

RAFAŁ SZYDŁOWSKI, MAŁGORZATA MIESZCZAK\*

# **GDZIE JEST GRANICA SMUKŁOŚCI SPRĘŻONYCH PŁYT STROPOWYCH? O PROJEKCIE I BADANIACH STROPÓW SPRĘŻONYCH W BUDYNKU CENTRUM KULTURALNO-ARTYSTYCZNEGO W KOZIENICACH**

## **WHERE IS THE LIMIT TO SPAN-DEPTH RATIO FOR PRESTRESSED SLABS? ABOUT THE DESIGN AND RESEARCH ON PRESTRESSED SLAB IN ART GALLERY IN KOZIENICE**

### Streszczenie

W zrealizowanym 2014/15 budynku Galerii Kulturalno-Artystycznej w Kozienicach autorzy pracy zaprojektowali trzy kablobetonowe przęsła stropów. Jedno z nich jest dwukierunkowe i posiada wymiary  $17,65 \times 19,5$  m oraz grubość 350 mm, dwa pozostałe to przęsła pracujące w jednym kierunku o rozpiętościach 11,15 i 12,86 m oraz grubościach odpowiednio 200 i 250 mm. Wszystkie trzy przęsła zamocowano w ścianach bądź belkach. Stosunek rozpiętości do grubości dla płyt przekracza zalecane w zagranicznych wytycznych wartości i wynosi odpowiednio 50,4, 55,8 i 51,4. Ze względu na duże rozpiętości i niespotykaną dotąd w realizacjach smukłość płyt sprężonych prowadzona jest ciągła kontrola ugięć, odkształceń i temperatury betonu. Dodatkowo w trakcie betonowania największej z płyt pobrano zestaw próbek betonowych, na których określono własności mechaniczne betonu w momencie sprężania (po 14 dniach) i po 28 dniach. W pracy przedstawiono założenia projektowe, działające obciążenia i wyniki analizy komputerowej płyt w trzech stadiach realizacji. Wyniki badań in-situ porównano z rezultatami teoretycznymi. W oparciu o wyniki pomiarów, analiz i porównań wyciągnięto stosowne wnioski.

### Summary

Three post-tensioned concrete slabs were designed and realized in a building in Koziencie last year. One of them is a two-way slab of dimensions of  $17,65 \times 19,5$  m and thickness of 350 mm, the other two are one-way slabs of span dimensions of 11,15 and 12,86 m and thick-

\* Dr inż. Rafał Szydłowski, mgr inż. Małgorzata Mieszczak Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

ness of 200 and 250 mm, respectively. All the slabs are supported on the wall. The span-depth ratio exceeds their recommended values and is equal to 50,4, 55,8 and 51,4, respectively. The monitoring of deflections of all the slabs and concrete strains and temperatures of one of them is carried out continuously. Additionally, a laboratory test of concrete samples obtained during concreting of one of the slabs was carried out. This paper presents design assumptions, acting load and the results of computational analysis of the slabs in three stages of construction. The results of in-situ tests are compared with the theoretical results. Based on the presented results some conclusions have been drawn.

## 1. WSTĘP

Płyty dużych rozpiętości z betonu sprężonego znalazły zastosowanie jako stropy w budynkach wiele lat temu w Stanach Zjednoczonych, Australii, Hong Kongu, Singapurze a w późniejszym okresie w Europie. W Polsce ich rozkwit datowany jest na ostatnie dziesięciolecie. Na przestrzeni kilku dekad wydano wiele wytycznych i zaleceń dotyczących projektowania i konstruowania takich konstrukcji. W Europie opublikowano prace [4, 6–8]. W Polsce w ostatnim dziesięcioleciu opublikowano kilka prac dotyczących projektowania i realizacji stropów sprężonych [2, 5, 11, 14].

Opublikowane wytyczne podają zalecane wartości stosunku rozpiętości do grubości płyty uzależniając ją od typu konstrukcji, obciążenia i dopuszczalnego ugięcia. Przykładowo, według [4], dla pełnych płyt ciągłych o dwóch lub więcej przęsłach w każdym kierunku stosunek ten generalnie nie powinien przekraczać wartości 42 dla płyt stropowych i 48 dla stropodachów. Khan i Williams [10] wychodząc z warunku braku rys w przekroju, na podstawie przeprowadzonych obliczeń, podają wymagane grubości dla różnych poziomów obciążenia (tab. 1).

Tabela 1

Zalecane wartości stosunku rozpiętość/grubość płyty według [10]

Typ płyty	Rozpiętość/grubość
Pełna płyta jednokierunkowa	30–45
Płyta uźebrowana	25–35
Pełna płyta płaska	35–45
Strop kasetonowy	20–30

Jednym z głównych czynników determinujących grubość płyty jest jej ugięcie. W tabeli 2 zamieszczono dopuszczalne ugięcia płyt zgodnie z wytycznymi wybranymi norm.

Autorzy pracy w realizowanym w okresie 2014/15 budynku użyteczności publicznej zaprojektowali trzy jednoprzęsłowe płyty sprężone cięgnami bez przyczepności (dwa przęsła sprężone jednokierunkowo, trzecie w dwóch kierunkach).

Tabela 2

Graniczne ugięcia płyt według wybranych wytycznych normowych

	Typ elementu	Wartość graniczna	Uwagi
PN EN 1992-1-1 [13]	wszystkie	L/250  L/500	ugięcie pod działaniem obciążeń quasi-stałych  ugięcie pod działaniem obciążeń quasi-stałych powstałe po ukończeniu konstrukcji
PN-B-03264 [12]	płyty stropów i stropodachów	L/200 dla $L \leq 6,0$ m 30 mm dla $6,0 < L < 7,5$ m L/250 dla $L > 7,5$ m	ugięcie pod działaniem obciążeń długotrwałych
ACI318 [1]	stropodachy przy braku warstw i elementów wykończenia  płyty stropowe przy braku warstw i elementów wykończenia  stropy i stropodachy z kruchymi elementami wykończenia	L/180  L/360  L/480	ugięcie krótkotrwałe pod całkowitym obciążeniem   ugięcie występujące po instalacji elementów wykończenia
BS8110 [3]	stropy i stropodachy z odkształcalnymi elementami wykończenia  wszelkie widoczne elementy konstrukcyjne  stropy i stropodachy z kruchymi elementami wykończenia  stropy i stropodachy z odkształcalnymi elementami wykończenia	L/240  L/250  mniejsza z wartości L/500 i 20 mm  mniejsza z wartości L/350 i 20 mm	ugięcie całkowite   ugięcie występujące po instalacji elementów wykończenia

Stosunek rozpiętość–grubość każdej z płyt przekracza wartość 50. Wszystkie płyty zostały wykonane w okresie lipiec/sierpień 2014 roku. W dalszych punktach zostanie przedstawiona geometria budynku, charakterystyka płyt sprężonych, obliczenia modelowe, prognozowane naprężenia i ugięcia oraz wyniki pomiarów ugięć w trakcie realizacji.

