

zbiornik sprężony, zbiornik na ciecz, dojrzewanie młodego betonu, rozkład temperatury

Andrzej SERUGA¹
Rafał SZYDŁOWSKI²

DOŚWIADCZALNA OCENA ROZKŁADU TEMPERATURY W DOLNYM SEGMENTCIE ŚCIANY ZBIORNIKA WKF W OKRESIE DOJRZEWANIA BETONU

W pracy przedstawiono program badań i niektóre wyniki otrzymane z badań doświadczalnych przeprowadzonych podczas betonowania i sprężania powłoki walcowej wydzielonej komory fermentacyjnej. Wykonawca obiektu zastosował cement hutniczy do produkcji betonu klasy B45, w celu obniżenia naprężeń rozciągających w betonie we wczesnym okresie dojrzewania. Autorzy niniejszej pracy zrealizowali program badań doświadczalnych umożliwiający dokonanie oceny możliwości stosowania cementu hutniczego CEM III/A, kruszywa żwirowego oraz dodatków w postaci pyłu krzemionkowego do realizacji zbiorników z betonu sprężonego.

1. Wprowadzenie

Do realizacji konstrukcji z betonu sprężonego zgodnie z [1,2] nadają się następujące cementy:

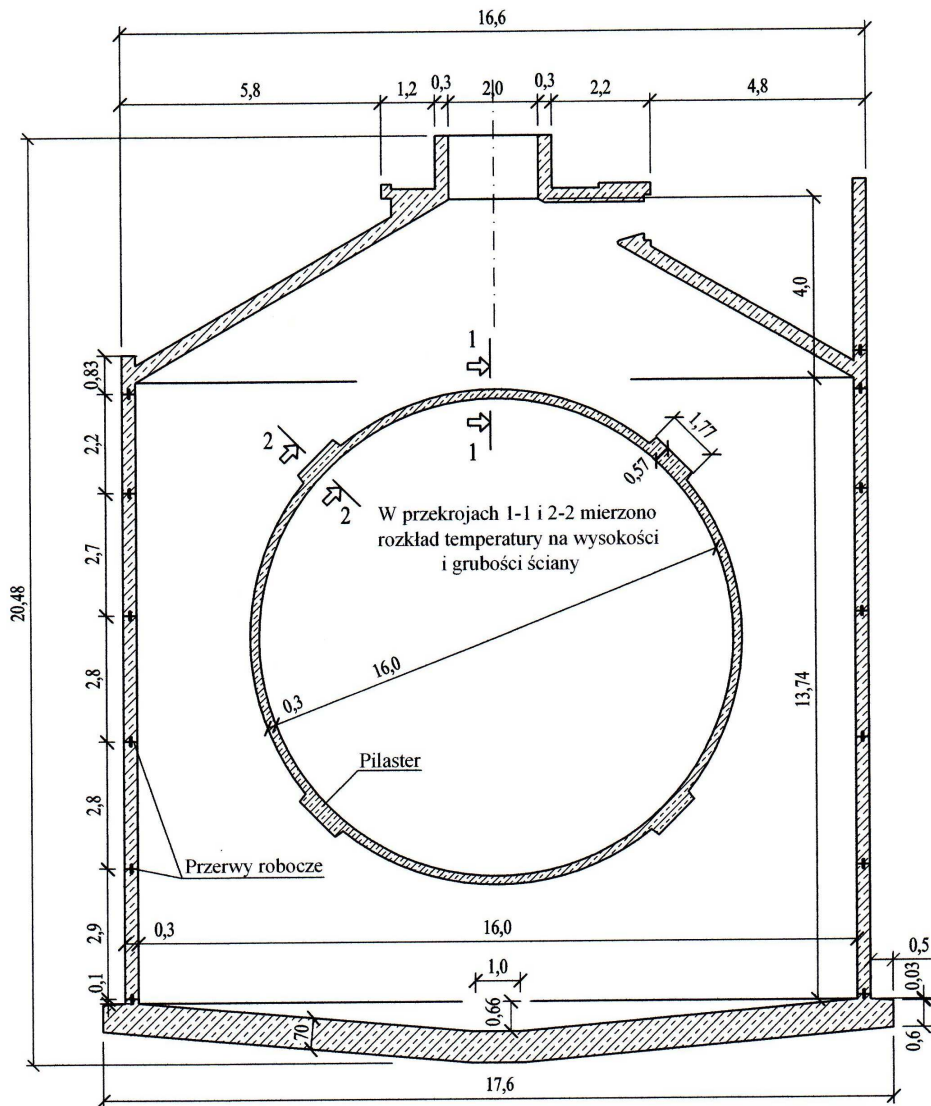
- portlandzki o symbolu CEM I, klasy 42,5 i 52,5,
- portlandzki o wysokiej wytrzymałości wczesnej CEM I w klasach 32,5 R, 42,5 R i 52,5 R,
- portlandzkie wieloskładnikowe o symbolu CEM II/A w klasach 42,5 R i 52,5 R.

