

Szymon KAŻMIERCZAK\*  
Politechnika Krakowska

## BADANIA NIEZBROJONEGO ZŁĄCZA PŁYTOWYCH ELEMENTÓW SPRĘŻONYCH POD OBCIĄŻENIEM TERMICZNYM

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań niezbrojonego złącza płytowych elementów sprężonych cięgnami bezprzyczepnościowymi pod obciążeniem termicznym. Przeanalizowano zależność szerokości rysy w złączu od różnicy temperatury na zewnętrznych powierzchniach płyt.

## TESTS ON PRESTRESSED CONCRETE SLAB WITH UNREINFORCED JOINT UNDER THERMAL LOADING

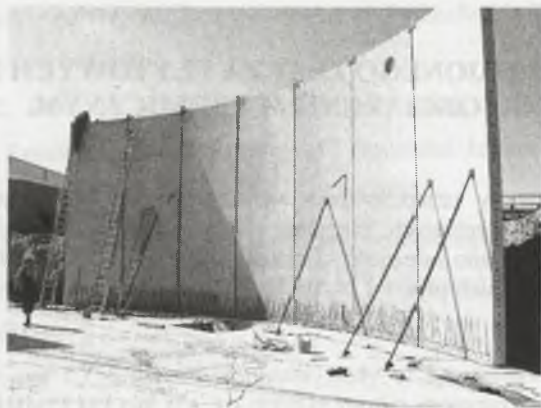
**Summary.** In the paper the selected results of tests on thermally loaded concrete slab with unreinforced joint prestressed with unbonded tendons are presented. The width of crack in joint due to thermal gradient through the concrete slab was analyzed

### 1. Wprowadzenie

Prefabrykowane zbiorniki cylindryczne sprężone wewnętrznymi pojedynczymi cięgnami bezprzyczepnościowymi realizowane są w Polsce od roku 1997. W rozwiązaniach systemowych nie stosuje się obwodowego zbrojenia uciągającego w pionowym złączu konstrukcyjnym między sąsiednimi elementami płytowymi (rys. 1). Jednym z wymagań europejskiej prenormy EC-2 [1] jest analiza konstrukcji pod działaniem obciążenia termicznego związanego z temperaturą przechowywanego materiału bądź wpływem środowiska oraz spełnienie warunku szczelności konstrukcji. Problematyka szczelności złączy zbiorników prefabrykowanych poruszana była między innymi w pracach [2, 3, 4], wpływ obciążenia termicznego na pracę statyczną zbiorników opisano w [5, 6, 7]. W artykule

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. Politechniki Krakowskiej

przedstawiono badania doświadczalne, których celem było określenie wpływu niezbrojonego złącza na pracę sprężonych elementów płytowych pod obciążeniem termicznym. Analizowano szerokość rysy w złączeniu, wywołanej działaniem momentu zginającego od różnicy temperatur na zewnętrznych powierzchniach elementów płytowych, którym odebrano możliwość obrotu na podporach.



Rys. 1. Widok niezbrojonego złącza w zbiorniku prefabrykowanym sprężonym cięgnami wewnętrznymi

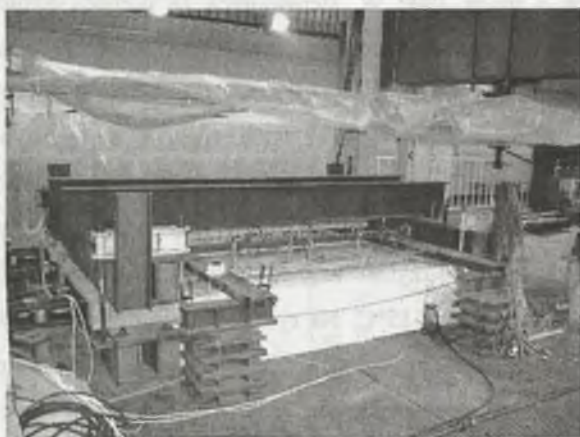
Fig. 1. The view of unreinforced joint in precast concrete tank prestressed with internal tendons

## 2. Opis badań

W trakcie eksperymentu przebadano cztery płyty o wymiarach 3,60 m x 1,0 m x 0,18 m. Każdy zestaw składał się z dwóch elementów: płyty bez złącza, obrazującej poziomy wycinek powłoki ciągłej, oraz dwóch elementów płytowych połączonych złączem o szerokości 0,01 m. Płyty umieszczono na stanowisku badawczym (rys. 2.) tak zaprojektowanym, aby odebrać możliwość obrotu płyt na podporze. Zablockowanie swobody odkształceń płyt na podporach generowało w ich przekroju naprężenia od momentu zginającego wywołanego różnicą temperatur na powierzchniach zewnętrznych. Przeprowadzenie eksperymentu na dwóch elementach płytowych jednocześnie miało na celu zapewnienie takich samych statycznych i kinematycznych warunków brzegowych w trakcie jego przebiegu.