## 2. GEOMETRIA BUDYNKU, CHARAKTERYSTYKA STROPÓW SPRĘŻONYCH

### 2.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDYNKU

Budynek Centrum Kulturalno-Artystycznego w Kozienicach (il. 1) został zaprojektowany w 2013 roku przez Pracownię Projektową F-11 (architekt: dr inż. arch. Marcin Furtak), budowę rozpoczęto pod koniec 2013 a termin ukończenia wyznaczono na sierpień 2015 roku. Budynek łączy funkcje kulturalno-artystyczne (przewidziano między innymi sale – kinową, teatralną, bibliotekę) z dydaktycznymi (szkoła muzyczna, sale do zajęć tanecznych). Na rzucie prostokąta o wymiarach  $61,5 \times 42,5$  m zaprojektowano 2 oddylatowane segmenty budynku o odmiennym układzie konstrukcyjnym. Na ilustracji 2 przedstawiono rzut (w poziomie najwyższej kondygnacji) natomiast na il. 3 przekrój pionowy segmentu zlokalizowanego pomiędzy osiami 1 i 6. W segmencie tym usytuowano salę kinową (pomiędzy osiami L i D) oraz salę teatralną (pomiędzy osiami A i C). Konieczność utrzymania dużych, wolnych od podpór przestrzeni oraz ograniczona wysokość zabudowy wymusiła konieczność zastosowania cienkich i smukłych przegród poziomych. Wobec powyższego zaprojektowano trzy przeszła płytowe sprężone cięgnami bez przyczepności (płytę stropową nad salą teatralną w poz. 9,68 m – Pł-1 oraz dwa przeszła stropodachu: nad salą teatralną w poz. +14,08 m – Pł-2 i nad salą kinową w poz. +13,68 m – Pł-3).

### 2.2. CHARAKTERYSTYKA PŁYT SPRĘŻONYCH

Zaprojektowano i zrealizowano następujące płyty sprężone:

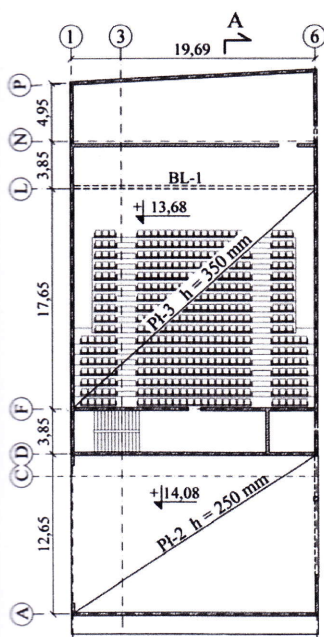
- płyta Pł-1 w poz. +9,68 m: jednokierunkowo sprężone przeszło zlokalizowane pomiędzy osiami 3 i 6 oraz A i C (il. 4a). Rozpiętość płyty w osiach ścian wynosi 11,15 m. Grubość płyty wynosi 200 mm, natomiast grubość ścian to 240 mm. Stosunek rozpiętości do grubości wynosi 55,8. Płytę sprężono cięgnami bez przyczepności w rozstawie 300 mm. Geometrię sprężenia przedstawiono na il. 4a;



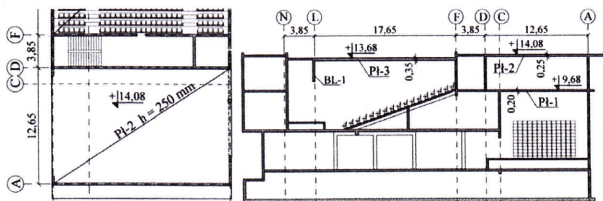
- płyta Pł-2 w poz. 14,08: jednokierunkowo sprężone przęsło zlokalizowane pomiędzy osiami 1 i 6 oraz A i D (il. 4b). Rozpiętość przęsła w osiach ścian wynosi 12,86 m, natomiast grubość płyty 250 mm. Stosunek rozpiętości do grubości wynosi w tym przypadku 51,4. Płytę sprężono monostrandami w rozstawie 250 mm;
- płyta Pł-3 nad salą kinową w poz. +13,68 m: przęsło o największej rozpiętości (il. 5). Rozpiętość płyty w osiach ścian (oraz belki BL-1 w osi L) wynosi  $17,65 \times 19,6$  m, jej grubość to 350 mm. Stosunek rozpiętości do grubości (dla krótszej rozpiętości) wynosi 50,4. Płyta sprężona jest w dwóch kierunkach ciężniami bez przyczepności w rozstawie 220 mm.



Il. 1. Wizualizacja CKA w Kozienicach (źródło: Pracownia Projektowa F-11)