Cementy o wysokiej wytrzymałości wczesnej (R) charakteryzują się szybkim przyrostem wytrzymałości betonu i krótszym czasem wiązania. Cementy tego typu stosowane są do betonów, gdy musimy po krótkim okresie twardnienia przekazać na element siłę sprężającą.

W projektowaniu i wykonawstwie konstrukcji z betonu sprężonego nie wystarczy posługiwać się wartościami wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie. Niezmiernie ważną rolę odgrywa moduł sprężystości betonu, który zależy przede wszystkim od rodzaju i właściwości użytego kruszywa, a także innych cech mieszanki betonowej. Podane w normie [3] wartości E_{cm} dotyczą betonów wykonanych na kruszywie, w którym przeważa żwir kwarcytowy. W Polsce wyższe wartości modułu sprężystości w stosunku do wartości przypisanych poszczególnym klasom w normie, uzyskują betony na kruszywie bazaltowym (+10 %). Niższe wartości modułu sprężystości uzyskują betony na kruszywie granitowym (-10 %) oraz na kruszywie piaskowcowym (-30 %).

¹ Dr hab. inż. prof. P.K., Politechnika Krakowska, IMIKB, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

² Mgr inż., Politechnika Krakowska, IMIKB, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24



Rys. 1. Przekroje zbiornika WKF

W praktyce często można się spotkać z przypadkiem, w którym wykonawca obiektu sam decyduje o rodzaju zastosowanego cementu i kruszywa, gwarantując spełnienie wymaganej klasy betonu. Takie postępowanie jest możliwe w przypadku braku stosownych wymagań wniesionych przez projektanta, co może być między innymi spowodowane brakiem świadomości w zakresie szkodliwości wynikających z zastosowania nieodpowiedniego cementu, kruszywa lub dodatków.

W ostatnich latach na terenie rozbudowywanej oczyszczalni ścieków w Katowicach zrealizowano dwie wydzielone komory fermentacyjne z betonu sprężonego. Do wykonania betonu klasy B45 zastosowano żwir o uziarnieniu 2/8 i 8/16 mm oraz cement CEM III/A 32,5 N LH/HSR/NA Rudniki. Ze względu na wymaganą wodoszczelność betonu W12 do mieszanki betonowej o konsystencji K-5 i wskaźniku $w/c = 0,41$ dodano 5 % mikrokrzemionki w postaci 50 % szlamu wodnego, czyli 18 kg mikrokrzemionki i 18 l wody (dozowano 36 kg szlamu wodnego).

O właściwościach ochronnych betonu w stosunku do stali zbrojeniowej decyduje spoiwo,

które w ostatnich latach często jest modyfikowane w celu uzyskania większej szczelności betonu. W pracy [4] przedstawiono wyniki badań właściwości ochronnych spoiw dwu i trójskładnikowych w odniesieniu do stali zbrojeniowej zwykłej. Badania przeprowadzono na zaprawach normowych na bazie cementu portlandzkiego (CEM I 32,5R) i hutniczego typu CEM III/A i CEM III/C, które modyfikowano pyłem krzemionkowym w ilości 3,5 i 10 % masy cementu.