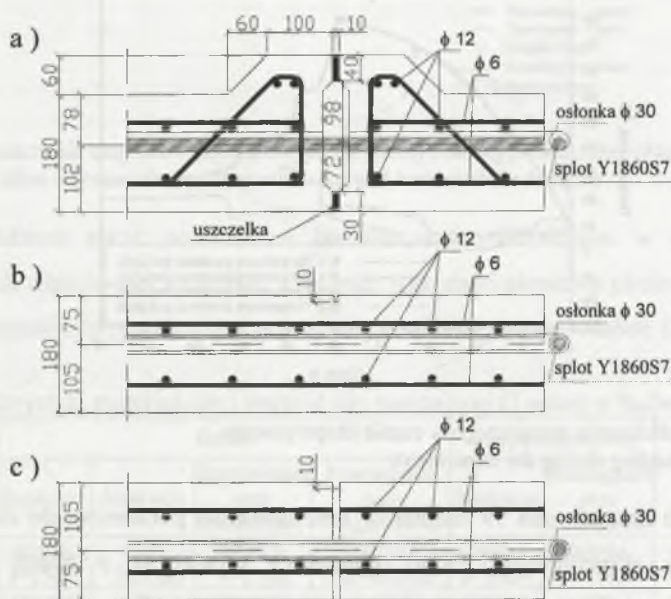
Konstrukcja zbiorników prefabrykowanych sprężonych wewnętrznymi cięgnami bezprzyczepnościowymi wymaga, w celu zapewnienia szczelności, wykonania niewielkiego żeberka w pionowym złączeniu między sąsiednimi elementami płytowymi. Lokalne pogrubienie

powłoki oraz zastosowanie neoprenowych uszczeltek przy jej zewnętrznych krawędziach powoduje zmianę mimośrodowość działania siły sprężającej w przekroju przez złącze. Sposób sprężenia badanych elementów uwzględnia rzeczywiste położenie siły sprężającej w przekroju przez prefabrykat i złącze (rys. 3).



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego

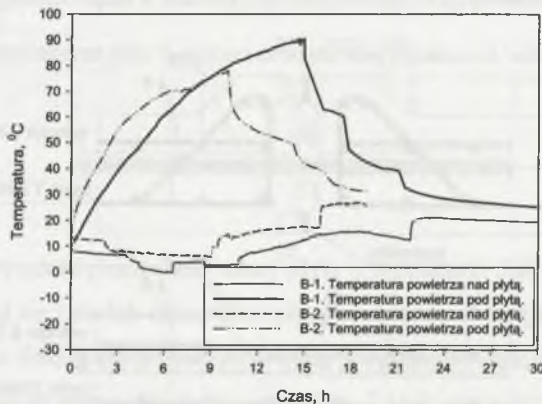
Fig. 2. The view of experiment



Rys. 3. Przekrój: a) rzeczywisty, b) płyta ciągła PC, c) płyta połówkowa (ze złączem) PP

