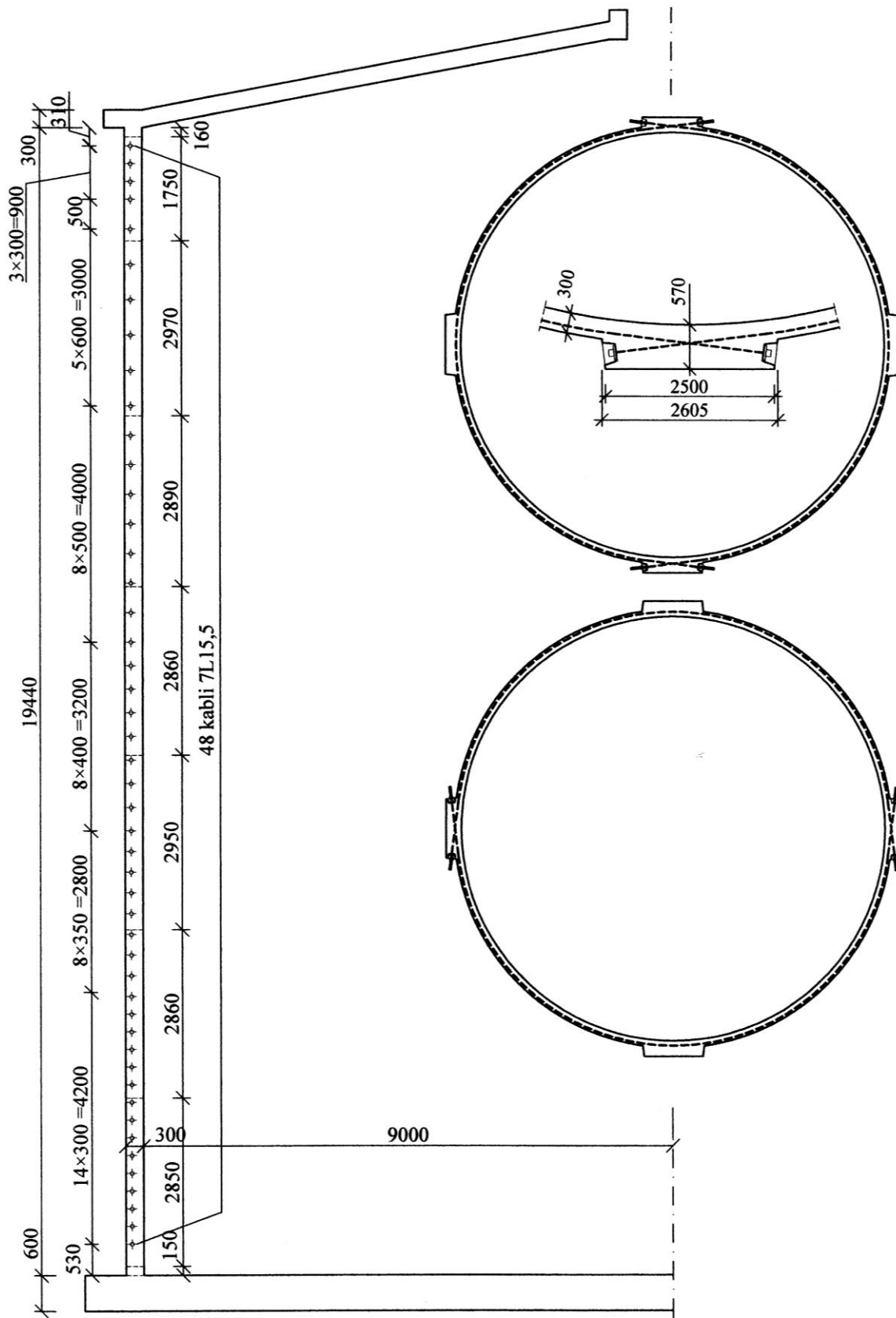
Zbiornik sprężono 48 obwodowymi kablami 7L15,5 o długości kabla równej połowie obwodu, kotwionymi naprzemiennie w 4 pilastrach. Każdy kabel napięto siłą 1400 kN (200 kN na splot). Sprężenie zrealizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie napinano co drugi kabel od góry do dołu kotwiony w jednej parze pilastrów, w etapie drugim kable kotwione w drugiej parze pilastrów, również od góry do dołu.