2. Opis konstrukcji i program badań doświadczalnych

W ramach inwestycji zaprojektowano dwie komory fermentacyjne o pojemności jednostkowej 3200 m³. Komora fermentacyjna jest zbiornikiem o wewnętrznej średnicy powłoki walcowej 16 m i wysokości 13,74 m, zamkniętym kopułą górną stożkową o wysokości 4 m (rys. 1).

Ścianę o grubości 0,3 m zaprojektowano z betonu sprężonego, rozmieszczając 32 cięgna typu 7×7φ5 mm ze stali Y1860 S7. Początkowa siła sprężająca $P_0 = 1562$ kN. Cięgna dwuprzęsłowe kotwiono przemiennie w 4 pilastrach symetrycznie rozmieszczonych na obwodzie powłoki (rys. 1). Projekt powłoki wykonano przy założeniu, że nie mogą w niej wystąpić naprężenia rozciągające.

Płytę denną zaprojektowano w postaci odwróconej kopuły stożkowej grubości 0,7 m w wersji monolitycznej, uwzględniając wystąpienie rys nie większych niż 0,1 mm.

Kopułę górną zaprojektowano jako żelbetową, monolityczną grubości 0,32 m uwzględniając stan graniczny pojawienia się rys nie większych niż 0,1 mm.

Powłokę walcową betonowano obwodowymi pasmami o wysokościach podanych na rys. 1, projektując 6 poziomych przerw konstrukcyjnych. W przerwach konstrukcyjnych zastosowano taśmy PVC typu 3 o szerokości 200 mm.

Powłokę walcową zazbrojono:

- w kierunku obwodowym przy powierzchni zewnętrznej prętami φ22 mm co 0,10 m na wysokości do 1,7 m mierzonej od płyty dennej, a dalej prętami φ14 mm co 0,20 m,
- w kierunku obwodowym na powierzchni wewnętrznej prętami φ22 mm co 0,15 m na wysokości do 1,7 m, a dalej prętami φ14 mm co 0,20 m,
- w kierunku pionowym przy powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej prętami φ22 mm co 0,10 m na wysokości do 2,1 m i dalej prętami φ22 mm co 0,20 m na wysokości do 3,0 m (tj. wysokość pierwszego pasma plus 0,1 m od płyty dennej do pierwszej przerwy konstrukcyjnej). W kolejnych pasmach zastosowano pręty φ14 mm co 0,20 m przy obu powierzchniach.

W paśmie najwyższym sąsiadującym z kopułą odpowiednio zmodyfikowano zbrojenie zarówno w kierunku obwodowym jak i pionowym.

Z uwagi na fakt, że zastosowanie przez wykonawcę cementu hutniczego podyktowane było zamiarem obniżenia naprężeń rozciągających w betonie we wczesnym okresie dojrzewania, autorzy niniejszej pracy zrealizowali następujący program badań:

- określenie rozwoju skurczu i własności mechanicznych betonu warunkujących przystąpienie do sprężania powłoki walcowej,
- określenie rozkładu temperatury w przekrojach poprzecznych przez pilaster i segment ściany między pilastrami na wysokości pierwszego betonowanego pasma powłoki,
- pomiar odkształceń betonu na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni powłoki w przekroju przez pilaster i segment ściany między pilastarmi.

3. Przebieg i wyniki badań

Podczas betonowania pierwszego pasma obwodowego na zbiorniku nr 2 pobrano próbki o wymiarach 100×100×500 mm do określenia rozwoju skurczu betonu oraz kostki o wymiarach 150×150×150 mm, walce $\phi 150 \times 300$ mm i belki 150×150×600 mm do określenia wytrzymałości betonu na ściskanie, rozciąganie i modułu sprężystości. Rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie, na rozciąganie i modułu sprężystości przedstawiono w tabelicy 1.