Il. 2. Rzut segmentu budynku z płytami sprężonymi

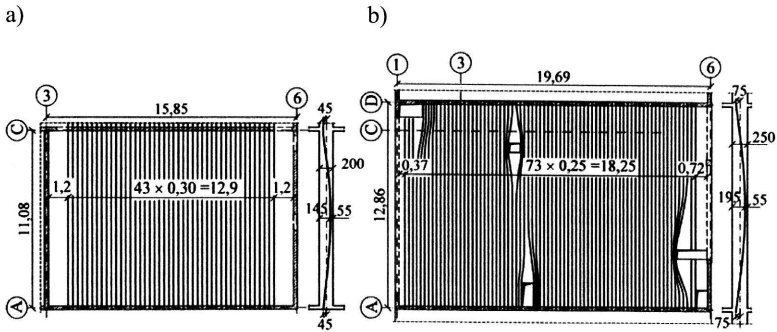


Il. 3. Przekrój A-A

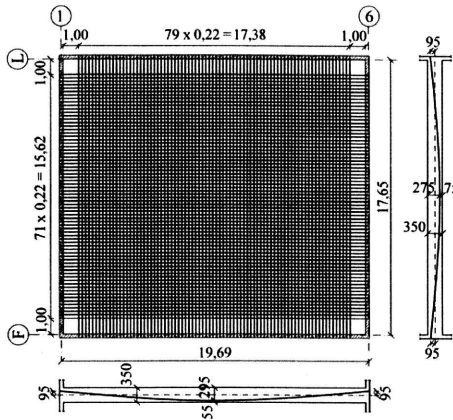
### 2.3. BETON I ZBROJENIE ZWYKŁE

Do wykonania płyt sprężonych zastosowano beton klasy C35/45 na bazie cementu CEM i 52,5 N-HSA-NA w ilości  $396 \text{ kg/m}^3$  ( $w/c = 0,5$ ). Do mieszanki betonowej o konsystencji S2/S3 zastosowano oprócz piasku (0–2 mm) grys dolomitowy o uziarnieniu 2–16 mm. Wyniki badań laboratoryjnych pobranych próbek betonu przedstawiono w p. 3.

Zbrojenie zwykłe wszystkich płyt sprężonych zaprojektowano w postaci dolnej i górnej siatki z prętów  $\varnothing 10$  mm co 150 mm.



II. 4. Geometria i sprężenie płyt Pł-1 i Pł-2



II. 5. Geometria i sprężenie płyty Pł-3

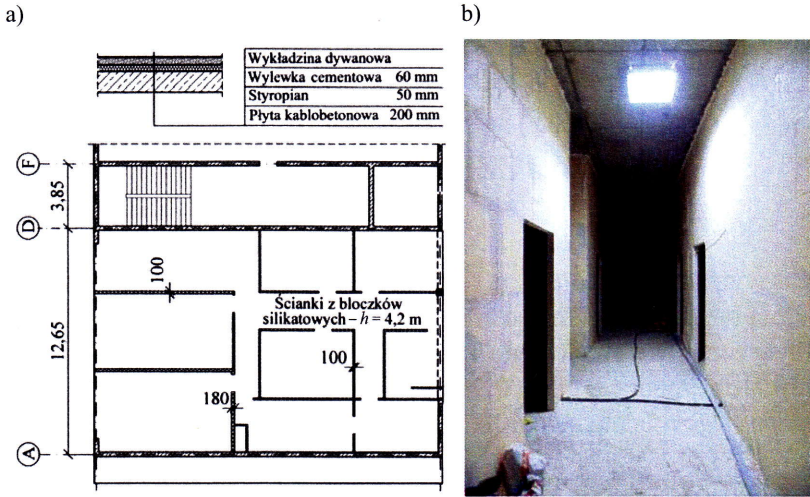
## 2.4. CIĘGNA SPRĘŻAJĄCE, SIŁA SPRĘŻAJĄCA

Do sprężenia płyt użyto cięgien bez przyczepności (monostrandy) Y1860S7 o średnicy 15,7 mm (splot 7-drutowy  $1 \times 5,7 \text{ mm} + 6 \times 5 \text{ mm}$ , powierzchnia splotu  $-143 \text{ mm}^2$ , wytrzymałość charakterystyczna  $-f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ ). Sploty naciągano siłą 220 kN po  $14 \pm 1$  dniach od zabetonowania.

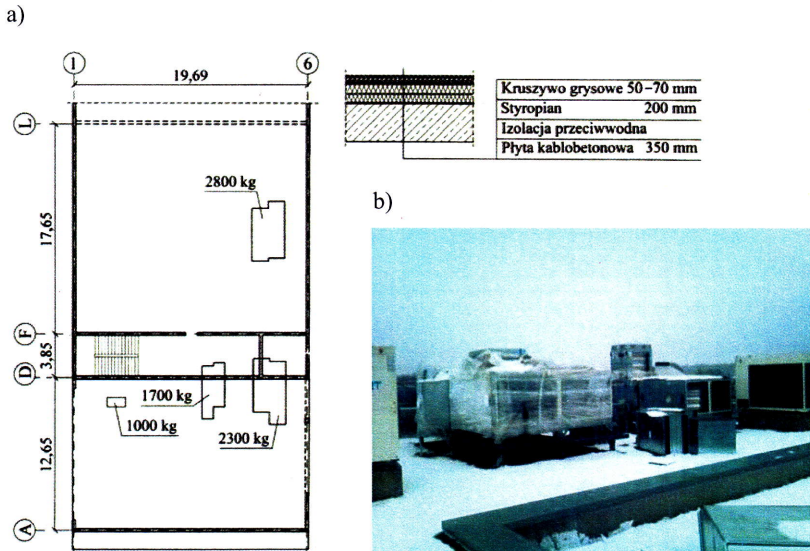
## 2.5. OBCIĄŻENIE PŁYT

Na płycie Pł-1, ponad salą teatralną, zlokalizowano pomieszczenia dydaktyczne oraz pomieszczenia zaplecza szkoły muzycznej. Na płycie zaprojektowano i wykonano gęstą zabudowę ścian działowych z pustaków silikatowych o grubości

180 i 100 mm. Wysokość ścian wynosi 4,2 m, natomiast sumaryczne obciążenie równomiernie rozłożone to 2,6 kN/m<sup>2</sup>. Układ ścian działowych oraz warstw na stropie wraz z widokiem zabudowanej przestrzeni na płycie przedstawiono na il. 6. Natomiast ilustracja 7 przedstawia układ warstw oraz schemat rozmieszczenia i wartość skupionych obciążeń na sprężonych płytach stropodachu.



Il. 6. Układ warstw i ścianek działowych na płycie P1-1 w poz. +9,68 m (a), widok zabudowanej przestrzeni na płycie (b)



Il. 7. Warstwy oraz lokalizacja skupionych obciążeń od urządzeń na dachu (a), widok dachu dn. 5 lutego 2015 (b)

### 3. BADANIA BETONU

W trakcie betonowania płyty P1-3 pobrano zestaw próbek betonowych (walce  $\phi 150 \times 300$  mm), które posłużyły wyznaczeniu w laboratorium wytrzymałości i modułu sprężystości betonu w momencie sprężania (14 dni po zabetonowaniu) i po 28 dniach dojrzewania. Wyniki badań przedstawiono w tab. 3.