Szczegółową geometrię zbiornika wraz ze zbrojeniem, technologię jego wznoszenia oraz więcej charakterystyk wytrzymałościowych betonu zamieszczono w pracy [4].

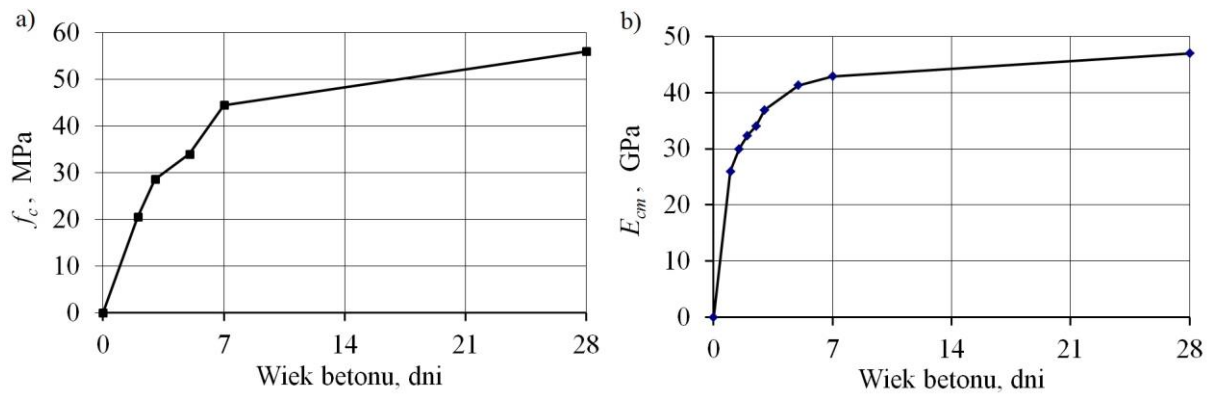
3. Pomiary

W najniższym segmencie ściany, w osi jednego z 4 pilastrów, zainstalowano 9 wgłębnych przetworników odkształceń o bazie 150 mm (rys. 4c). Przetworniki zlokalizowano w 3 warstwach na wysokości ściany, przy powierzchniach zewnętrznych i w środku grubości. Do pomiarów odkształceń wykorzystano przetworniki z drgającą stroną, opisywane szerzej w pracach [5, 6]. Przetworniki w warstwach przypowierzchniowych mocowano do siatek zbrojących pilastry (rys. 4b), natomiast te zlokalizowane w środku grubości mocowano na dodatkowych poprzeczkach z prętów żebranych. Prezentowane badania stanowią element szerszego programu badawczego opisywanego zbiornika, przedstawionego w pracach [4, 7, 8].