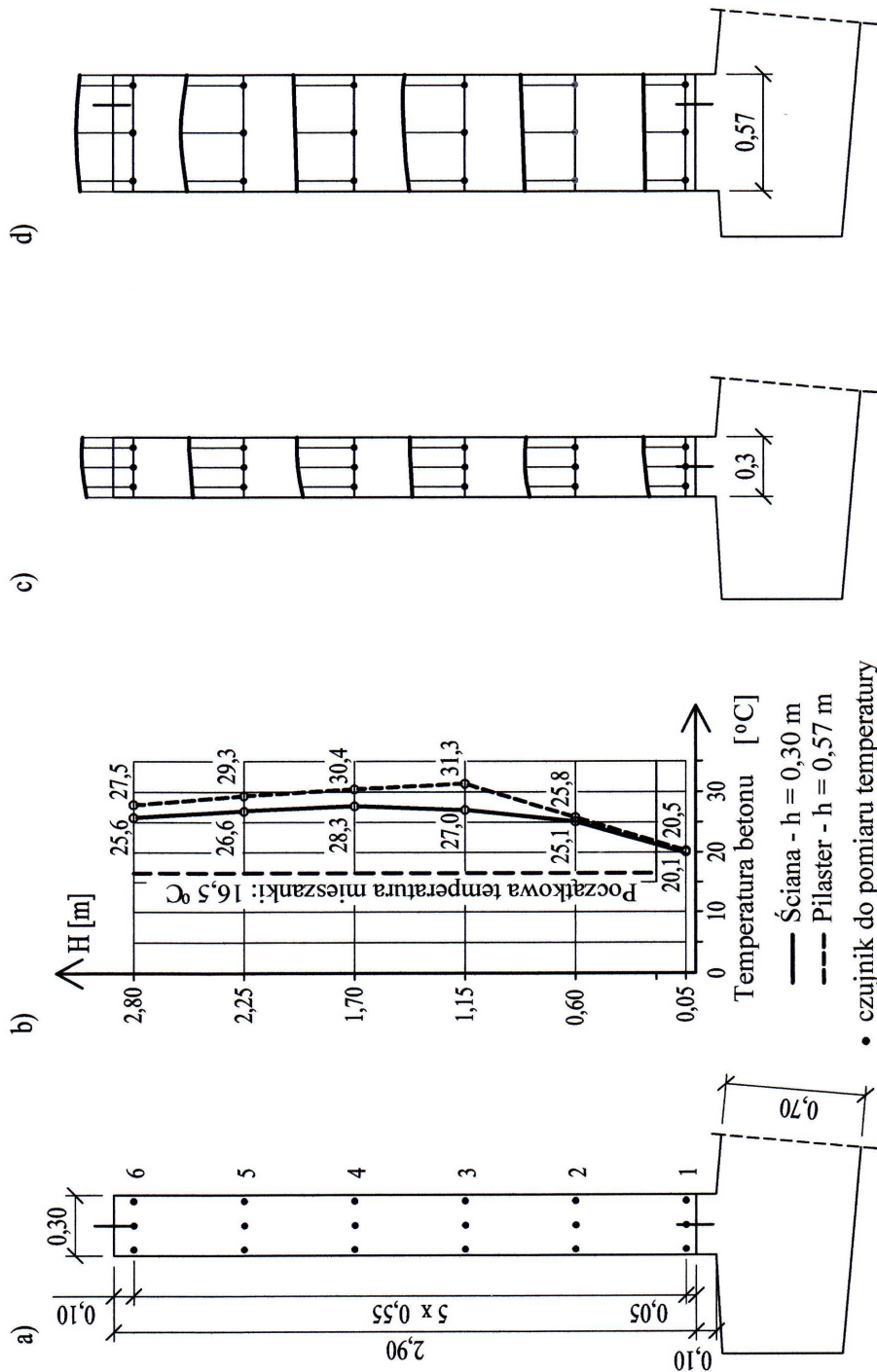
Tablica 1. Wytrzymałość betonu na ściskanie, rozciąganie i moduł sprężystości betonu.