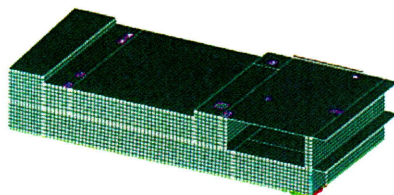
### 4. OBLICZENIA MODELOWE

W celu wyznaczenia teoretycznych wartości ugięć oraz momentów zginających w płytach sprężonych wykonano model fragmentu budynku w programie RFEM (il. 8). Płyty stropowe zbudowano z powierzchniowych, prostokątnych elementów skończonych o wymiarach  $0,5 \times 0,5$  m. Analiza prowadzona była przy założeniu liniowo-sprężystego modelu betonu, sprężenie modelowano obciążeniem zastępczym.

Tabela 3

Wyniki badań cech mechanicznych betonu płyty P1-3

Cecha	Nr próbki			Wartość średnia
	1	2	3	
Po 14 dniach (sprężanie)				
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	27,4	30,1	31,7	<b>29,7</b>
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	2,57	2,88	2,66	<b>2,70</b>
Moduł sprężystości [GPa]	29,2	30,8	30,5	<b>30,2</b>
Po 28 dniach				
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	34,4	33,3	33,6	<b>33,8</b>
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	2,71	2,69	2,96	<b>2,79</b>
Moduł sprężystości [GPa]	33,4	35,2	30,3	<b>33,0</b>



Il. 8. Model fragmentu budynku wykonany w programie RFEM



## 4.1. MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI BETONU

Powszechnie wiadomo, że moduł sprężystości betonu w naturalnej konstrukcji jest niższy niż moduł wyznaczony na drobnowymiarowych próbkach laboratoryjnych [15]. Tanabe w pracy [16] wykazał, iż stosunek modułu sprężystości betonu otrzymanego z badań in-situ do wartości otrzymanej z testów laboratoryjnych na próbkach walcowych zmienia się w czasie od wartości 0,77 do 0,55. W analizie obliczeniowej przyjęto 80% wartości modułu uzyskanego na walcach  $\varnothing 150 \times 300$  mm stosownie do rozważanej sytuacji (wartość 14- lub 28-dniowa).

## 4.2. OBCIĄŻENIE SPRĘŻENIEM

Sprężenie modelowano zastępczym obciążeniem równomiernie rozłożonym skierowanym w górę oraz dodatkowo liniowym momentem zginającym na podporach, wynikającym z mimośrodowo kabła w miejscach kotwienia. Każde cięgno zostało napięte siłą 220 kN. Wartość siły w cięgnach po zakotwieniu wyznaczono korzystając z pomierzonych wydłużeń cięgien w wyniku ich naciągu. Założono w tym celu moduł sprężystości stali  $E = 190$  GPa. Obciążenie zastępcze wyznaczono z równania trasy swobodnego zwisu cięgna. W tabeli 4 zestawiono wartości wyznaczonych sił w cięgnach oraz obciążeń zastępczych.

Tabela 4

Zestawienie obciążeń od sprężenia

Płyta	Siła w cięgnie [kN]	Obciążenie zastępcze [kN/m <sup>2</sup> ]	
Pł-1	204	3,94	
Pł-2	212	5,96	
Pł-3	$x^*$	209	4,25
	$y^*$	212	4,85

\*  $x, y$  oznaczają odpowiednio kierunki osi literowych i liczbowych na il. 2–7.

## 4.3. SYTUACJE OBLICZENIOWE I WARTOŚCI OBCIĄŻEŃ

W analizie rozważono trzy sytuacje obliczeniowe:

- sytuację po sprężeniu (początkową) – założono obciążenie od sprężenia po zakotwieniu zgodnie z tab. 4 oraz obciążenie ciężarem płyt ( $2400 \text{ kg/m}^3$  – tab. 5);

- sytuację istniejącą (stan w dn. 5 lutego 2015 r. – na płytach zainstalowano projektowaną zabudowę, ciężkie warstwy wykończeniowe i urządzenia). Siła sprężająca w tej sytuacji została zmniejszona o 4% z uwagi na straty opóźnione (po 5,5 miesiącach od sprężenia). Przyjęte obciążenie zestawiono w tab. 5;
- sytuację użytkową – siłę sprężającą po zakotwieniu zmniejszono o 7% (trwała wartość siły po stratach opóźnionych), przyjęto wszystkie obciążenia stałe wg tab. 5 oraz dodatkowo obciążenie użytkowe równe  $2,5 \text{ kN/m}^2$  dla stropu (Pł-1) i  $2,0 \text{ kN/m}^2$  dla dachu (Pł-2 i Pł-3).

Tabela 5

Obciążenia stałe działające na płyty sprężone

Rodzaj obciążenia		Wartość [ $\text{kN/m}^2$ ]
Pł-1	ciężar własny płyty	4,8
	ścianki działowe	2,6
	warstwy podłogi	1,3
Pł-2	ciężar własny płyty	6,25
	warstwy dachu	1,1
	urządzenia na dachu	1,0
Pł-3	ciężar własny płyty	8,5
	warstwy dachu	1,1
	urządzenia na dachu	0,5

#### 4.4. WYNIKI ANALIZY

W tabeli 6 przedstawiono wartości momentów zginających w środku rozpiętości płyt uzyskane w poszczególnych sytuacjach obliczeniowych, zdefiniowanych w p. 4.3. Wszystkie podane momenty rozciągają włókna dolne, są wartościami wyznaczonymi dla obciążeń charakterystycznych. Wraz z wartościami momentów zestawiono wartości siły sprężającej oraz naprężeń górnych i dolnych w przekrojach. Można zauważyć wysoki poziom wprowadzonych naprężeń ściskających po sprężeniu na dolnej powierzchni oraz naprężenia rozciągające na górnej powierzchni wszystkich płyt.

Na ilustracjach 9–11 przedstawiono mapy ugięć poszczególnych płyt dla stanu istniejącego (z dn. 5 lutego 2015 r.) w postaci dwóch składników. Wyznaczono oddzielnie ugięcia: 1 – dla sytuacji po sprężeniu (przyjęto obciążenie ciężarem

płyt, sprężeniem po zakotwieniu cięgien oraz wartość modułu sprężystości betonu w chwili sprężania – po 14 dniach) – il. 9a, 10a, 11a; 2 – przyrost ugięcia od dodatkowych obciążeń na płytach (przyjęto ciężar wszystkich dodatkowych obciążeń występujących na płytach, odwrotne obciążenie sprężeniem odpowiadające spadkowi siły o 4% oraz wartość modułu sprężystości betonu po 28 dniach) – il. 9b, 10b, 11b. Całkowite obliczone ugięcie dla poszczególnych płyt przedstawiono w p. 6 na il. 13–15.