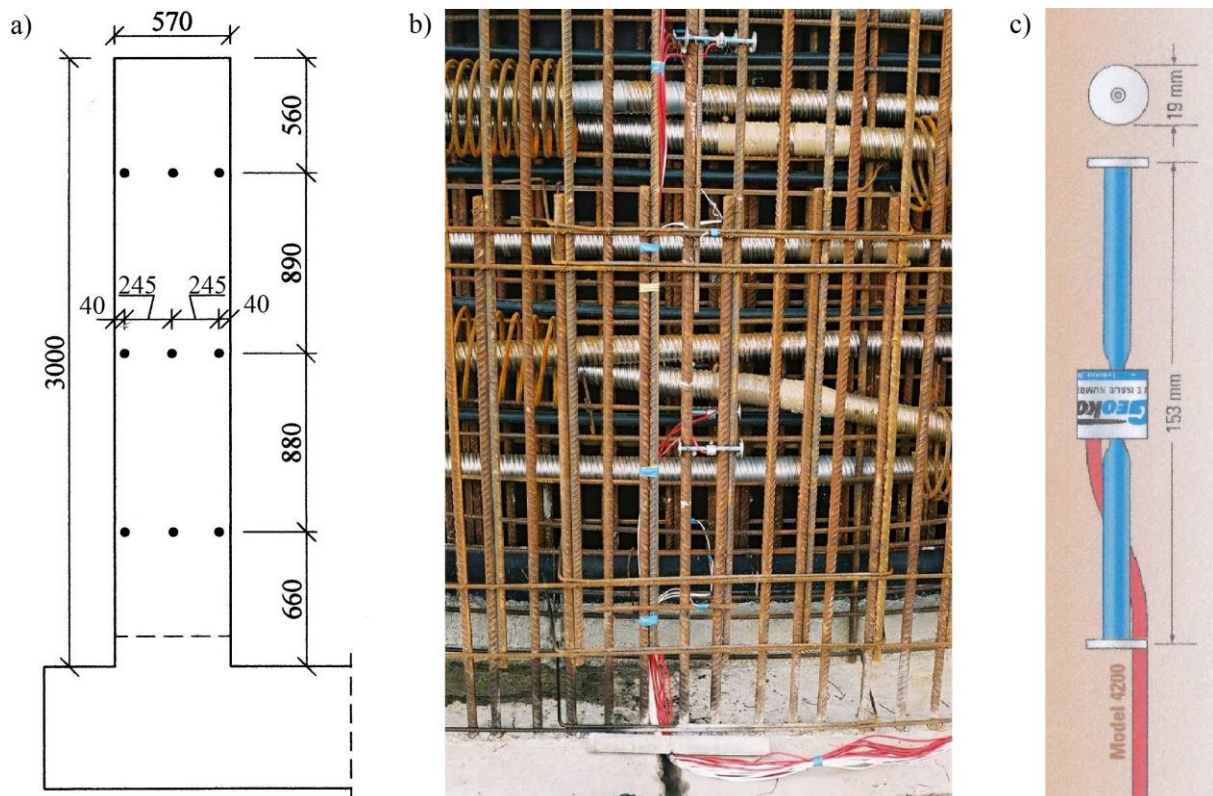
Pomiary odkształceń betonu prowadzono od chwili betonowania przez okres około 1 roku. Częstotliwość czytania wyników określono na 4 razy na godzinę (co 15 minut). W punkcie 4 przedstawiono i omówiono odkształcenia powstałe w wyniku naciągu kabli sprężających. Dodatkowo zamieszczono również rezultaty obliczeń, uzyskane z inżynierskiego programu do analizy statycznej powłok w systemie MES.