t [dni]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]			E _{cm} [GPa]
	kostki 150x150x150 mm	walce $\phi 150 \times 300$ mm	osiowe walce $\phi 150 \times 300$ mm	przez rozłupywanie kostki 150x150x150 mm	przy zginaniu belki 150x150x600 mm	
1	6,22	5,19	0,50	0,71	1,13	11,12
2	12,02	9,62	1,22	1,52	2,11	15,15
3	17,41	14,51	1,73	2,15	2,82	18,5
7	34,00	27,83	2,40	3,06	3,40	23,63
28	49,85	41,54	2,96	4,12	5,00	27,32
90	65,11	55,18	3,16	4,63	6,37	29,65
180	65,78	55,32	3,50	5,34	7,72	30

W celu określenia rozkładu temperatury na grubości ściany i pilastra zainstalowano po 18 termopar rozmieszczonych w sposób przedstawiony na rys. 2a. Najwyższą temperaturę w ścianie równą 28,3 °C zanotowano na powierzchni środkowej po 32 godz. w poziomie 4 (rys. 2a). Najwyższa zanotowana temperatura w pilastrze wyniosła 31,3 °C i wystąpiła po 30 godz. w poziomie 3. Rozkład temperatury 1 na wysokości ściany i pilastra w chwili wystąpienia ekstremum termicznego przedstawiono na rys. 2b. Na rys. 2c i 2d pokazano natomiast rozkład temperatury na grubości ściany. Przebieg temperatury w pierwszych 60 godzinach dojrzewania betonu w ścianie

i pilastrze przedstawiono na rys. 3. Betonowanie segmentu zakończono o w godz. 12, co odpowiada początkowi układu współrzędnych.

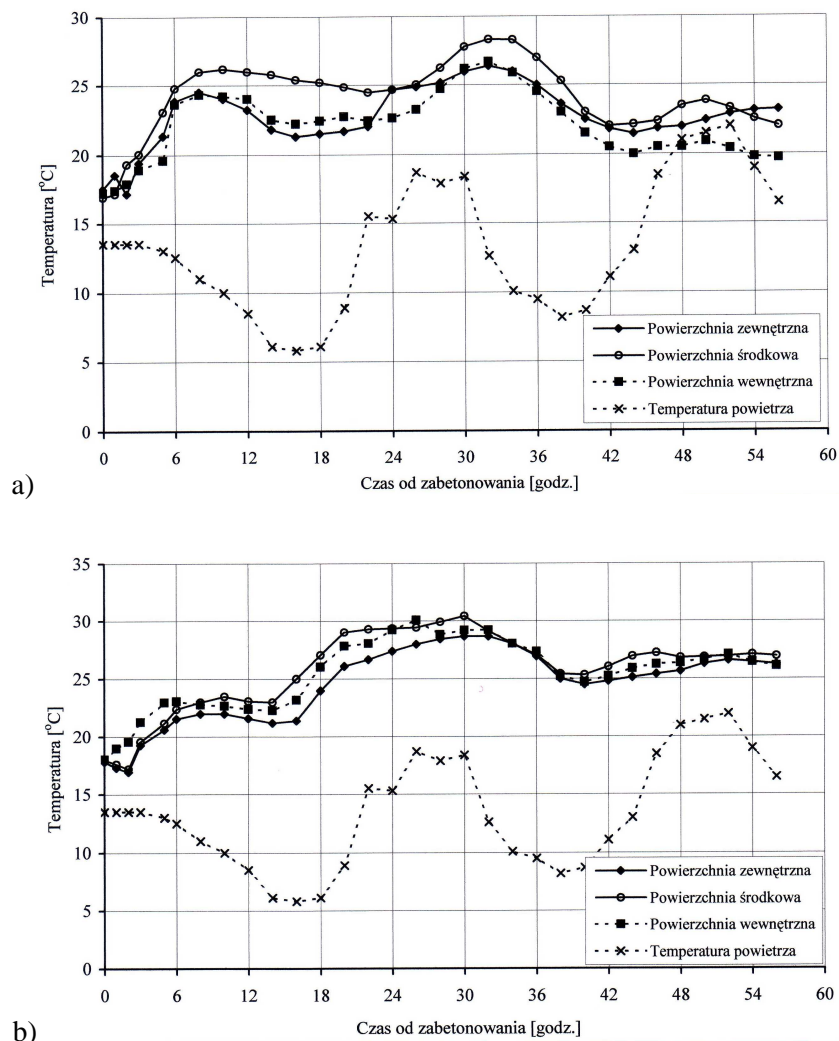
Przeprowadzone, przed przystąpieniem do sprężania, wnikliwe obserwacje nie wykazały obecności na powierzchniach powłoki rys większych niż 0,05 mm. Prowadzone pomiary odkształceń w procesie sprężania wykazały: rozwieranie się na wewnętrznej powierzchni powłoki drugiego poziomego styku konstrukcyjnego oraz potwierdziły, że w potraktowanie w obliczeniach