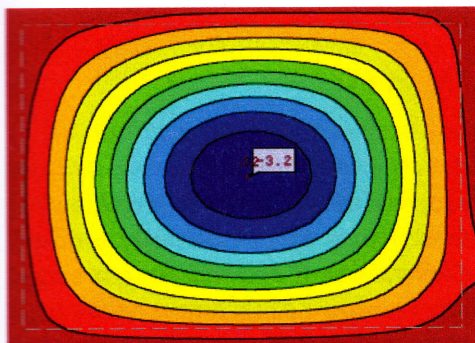
Tabela 6

Siła sprężająca, momenty zginające i naprężenia w poszczególnych sytuacjach

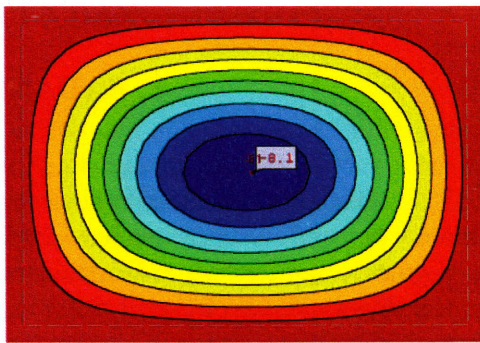
Płyta	$A_{cs}$ [m <sup>2</sup> ]	$W_{cs}$ [m <sup>3</sup> ]	$e$ [m]	Sytuacja obliczeniowa									
				1) po sprężeniu			2) stan istniejący			3) użytkowa			
				$P$ [kN/m]	$M$ [kNm/m]	$\sigma_s$ $\sigma_d$ [MPa]	$P$ [kN/m]	$M$ [kNm/m]	$\sigma_s$ $\sigma_d$ [MPa]	$P$ [kN/m]	$M$ [kNm/m]	$\sigma_s$ $\sigma_d$ [MPa]	
Pl-1	0,205	0,007	0,045	680	5,4	<b>-0,30</b> <b>6,91</b>	653	23,8	<b>2,37</b> <b>3,97</b>	632	35,5	<b>4,08</b> <b>2,06</b>	
Pl-2	0,256	0,011	0,07	848	8,0	<b>-1,41</b> <b>8,04</b>	753	26,7	<b>0,40</b> <b>5,97</b>	789	43,9	<b>2,04</b> <b>4,12</b>	
Pl-3	$x^*$	0,356	0,021	0,12	850	17,0	<b>-1,90</b> <b>7,24</b>	816	35,2	<b>-0,93</b> <b>6,06</b>	791	57,2	<b>0,19</b> <b>4,78</b>
	$y^*$	0,356	0,021	0,10	964	21,5	<b>-0,81</b> <b>6,23</b>	925	42,8	<b>0,26</b> <b>4,94</b>	897	70,4	<b>1,61</b> <b>3,42</b>

\*  $x, y$  oznaczają odpowiednio kierunki osi literowych i liczbowych na il. 2–7.

a)

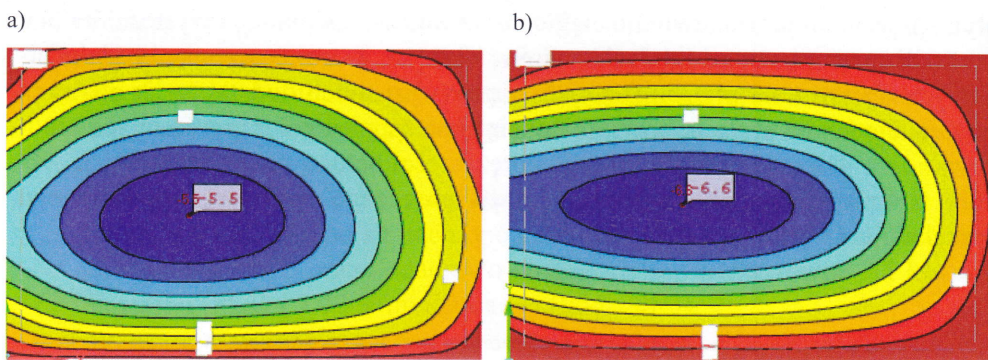


b)

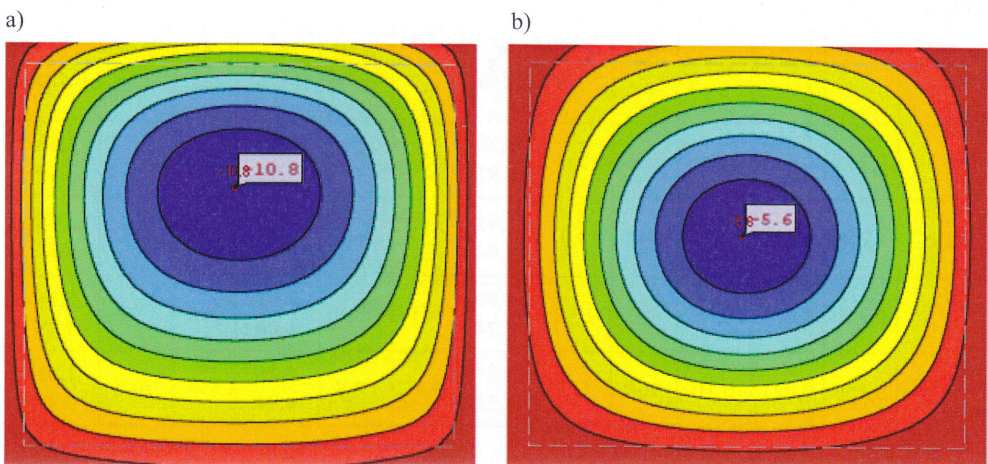


Il. 9. Ugięcie płyty Pl-1 po sprężeniu (a), przyrost ugięcia od obciążenia dachu i spadku siły sprężającej (b)