Rysunek 2: Geometria i sprzężenie badanego zbiornika



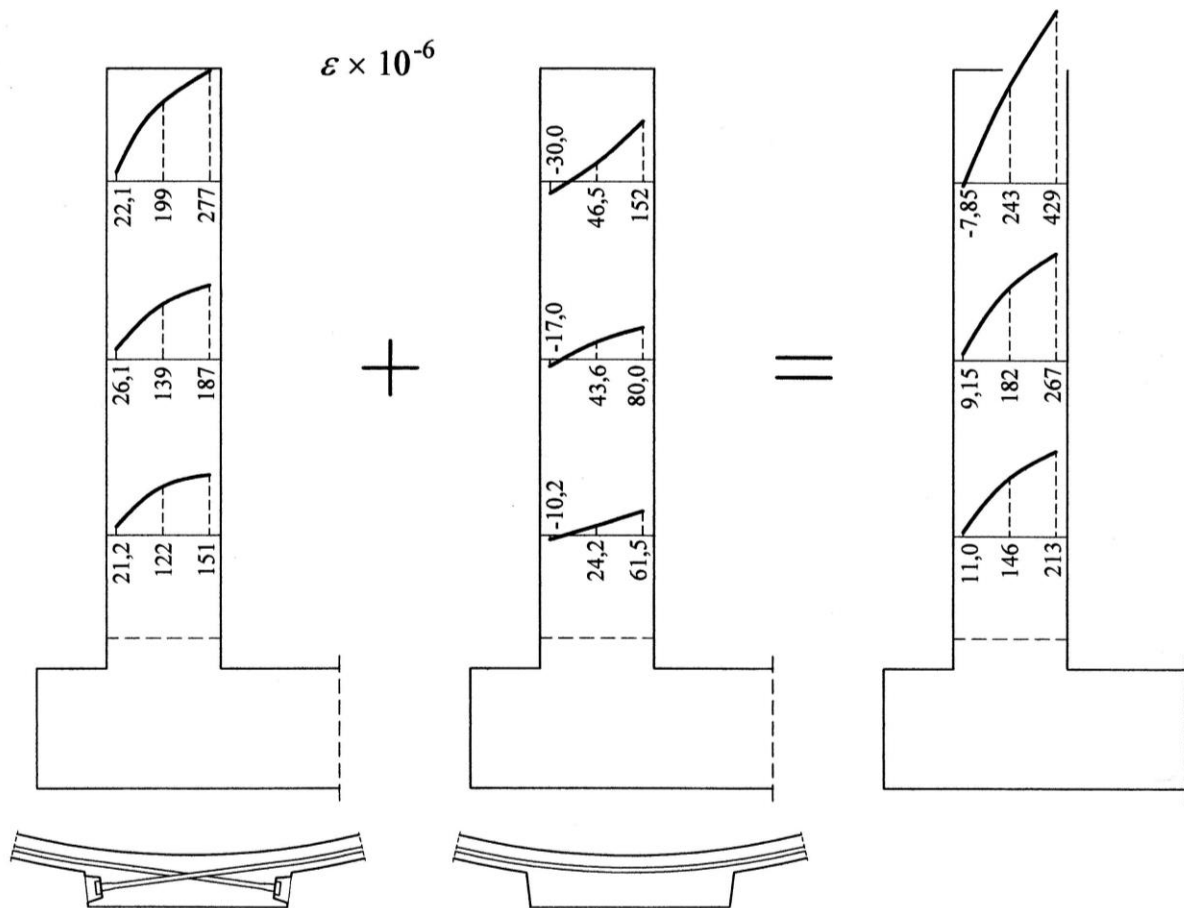
Rysunek 3: Rozwój średniej wytrzymałości na ściskanie (a) i modułu sprężystości betonu (b)



Rysunek 4: Lokalizacja i widok strunowych przetworników odkształceń o bazie 150 mm