Fig. 3. The cross section: a) real, b) continous slab PC, c) slab with joint PP

Podstawowym obciążeniem była różnica temperatury na zewnętrznych powierzchniach elementów badawczych. Układ do wytworzenia obciążenia termicznego składał się ze stalowej wanny o wymiarach 2,0 m x 2,0 m x 0,20 m napełnionej wodą i umieszczonej pod badanymi elementami. Do podgrzewania wody zastosowano zestaw czterech grzałek elektrycznych, każda o mocy 2000 W, sterowanych za pomocą termostatu z termoparą zanurzoną w wodzie. Stalowa wanna została w sposób szczelny termicznie odizolowana od otoczenia za pomocą 0,20 m warstwy styropianu. Do chłodzenia górnej powierzchni płyt zastosowano zimne powietrze atmosferyczne włączane poprzez przewody transportowe o średnicy 0,30 m. W celu zwiększenia efektywności układu chłodzącego badania przeprowadzono w okresie zimowym (marzec 2006). Czas badania zaprogramowano tak, aby maksymalną temperaturę wody otrzymać w godzinach nocnych przy temperaturze powietrza atmosferycznego dochodzącej do  $-15^{\circ}\text{C}$ . Na rys. 4 przedstawiono przebieg temperatury w trakcie eksperymentu, przy badaniu nr 1 (B-1) i badaniu nr 2 (B-2). Temperaturę mierzono termoparami PT-100 umieszczonymi na górnej powierzchni płyty oraz wewnątrz stalowej wanny grzewczej, w strefie powietrza między spodem płyt i wodą.

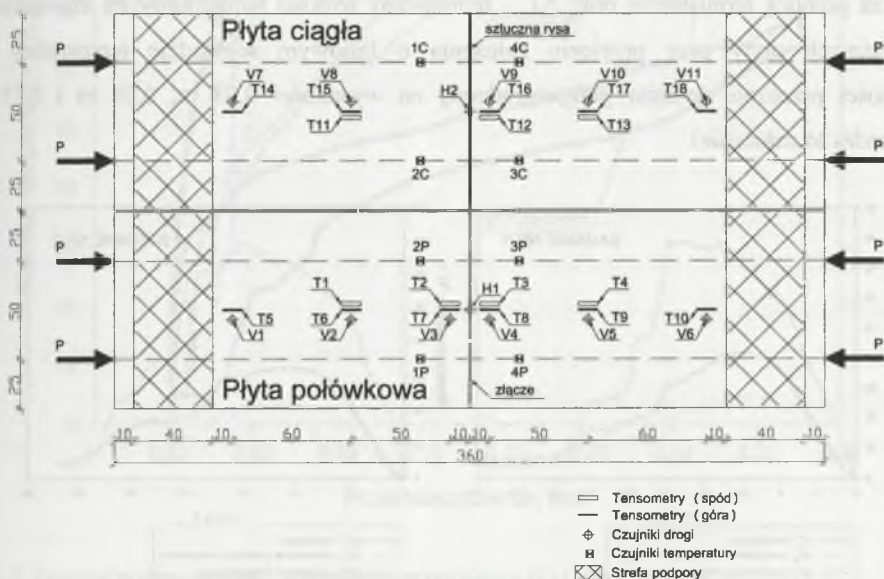


Rys. 4. Przebieg obciążenia termicznego w czasie eksperymentu

Fig. 4. Thermal loading during the experiment

W badaniach zastosowano 59 czujników oraz aparaturę pomiarową do ciągłego zapisu danych podczas eksperymentu. Układ rejestrujący składał się z trzech wzmacniaczy pomiarowych firmy HBM typu Spider, obsługujących 20 kanałów (8+8+4), wzmacniacza pomiarowego typu UPM-100 z możliwością obsługi do 30 kanałów oraz 16-kanałowego rejestratora MPI-L firmy Metronic. Mierzone wielkości: odkształcenia na powierzchni dolnej i górnej płyt (18 punktów – tensometry foliowe TFs-60/120), przemieszczenia pionowe (11

punktów – przetworniki drogi HBM WA-L o zakresie 50 mm), siła w splotach sprężających (2 punkty – przetworniki siły HBM – C6A), przemieszczenia poziome (2 punkty – przetworniki drogi HBM WA-L o zakresie 10 mm), temperatura (14 punktów – 2 termopary Pt-100 + 12 termistorów zatopionych w każdej płycie). Rozmieszczenie czujników na górnej i dolnej powierzchni płyt pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Rozmieszczenie czujników pomiarowych na górnej i dolnej powierzchni płyt  
Fig. 5. Localization of measuring gauges at the top and bottom slabs surfaces

Przeprowadzono także podstawowe badania wytrzymałościowe w celu określenia mechanicznych właściwości materiału, z jakiego wykonano elementy płytowe. Wyniki tych badań oraz wartość siły sprężającej w pojedynczym splotie podano w tabeli 1.