II. 10. Ugięcie płyty PI-2 po sprężeniu (a), przyrost ugięcia od obciążenia dachu i spadku siły sprężającej (b)



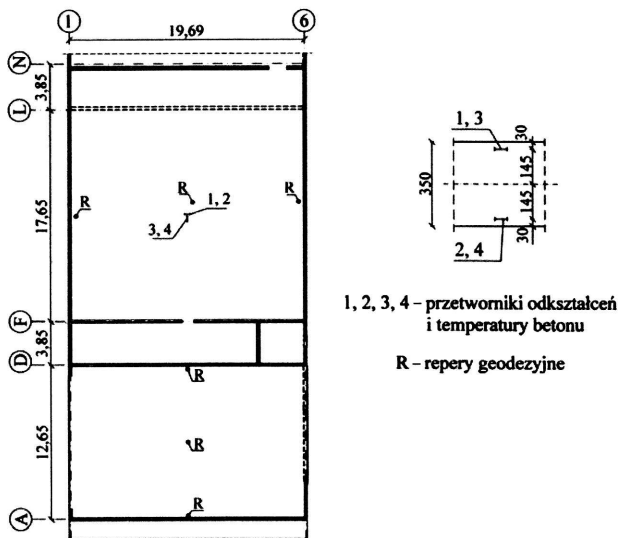
II. 11. Ugięcie płyty PI-3 po sprężeniu (a), przyrost ugięcia od obciążenia dachu i spadku siły sprężającej (b)

## 5. BADANIA IN-SITU

Z uwagi na prototypowość zastosowanych rozwiązań w warsztacie projektowym autorów (wysoki stosunek rozpiętości do grubości) płyty sprężone zostały poddane szczegółowym obserwacjom i badaniom w trakcie realizacji. Prowadzony jest ciągły geodezyjny monitoring ugięć płyt. Pomiar zerowy wykonano przed wprowadzeniem sprężenia, kolejne pomiary wykonano po sprężeniu płyt i po usunięciu desek. Dalsze pomiary były i są wykonywane z częstotnością nie rzadziej niż raz w miesiącu. Pomiary ugięć realizowane są z wykorzystaniem trzech reperów dla każdej płyty



(dwa przy ścianach i jeden w środku przęsła), zainstalowanych w płycie i wyprowadzonych ponad wylewkę w stropie w poz. +9,68 m i ponad warstwę ocieplenia na dachu.



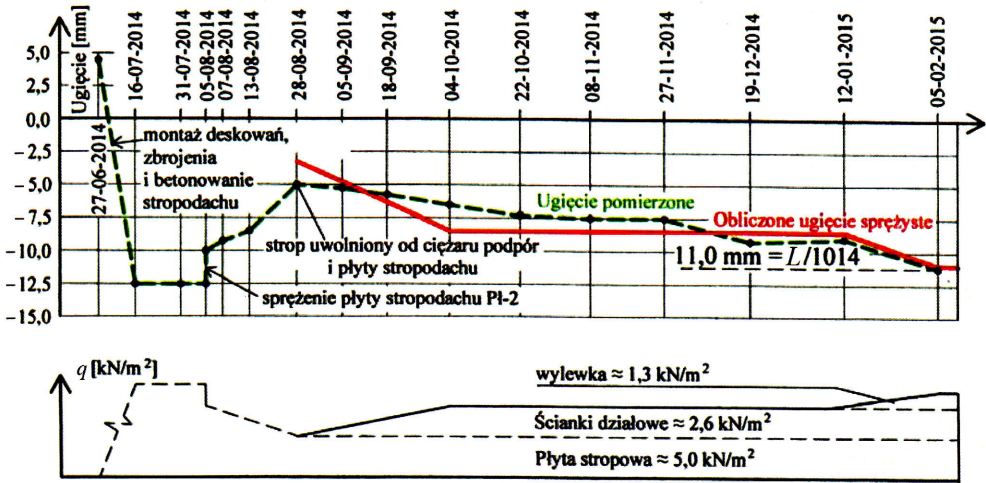
Il. 12. Lokalizacja reperów i czujników pomiarowych w płytach stropodachu

Dodatkowo w środku rozpiętości przęsła płyty Pł-3 nad kinem zainstalowano cztery strunowe przetworniki odkształceń z pomiarem temperatury betonu, po dwa w każdym kierunku 30 mm od dolnej i górnej powierzchni stropu (il. 12).

## 6. WYNIKI BADAŃ

Na ilustracjach 13–15 przedstawiono pomierzone i obliczone ugięcia płyt sprężonych. Niewątpliwie najmniej znaną historię obciążenia posiada płyta stropowa Pł-1 w poz. +9,68 m (il. 13). W wyniku sprężenia płyta doznała wygięcia w górę o 4,5 mm. Na stropie tuż po sprężeniu zaczęto montować podpory i deskowanie płyty stropodachu. Wprawdzie został on podparty siatką podpór, jednak zrobiono to na podatnej konstrukcji widowni sceny teatralnej. Duża wysokość podpór i zbyt mała sztywność spowodowała również ich wyboczenie. Czynniki te sprawiły, że pod ciężarem deskowań i mokrej płyty stropodachu o grubości 250 mm płyta Pł-1 doznała ugięcia o wartości 12,5 mm. Po sprężeniu płyty stropodachu 5 sierpnia 2014 r.