Rys. 2. Maksymalne temperatury zarejestrowane w ścianie i pilastrze: a) rozmieszczenie czujników pomiarowych,

b) rozkład temperatury na wysokości ściany i pilastrze w warstwie środkowej,

c), d) rozkład temperatury na grubości ściany i pilastrze



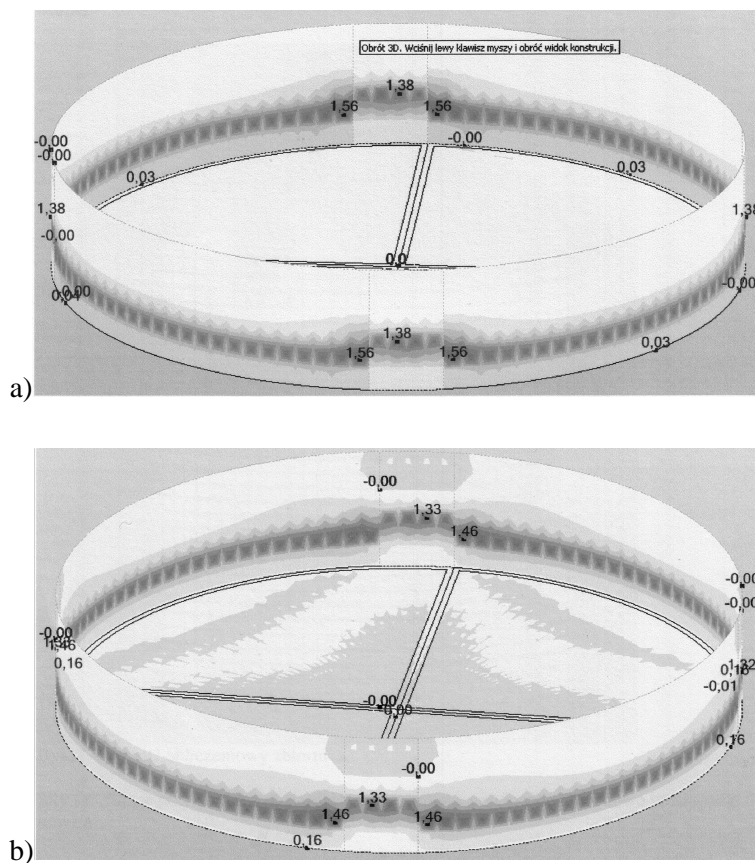
Rys. 3. Zarejestrowany przebieg temperatury w okresie pierwszych 60 godzin dojrzewania betonu na poziomie 4 (rys. 2) w ścianie zbiornika a) i w przekroju pilastra b)

przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego połączenia dolnej krawędzi powłoki z płytą denną jako utwardzonego nie odpowiada rzeczywistości. Połączenie takie powinno więc być modelowane jako niepełne utwardzenie.