4. Omówienie wyników

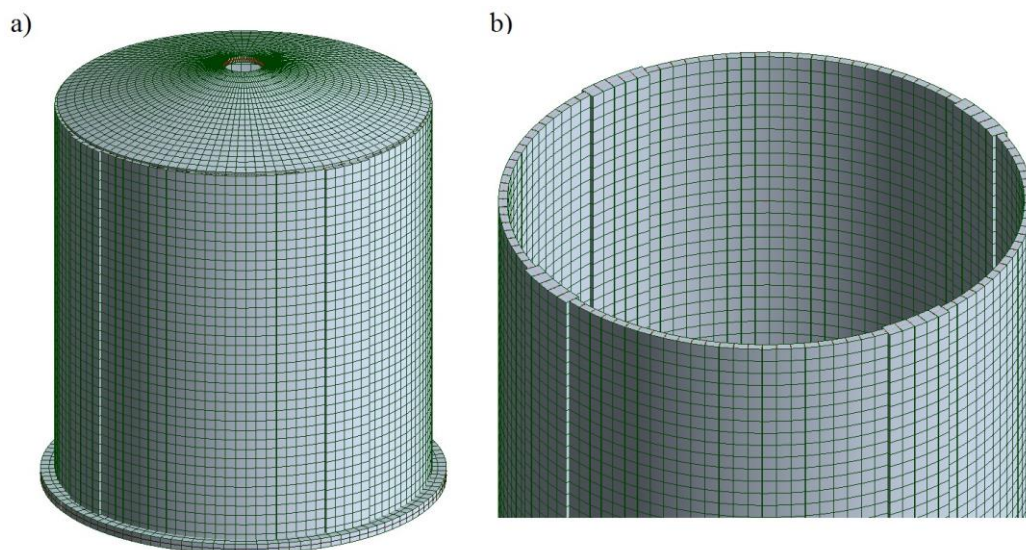
Na rysunku 5 przedstawiono rozkład odkształceń na grubości pilastra, określony na podstawie wyników otrzymanych z zainstalowanych przetworników pomiarowych. W pierwszej kolejności napięto kable kotwione na opomiarowanym pilastrze, w drugim etapie kable przelotowe. Odkształcenia rozdzielono na dwa etapy: powstałe w wyniku naciągu kabli kotwionych (etap I) i powstałe w wyniku naciągu kabli przelotowych (etap II). Analizując rysunek 5 można zauważyć, że rozkład ostatecznych odkształceń (a tym samym i naprężeń) na grubości jest mocno zmienny i niemal trójkątny. Odkształcenia bliskie zero uzyskano przy zewnętrznej powierzchni a największe przy wewnętrznej powierzchni ściany zbiornika. Całkowite odkształcenia zmieniają się od $(-7,85 \div 11,0) \times 10^{-6}$ przy powierzchni zewnętrznej do $(213 \div 429) \times 10^{-6}$ przy powierzchni wewnętrznej (znak „-” oznacza wydłużenie). Interesującym jest, że rozkład ten na grubości „wypłaszcza” się wraz ze zbliżaniem się do płyty fundamentowej. Odkształcenia przy powierzchni zewnętrznej rosną a przy wewnętrznej maleją, zbliżając się do płyty fundamentowej. Zupełnie odmienne rozkłady odkształceń i ich wartości uzyskano przy naciągu obu grup kabli. Przy napinaniu kabli kotwionych odkształcenia osiągają większe wartości, bardziej nierównomierny rozkład i nie występują



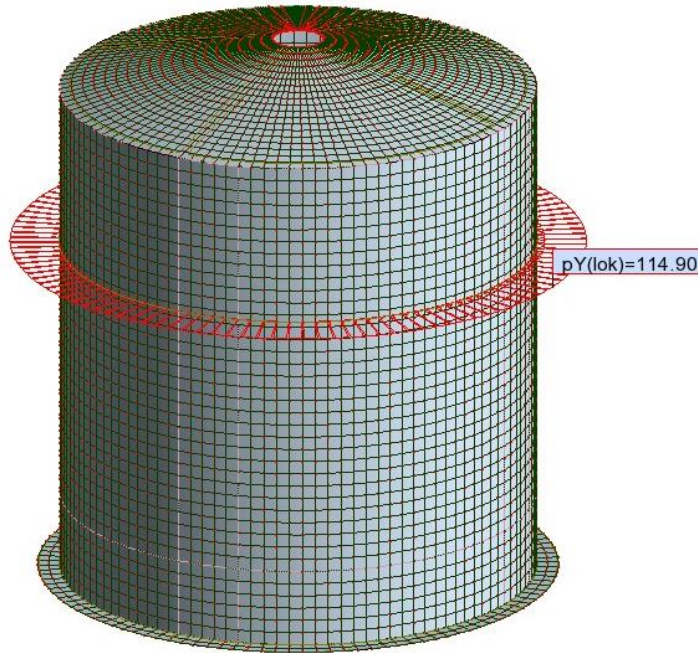
Rysunek 5: Odkształcenia poziome w osi pilastra

rozciągania. Przy naciągu kabli przelotowych wyniki odkształceń są bardziej spłaszczone, mają mniejsze wartości i występują niewielkie rozciągania. Istotnym jest również to, iż w całkowitych odkształceniach niemal nie powstają rozciągania (prócz jednego przypadku na górze – niewielkie wydłużenie bliskie zero).

