

## Próbné obciążenie stropu kablobetonowego dużej rozpiętości

Rafał Szydłowski

Politechnika Krakowska

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki próbnego obciążenia kablobetonowego stropu sprężonego dwukierunkowo cięgnami bez przyczepności. Wymiary stropu w rzucie wynoszą  $17,65 \times 19,6$  m a jego grubość 350 mm. Strop ten jest jedyną w świecie pełną płytą kablobetonową o tak dużych rozmiarach, co było przyczyną podjęcia próby jego obciążenia. Na podstawie uzyskanych wyników przyrostów sił w splotach sprężających i ugięć uzyskano informacje o wrażliwości płyty na krótkotrwałe obciążenie zewnętrzne.

**Słowa kluczowe:** kablobeton, przyrost naprężeń w stali sprężającej, stropy sprężone, ugięcia stropów

### 1. Wstęp

Kablobetonowe stropy płytowe szeroko rozpowszechniły się w świecie, gdzie są wykonywane już od kilku dekad. W Polsce pierwsze próby sprężania stropów płytowych podjęto dopiero w 2002 roku [1]. W trakcie kilku dekad ich wykonywania wydano w świecie wiele mniej bądź bardziej rozbudowanych wytycznych ułatwiających w prosty inżynierski sposób projektować tego typu stropy. W Europie ukazały się m. in. prace [2, 3 i 4]. W większości wytycznych podawane są zarówno zalecane maksymalne rozpiętości jak i stosunki rozpiętości do grubości płyty. Te podyktowane są dwoma czynnikami: koniecznością zapewnienia rysoodporności oraz akceptowalnych ugięć płyt. Przykładowo, wg [2], przy minimum dwóch przęsłach w każdym kierunku stosunek rozpiętości do grubości płyty nie powinien przekraczać 42 dla stropów i 48 dla stropodachów. Nieco szczegółowiej do stosunku tego podchodzą Khan i Williams w pracy [3]. Maksymalne wartości uzależniają od typu stropu i wartości obciążenia ponad ciężar własny płyty. Podawane przez autorów wartości zamieszczono w tablicy 1. W pracy [4] podano natomiast maksymalne zalecane rozpiętości płyt w zależności od typu płyty i obciążenia ponad ciężar własny. Przykładowo, dla przęsła wewnętrznego ciągłej płyty dwukierunkowej opartej na podporach liniowych, przy obciążeniu ponad ciężar własny wynoszącym  $4,0 \text{ kN/m}^2$ , maksymalna rozpiętość nie powinna przekraczać 12 m a grubość powinna wynosić 250 mm. Przy mniejszym obciążeniu wynoszącym  $1,75 \text{ kN/m}^2$  dopuszczalną rozpiętość określono jako 13,6 m.