4. Analiza wyników i wnioski

Maksymalne różnice temperatur pomiędzy powierzchnią środkową i otoczeniem, w przekroju przez segment ściany i pilaster zarejestrowane po 15 godzinach wynoszą odpowiednio 19,6 °C i 19,2 °C. Odpowiednie różnice temperatur między wewnętrzną powierzchnią powłoki i otoczeniem wynoszą 16,4 °C i 17,4 °C. Obliczenia statyczne przeprowadzono w systemie MES Robot Millennium. Zamodelowano dolny segment powłoki walcowej o średnicy 16,3 m przy użyciu 612 czterowęzłowych elementów skończonych o wymiarach 0,5 × 0,5 m. Powłoka walcowa została utwardzona w płycie dennej (płyta na sprężystym podłożu). Moduł sprężystości betonu przyjęto w

oparciu o prowadzone badania doświadczalne, a moduł podatności gruntu wykorzystując dane projektowe. Na rys. 4 przedstawiono naprężenia w dolnym segmencie ściany na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni powłoki obciążonej różnicami temperatur 16,4 °C i 17,4 °C. Otrzymane maksymalne wartości naprężeń rozciągających na powierzchniach betonu wynoszące odpowiednio 1,46 MPa i 1,56 MPa, są większe od wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe po dwóch dniach dojrzewania (tablica 1). Dalsza analiza zostanie przeprowadzona przy uwzględnieniu zjawisk reologicznych w młodym betonie i efektu skali w badaniach wytrzymałościowych betonu.



Rys. 4. Naprężenia w dolnej partii ściany zbiornika na powierzchni wewnętrznej a) i zewnętrznej b), wywołane wzrostem temperatury w dojrzewającym betonie.

Na podstawie otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- Przyjęcie cementu CEM III/A do produkcji mieszanki betonowej oraz zastosowanie silnego zbrojenia ściany w kierunku obwodowym na wysokości do 1,7 m, zapobiegło powstaniu rys o szerokości $> 0,1$ mm (warunek normowy).
- Zastosowanie jako dodatku pyłu krzemionkowego zapewniło uzyskanie przez beton odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie umożliwiając sprężenie powłoki. Niestety użycie krzemionki i jednocześnie kruszywa żwirowego nie zapewniło odpowiedniej wartości modułu sprężystości betonu przy ściskaniu, przyjętego w obliczeniach statycznych na poziomie 34 GPa. Fakt ten wpłynie na zmianę siły sprężającej w czasie.

- Przytoczone w pracy [4] wyniki badań w zakresie ochrony antykorozyjnej betonu wykonanego na cemencie CEM III z zawartością krzemionki nie zawierają rezultatów odniesionych do stali sprężającej, toteż bezpieczeństwo cięgien sprężających w otoczeniu zastosowanego betonu jest wątpliwe. Wymaga to przeprowadzenia badań doświadczalnych.
- Zdaniem autorów niniejszej pracy poprawnym rozwiązaniem projektowym jest przyjęcie betonu na cemencie CEM I i kruszywa łamanego bazaltowego do realizacji konstrukcji tego typu. Problemy wynikające ze znacznych naprężeń rozciągających tylko w pierwszym paśmie powłoki [5] można wyeliminować przez zastosowanie bezprzyczepnościowych cięgien sprężających.

Literatura

- [1] PN-B-1997-1: 2002 Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [2] Instrukcja Nr 356/98. Stosowanie cementu powszechnego użytku wg PN-B-19701 1997: w budownictwie. Warszawa, ITB, 1998.
- [3] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [4] Fiertak M., Stryzewska T.: Wpływ pyłu krzemionkowego na właściwości ochronne otuliny i tworzyw cementowych. *Inżynieria i Budownictwo*. 2005, Nr 12.
- [5] Seruga A., Faustmann D.: Zastosowanie cięgien bezprzyczepnościowych do eliminacji rys termicznych i skurczowych w ścianach żelbetowych zbiorników cylindrycznych. *Czasopismo Techniczne*. 2003, nr 98-101.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN BOTTOM SEGMENT OF TANK WALL AT EARLY-AGE CONCRETE

Summary

In the paper there are presented the programme and some results of experimental investigation during the casting and prestressing of cylindrical concrete shell. The contractor used the metallurgical cement CEM III/A to product the concrete class B45 to reduce the thermal tensile stresses at early-age concrete. The authors of this paper have realized the programme of experimental investigation enable to evaluate the possibility of applying the CEM III/A, gravel aggregate and silica fume to construction of prestressed concrete tanks.