Na rysunku 6 przedstawiono model obliczeniowy zbiornika wykonany w systemie MES. Model zbudowano z czterowęzłowych elementów powłokowych o boku ok. 0,5 m. Pilastry zamodelowano powłoką o zwiększonej grubości. Do modelu przyłożono obciążenie sprężeniem w postaci obciążeń



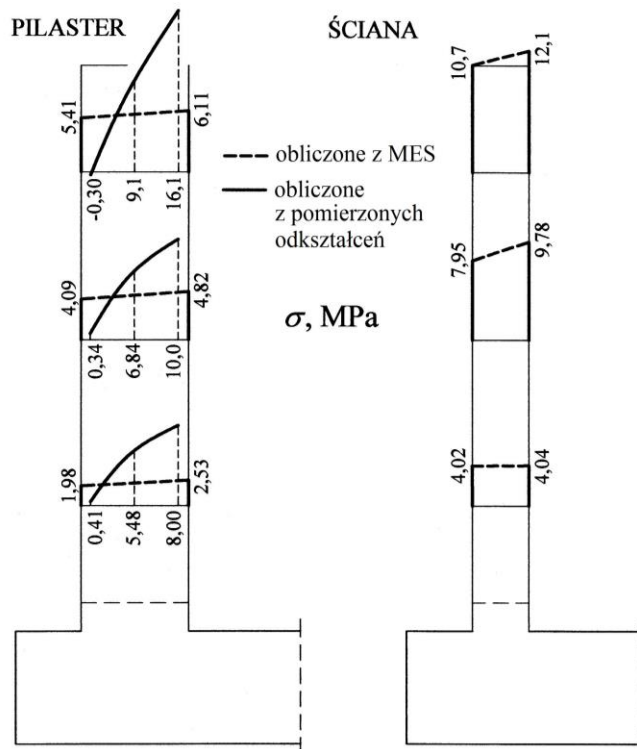
Rysunek 6: Model obliczeniowy zbiornika: pełny zbiornik (a), przekrój powłoki walcowej (b)



Rysunek 7: Obciążenie zastępcze od kabla

zastępczych od kabli (rys. 7). Założono siłę naciągu $P_0 = 1400$ kN oraz efektywną siłę po stratach doraźnych $P_{eff} = 1051$ kN. Wartość obciążenia zastępczego od kabla to $P_{eff}/r = 114,9$ kN/m.

Na rysunku 8 przedstawiono rozkłady naprężeń na grubości pilastra (rysunek lewy) uzyskane z wyników pomierzonych odkształceń oraz z modelu obliczeniowego. Naprężenia z pomierzonych odkształceń otrzymano używając wartości modułu sprężystości betonu wyznaczonej na próbkach walcowych po 28 dniach, równą 47,0 GPa. Powszechnie wiadomo, że moduł sprężystości uzyskany na małych próbkach jest znacznie niższy niż moduł w rzeczywistej konstrukcji w skali naturalnej. Przyjmuje się, że stosunek ten jest tym niższy, im młodszy beton zostaje obciążony, a wzrasta wraz



Rysunek 8: Rozkład naprężeń obwodowych na grubości pilastra i ściany

z dojrzewaniem betonu, zbliżając się ostatecznie do wartości 0,8 [4]. Przyjęto zatem moduł sprężystości równy $0,8 \times 47 = 37,6$ GPa. Uzyskane rozkłady wartości naprężeń mają charakter trójkątny i zmieniają się od wartości 0,41 do 8,00 MPa w najniższym monitorowanym miejscu pilastra oraz od -0,30 do 16,1 MPa w najwyższym. Są to wartości uzyskane z odkształceń zmierzonych przy warstwie zbrojenia a więc około 40 mm od zewnętrznej powierzchni. Naprężenia uzyskane z obliczeń modelowych mają tymczasem zupełnie odmienny rozkład. Są bardziej równomierne na grubości pilastra. Ma to związek z uproszczonym modelowaniem polegającym na osiowym usytuowaniu pilastra względem ściany oraz modelowaniu sprężenia tylko przy pomocy obciążenia radialnego. Podejście takie jest powszechnie stosowane w projektowaniu cylindrycznych zbiorników sprężonych. Mając jednak na uwadze uzyskany z pomiarów rozkład odkształceń i naprężeń (brak rozciągań) można stwierdzić iż uproszczenie to nie jest niebezpieczne. Zagrożeniem może być jedynie przekroczenie naprężeń ściskających w betonie, jednak do konstruowania sprężonych zbiorników zazwyczaj stosuje się betony o wysokich klasach. Więcej informacji na temat modelowania pilastrów podano w pracach [9, 10].

5. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów rozkładów odkształceń betonu i naprężeń w wyniku sprężenia, w żelbetowym pilastrze cylindrycznego zbiornika na ścieki. Wyniki porównano z wartościami uzyskanymi z prostego inżynierskiego modelu obliczeniowego. Wykazano, że rozkład rzeczywistych naprężeń jest zupełnie odmienny niż ten uzyskany z obliczeń. Model obliczeniowy daje rozkład zbliżony do jednorodnego na grubości, tymczasem rzeczywisty rozkład jest trójkątny. Należy mieć na uwadze fakt, że uzyskane wartości naprężeń w betonie (zarówno te oszacowane na podstawie pomiarów odkształceń jak i te obliczone z modelu) mają charakter orientacyjny i mogą być obarczone dużym błędem. Wynikać on może zarówno z trudności w oszacowaniu modułu sprężystości betonu w konstrukcji jak i wartości strat sprężenia przyjętych na podstawie normy. Jednak wartości pomierzonych odkształceń na grubości i ich rozkład mają dużą wiarygodność. Pomimo dużych rozbieżności w wartościach pomierzonych i obliczonych bardzo istotny dla projektowania jest brak pomierzonych rozciągań na grubości pilastra.

Bibliografia

- [1] CIESIELSKI J., Sprężone zbiorniki wodociągu miejskiego. *Inżynieria i Budownictwo*, 12/1959, 477–483.
- [2] GUCZEK K., MINCH J., BORCZ A., Sprężanie zbiorników wg metody Michajłowa. *Inżynieria i Budownictwo*, 11/1959, 423–428.
- [3] LIBURA S., PARZNIIEWSKI Z., Zastosowanie splotów L15,5 do sprężania konstrukcji kołowo-symetrycznych. *Inżynieria i Budownictwo*, 11/1991, 425–428.
- [4] SZYDŁOWSKI R., Zastosowanie stalowych cięgien bez przyczepności przeciw powstawaniu rys w młodym betonie. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.
- [5] SZYDŁOWSKI R., Przetworniki z drgającą struną w badaniach konstrukcji żelbetowych i sprężonych. *Materiały Budowlane*, 3/2013, 49–51.
- [6] BEDNARSKI Ł., SIENKO R., Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi. *Inżynieria i Budownictwo*, 11/2013, 615–619.
- [7] SERUGA A., SZYDŁOWSKI R., Thermal cracking prevention with unbonded steel tendons in cylindrical concrete tank wall restrained at foundation slab, Proceedings of 3rd International fib Congress and Exhibition, Washington, 29 maja-2 czerwca 2010.
- [8] SZYDŁOWSKI R., SERUGA A., Zapobieganie zarysowaniu ścian utwierdzonych w fundamencie wczesnym sprężeniem, *Przegląd Budowlany*, 4/2012, 64–67.
- [9] SERUGA A., Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego, Monografia nr 289, Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
- [10] SERUGA A., Sprężone betonowe zbiorniki na ciecz o ścianie z prefabrykowanych elementów, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2015.

Analysis of strains and stresses in a RC pilasters of post-tensioned cylindrical tank

Abstract: In the construction of post-tensioned cylindrical tanks the massive pilasters are commonly designed due to the high forces in the anchorages. They are needed to transfer the forces from cables anchorages. The presence of thickening on the perimeter of the wall disturbs the membrane state of wall and the state of stress in the shell. Their modeling in easy engineering software for static analysis of the structures is extremely difficult. The paper presents the results of strain measurements in a completed cylindrical tank which were compared with the results of calculations obtained from a engineering software.

Keywords: concrete strain, pilaster, post-tensioning, prestressed tank.