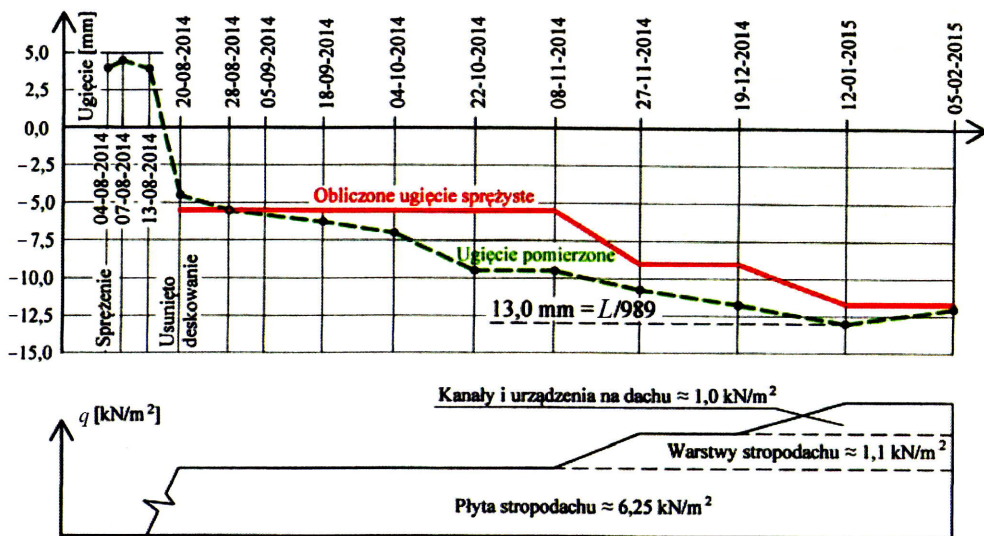
ugięcie płyty Pł-1 zostało zredukowane o 2,5 mm do wartości 10 mm. Następnie w okresie do 28 sierpnia 2014 r., przy sukcesywnym demontażu podpór i deskowań na stropie, płyta wracała w kierunku swojego pierwotnego położenia osiągając ostatecznie wartość ugięcia 5,0 mm. W okresie od 28 sierpnia 2014 r. do 5 lutego 2015 r. na stropie pojawiały się stopniowo dodatkowe obciążenia (ściany działowe, wylewka) zwiększając jej ugięcie do wartości 11,0 mm. Przy rozpiętości płyty wynoszącej 11,15 m stosunek ugięcia do rozpiętości wynosi 1/1014.



Il. 13. Ugięcia pomierzone i obliczone z analizy sprężystej dla płyty Pł-1

Ilustracja 14 przedstawia ugięcia płyty stropodachu Pł-2. Pod wpływem sprężenia płyta doznała wygięcia w górę o wartość 4,5 mm, przy czym po całkowitym demontażu deskowań jej ugięcie w dół wynosiło już 4,5 mm. Wraz ze wzrostem obciążenia i upływem czasu ugięcie przyrosło do wartości 13,0 mm. W ostatnim okresie 24 dni pomiędzy 12 stycznia a 5 lutego 2015 r. płyta uniosła się o 1,0 mm osiągając ugięcie równe 12,0 mm. Największe ugięcie 13,0 mm stanowi 1/989 rozpiętości (12,86 m).

Ugięcia płyty Pł-3 o największej rozpiętości, nad salą kinową, przedstawiono na il. 15. Płyta doznała wygięcia w górę od sprężenia o wartość 4,0 mm, następnie po usunięciu deskowań ugięła się o 8,5 mm. Wraz z upływem czasu i wzrostem obciążenia płyta osiągnęła 12 stycznia 2015 r. ugięcie 23,5 mm, po czym powróciła w górę o 1,0 mm. Stosunek największego ugięcia do krótszej rozpiętości równej 17,65 m wynosi 1/751. Interesujący na wykresie jest wzrost ugięcia o wartość 5,0 mm pomiędzy 4 a 22 października 2014 r. Przyrost ten wystąpił przy niezmiennych obciążeniach płyty. Z pewnością nie był to przyrost ugięć wywołany reologią betonu i stali. Reologiczne przyrosty ugięć w poprzednich okresach, pomiędzy pomiarami, były znacznie mniejsze i zmniejszały się w czasie. Przyczyn tego zjawiska należy upatry-



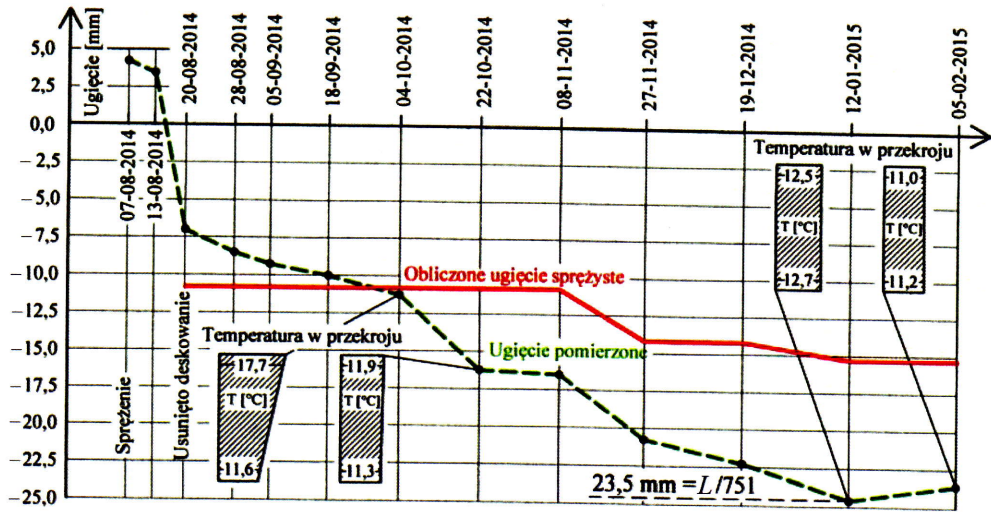
Il. 14. Ugięcia pomierzone i obliczone z analizy sprężystej dla płyty Pł-3

wać w zmianie warunków termiczno-wilgotnościowych betonu. Na wykresie (il. 15) przedstawiono dodatkowo rozkład temperatury na grubości płyty wyznaczony na podstawie temperatur zarejestrowanych na czujnikach 1 i 2. W okresie tym, przy niewielkiej zmianie temperatury betonu przy dolnej powierzchni płyty temperatura przy powierzchni górnej (30 mm poniżej powierzchni) spadła o  $5,8^{\circ}\text{C}$ . Przyczyn podniesienia obu płyt stropodachowych o 1,0 mm w okresie od 10 stycznia do 5 lutego 2015 trudno doszukać się na wykresach temperatur w przekroju. Być może jest to wywołane niewielką zmianą obciążeń związanych z warunkami zimowymi (oblodzenie i niewielka pokrywa śniegowa – il. 7) bądź ubytkiem istniejących wcześniej obciążeń montażowych. Może być to również wywołane czynnikami reologicznymi w betonie.

Uniesienie płyt podczas sprężania a następnie ich opadnięcie w dół po usunięciu podparcia świadczy o podatności podpór, na których oparto strop na czas betonowania.