Tabela 1

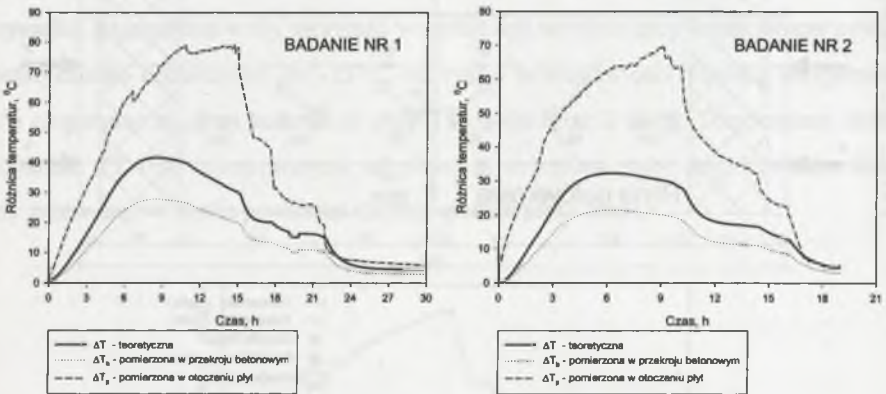
Charakterystyki materiałowe i wartość siły sprężającej (1 splot) w badaniach 1 i 2

Wytrzymałość	Beton				Zaczyn cementowy		Moduł sprężystości betonu	Siła $P_0$
	Ściskanie	Ściskanie	Rozciąganie przy rozłupaniu	Rozciąganie przy zginaniu	Ściskanie	Rozciąganie przy rozłupaniu		
Próbka	kostka a=15cm	walec 15x30cm	kostka a=15cm	belka 15x15x60cm	kostka a=10cm	kostka a=10cm	walec 15x30cm	
Jednostki	[ MPa]	[ MPa]	[ MPa]	[ MPa]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ GPa]	[ kN]
Badanie 1	39,06	35,09	2,72	4,52	78,33	2,42	25,70	180
Badanie 2	68,98	58,57	3,81	5,0	72,20	2,88	30,93	90

Na podstawie wykonanych badań można beton z eksperymentu 1 zaliczyć do klasy B37, beton z eksperymentu 2 do klasy B60.

### 3. Rezultaty

Na rysunku 6 pokazano przebieg różnicy temperatur:  $\Delta T_p$  – pomierzonej za pomocą termopar PT-100 w bezpośrednim sąsiedztwie dolnej i górnej powierzchni płyt,  $\Delta T_b$  – pomierzonej w przekroju betonowym w odległości 0,03 m od dolnej i górnej powierzchni płyty za pomocą termistorów oraz  $\Delta T$  – teoretyczny rozkład temperatury na krawędziach zewnętrznych płyty przy przyjęciu założenia o liniowym rozkładzie temperatury na wysokości przekroju (pomiar przeprowadzony na wysokości 0,03 m, 0,08 m i 0,15 m potwierdza to założenie).

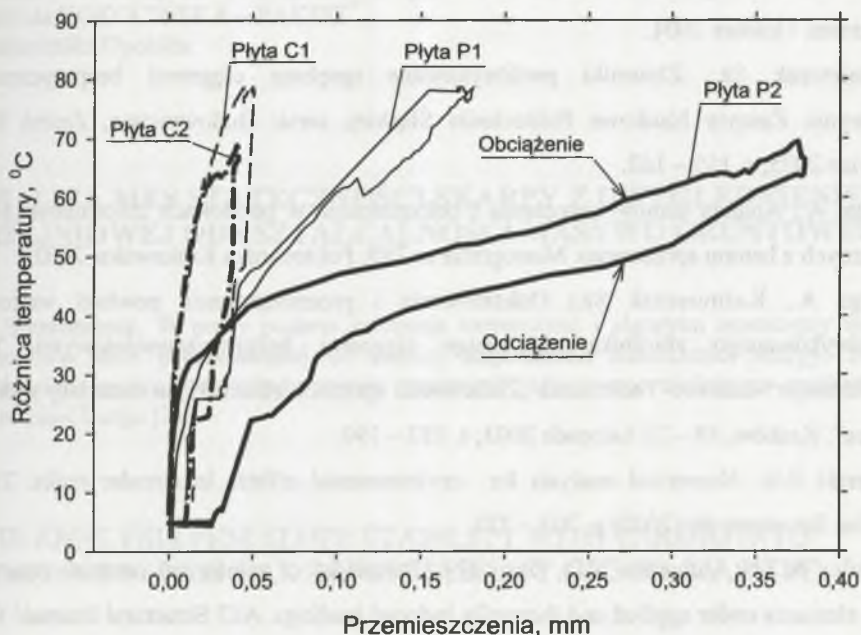


Rys. 6. Przebieg różnicy temperatur w czasie eksperymentu  
Fig. 6. Temperature differences versus time of loading