Ze względu na fakt, że obliczenia ugięć pochodzą z analizy sprężystej konstrukcji z wykorzystaniem metody obciążenia zastępczego trudno doszukiwać się zgodności ugięć obliczonych i pomierzonych. Wiele zagranicznych prac poświęconych płytom sprężonym podkreśla przypadkowość i brak powtarzalności ugięć płyt przy powtarzalnych stropach. W celu oszacowania zbieżności (czy raczej rozbieżności) wyników pomiarów z rezultatami analiz komputerowych pokuszono się jednak o takie porównanie. Niewątpliwie największej zbieżności można oczekiwać w ugięciu doraźnym po sprężeniu. Zadowalającą zgodność uzyskano jedynie w przypadku pły-





Il. 15. Ugięcia pomierzone i obliczone z analizy sprężystej dla płyty Pł-3

ty Pł-2, gdzie wartość zmierzona wyniosła 4,5, a wartość obliczona 5,5 mm. W przypadku płyty Pł-1 wartość obliczona jest znacznie mniejsza, a w przypadku płyty Pł-3 znacznie większa od wartości rzeczywistej. Należy mieć jednak na uwadze, że ugięcie po uwolnieniu płyt z podpór obarczone jest już pewnym składnikiem wynikającym z pełzania betonu, które zachodzi równocześnie z pojawiającym się w czasie obciążeniem i trudno jednoznacznie odseparować składniki doraźny i opóźniony ugięć. Warto również zwrócić uwagę na losowość zachowania się elementów z betonu. Dotychczasowe badania stropów sprężonych wykazały, iż ugięcia powtarzalnych stropów w budynku, wykonywanych w podobnych warunkach, mogą znacząco od siebie odbiegać [10].

## 7. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki realizacji trzech płyt sprężonych cięgami bez przyczepności o stosunku rozpiętości do grubości od 50,4 do 55,8. Przedstawione wyniki obliczeń modelowych oparte są na szeregu założeń upraszczających i w związku z tym mogą być obarczone pewnym błędem wynikającym chociażby z niedostatecznej dokładności oszacowania modułu sprężystości lub siły sprężającej. Znacznie większy stopień pewności należy przypisać jednak wynikom ugięć pomierzonych z dokładnością  $\pm 0,5$  mm. Wszystkie repery geodezyjne zostały zdub-

lowane na wypadek ich uszkodzenia a pomiary prowadzone były na dwóch niezależnych układach reperów w celu wyeliminowania błędów związanych z ewentualnym uszkodzeniem reperów w trakcie budowy. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- pomimo wykonania płyt o stosunkach rozpiętości do grubości znacznie przekraczających wartości zalecane, ugięcia przy prawie wszystkich projektowanych obciążeniach stałych (liczone od pozycji zabetonowania płyt), po 5,5 miesiącach od uwolnienia stropów z podpór są dalekie od wartości granicznych i wynoszą od  $L/1014$  dla jednokierunkowej płyty grubości 200 mm i rozpiętości 11,15 m do  $L/751$  dla dwukierunkowej płyty grubości 350 mm i rozpiętościach  $17,65 \times 19,6$  m. Przyczyn małych ugięć można z pewnością upatrywać w wysokim poziomie dolnych naprężeń ściskających w płytach (tab. 6);
- w przypadku płyty Pł-3 ciężar własny stanowi 84% wszystkich działających obecnie obciążeń. Można uznać, że prawie całe obciążenie działa już przez 5,5 miesiąca. Stosunek przyrostu ugięć w czasie do ugięć doraźnych wynosi  $23,5/7 = 3,6$ . Jest to wartość większa niż wartość 3,0 sugerowana przez *Concrete Society* [4]. Należy uznać, iż nie jest to jeszcze ostateczne ugięcie trwałe;
- możliwe jest projektowanie nawet jednokierunkowo sprężonych stropów opartych na krawędziach o stosunku rozpiętości do grubości przekraczającym nawet 55 z wykorzystaniem zwykłego betonu towarowego, na tańszym kruszywie zwykłym.

## LITERATURA

- [1] ACI Committee 318: Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-02) and commentary (ACI318RM-02), September 2002, Farmington Hills.
- [2] Ajdukiewicz A., Golonka K., *Płaskie stropy sprężone kablami bez przyczepności – specyfika projektowania*, Inżynieria i Budownictwo, 6/2007, 300-309.
- [3] BS8110, Structural use of concrete, part 1, Code of practice for design and construction, part 2, Code of practice for special circumstances, London 1997, 1985, BSI.
- [4] Concrete Society, Post-tensioned concrete floors. Design Handbook, Technical Report No. 43, Cromwell Press, Wiltshire 2005.
- [5] Derkowski W., *Monolityczny, lekki strop żebrowy, sprężony cięgnami bez przyczepności*, Materiały Budowlane, 477, 5/2012, 6, 8 10.
- [6] Fib-Bulletin No. 31, Post-tensioning in building, Lausanne, February 2005.
- [7] FIP Recommendations for the Design of Flat Slabs in Post-tensioned Concrete, Cement & Concrete Association, Wexham Springs 1980.

- [8] FIP Recommendations: Design of post-tensioned slabs and foundations, 1998, SETO, London 1999.
- [9] Górski K., Piętka M., Ślusarczyk J., *Systemy sprężenia monolitycznego i analiza ich efektywności na przykładzie stropu budynku biurowego*, Materiały Budowlane, 5/2012, 2-5, 10.
- [10] Khan S., Williams M., *Post-tensioned Concrete Floors*, Butterworth-Heinemann, Bodmin 1995.
- [11] Pawłowski A.Z., Cała I., *Monolityczne stropy kablobetonowe*, Materiały Budowlane, 435, 11/2008, 22-24.
- [12] PN-B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie, grudzień 2002.
- [13] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, wrzesień 2008.
- [14] Solecki A., Andrzejewski J., Kandybowicz A., *Platinum Towers w Warszawie. Pierwszy w Polsce budynek z płytowymi stropami sprężonymi*, Inżynieria i Budownictwo, 4/2008, 186, 187.
- [15] Szydłowski R., *Zastosowanie cięgien bez przyczepności przeciw powstawaniu rys w młodym betonie*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, listopad 2009.
- [16] Tanabe T., *Measurement of Thermal Stresses in Situ*, Chapter 8 in *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, RILEM Report 15, ed. by R. Springenschmid, E&FN Spon, London–New York 1998, 231-254.