Na podstawie analizy rysunku 6 można zauważyć spadek różnicy temperatury w przekroju betonowym, w trakcie przeprowadzania obu eksperymentów, pomimo przyrostu różnicy temperatury otoczenia. W badaniu pierwszym ekstremum różnicy temperatury w przekroju wystąpiło po ok. 9 godzinach, w badaniu 2 po ok. 6 godzinach. Efekt ten jest związany z akumulacją ciepła w betonowej płycie. Wzrasta średnia temperatura w przekroju i maleje różnica temperatury. Bezpośrednio jest to związane z mniejszą efektywnością sposobu chłodzenia zimnym powietrzem od ogrzewania parą wodną. Bieżąca obserwacja rozkładu temperatury w trakcie eksperymentu pozwoliła na takie sterowanie obciążeniem termicznym, aby w przypadku zmniejszania się tej różnicy rozpocząć proces odciążenia, czyli stopniowego wychładzania wody.

Na rys. 7 pokazano przyrost poziomego przemieszczenia zarejestrowany przez czujniki drogi zamocowane w przekroju przez złącze i sztuczną rysę o głębokości 10 mm naciętą w

górną powierzchnię płyty ciągłej ( patrz rys. 3 i rys. 5 czujniki H1 i H2). Pozioma oś czujników jest umieszczona 10 mm powyżej górnej powierzchni badanych elementów.



Rys. 7. Przyrost przemieszczenia w przekroju przez złącze (P) i płytę ciągłą (C)

Fig. 7. Displacement increase at cross section of joint (P) and continuous slab (C)

Obecność niezbrojonego złącza ma znaczący wpływ na pracę sprężonych elementów płytowych. Mniejszy poziom wprowadzonych naprężeń ściskających na górnej krawędzi przekroju, mniejsza sztywność przekroju złącza oraz gorsze cechy mechaniczne zaczynu iniekcyjnego w stosunku do betonu prefabrykatu powodują obniżenie rysoodporności złącza.

W obu eksperymentach rysa w złączu miała nieregularny przebieg, występowała zarówno na styku prefabrykat – zaczyn iniekcyjny, jak i w samym zaczynie wypełniającym złącze.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania są jednym z etapów analizy pracy pionowego niezbrojonego złącza w zbiornikach prefabrykowanych sprężonych cięgnami bezprzyczepnościowymi. Jej celem jest budowa i weryfikacja modelu rysy dyskretnej oraz przeprowadzenie analizy parametrycznej konstrukcji całego zbiornika za pomocą metody elementów skończonych.

## LITERATURA

1. Eurocode 2: Design of concrete structures, part 3, Liquid retaining and containment structures. October 2004.
2. Kaźmierczak Sz.: Zbiorniki prefabrykowane sprężone cięgnami bezprzyczepnościowymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, Zeszyt 104, Gliwice 2005, s. 155 – 162.
3. Seruga A.: Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego. Monografia nr 289, Politechnika Krakowska, 2003.
4. Seruga A., Kaźmierczak Sz.: Odkształcenia i przemieszczenia powłoki walcowej prefabrykowanego zbiornika sprężonego cięgnami bezprzyczepnościowymi. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Kraków, 19 – 21 listopada 2003, s. 183 – 190.
5. Melerski E.S.: Numerical analysis for environmental effects in circular tanks. *Thin-Walled Structures* 40 (2002) p. 703 – 727.
6. Priestley M.J.N, Vitharana N.D, Dean J.N.: Behaviour of reinforced concrete reservoir wall elements under applied and thermally induced loadings. *ACI Structural Journal/ V95, No 6, May-June 1998, p. 238 – 248.*
7. Priestley M.J.N, Vitharana N.D.: Significance of temperature-induced loadings on concrete cylindrical reservoir walls. *ACI Structural Journal/ Sept.-Oct. 1999, p. 737 – 747.*

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Kuś