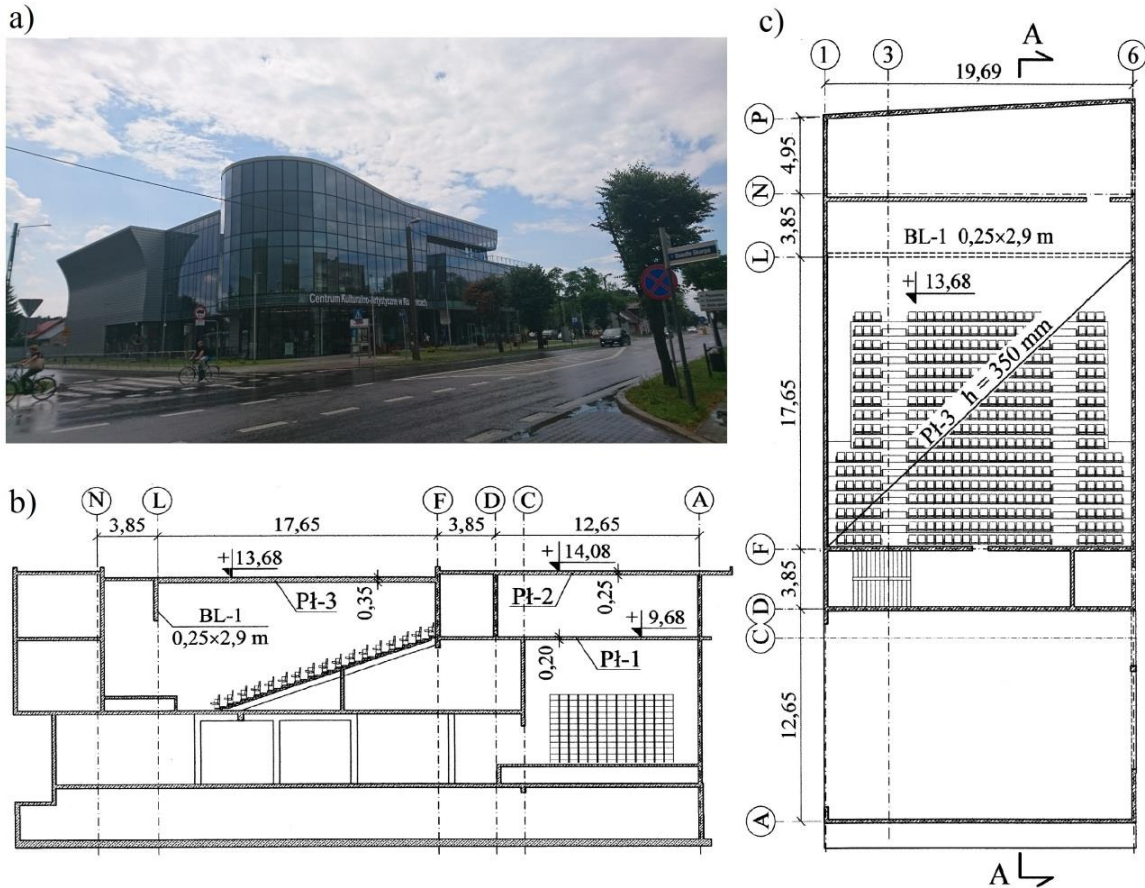
Przytoczone wytyczne sprawiają, iż w świecie płyt o rozpiętości  $12 \div 12,5$  m o pełnym przekroju praktycznie się nie wykonuje. Jeden przypadek można znaleźć w pracy [4]. Przedstawiono w niej strop płaski wykonany w budynku Funchal Crown Plaza Hotel w Portugalii, gdzie jedno przęsło jest o wymiarach w rzucie  $13,14 \times 13,29$  m i grubości płyty 0,25 m. Autor niniejszej pracy, w projektowanym kilka lat temu budynku Centrum Kulturalno Artystycznego w Kozienicach (rys. 1a), zaproponował wykonanie pełnej płyty nad salą kinowo-widowiskową o grubości 350 mm i rozpiętości  $17,65 \times 19,6$  m. Strop ten z powodzeniem wykonano, co przedstawiano w szczegółach w kilku pracach, m. in. [5-8]. Z uwagi na unikalność tego stropu, już przez okres 3 lat od wykonania monitorowane są jego ugięcia, a przed oddaniem budynku do użytkowania poddano go licznym statycznym i dynamicznym testom. W dalszej części pracy przedstawiono program i wyniki statycznego obciążenia stropu zrealizowanego basenami ogrodowymi napełnionymi wodą.

Tablica 1: Maksymalny stosunek rozpiętości do grubości płyty wg [3]

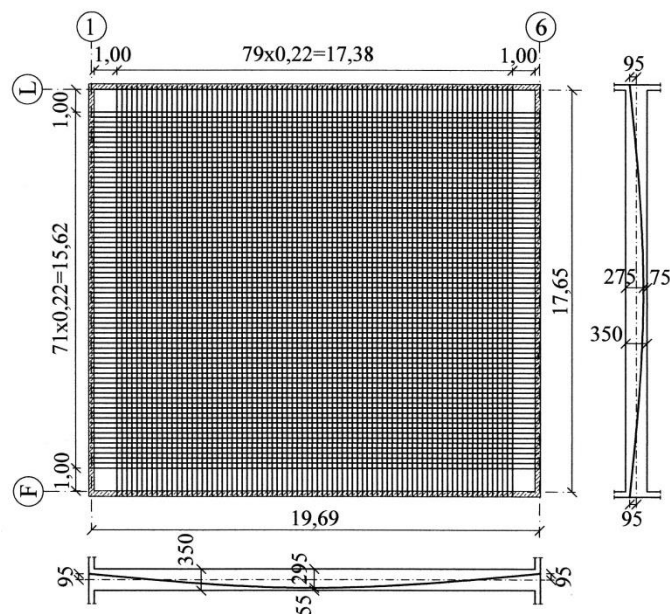
Typ płyty	Rozpiętość/grubość
Pełna płyta jednokierunkowa	30÷45
Płyta uźebrowana	25÷35
Pełna płyta płaska	35÷45
Strop kasetonowy	20÷30

## 2. Charakterystyka, geometria i sprzężenie stropu

Badany strop kablobetonowy Pł-3 pokazano w przekroju budynku na rysunku 1b oraz w rzucie na rysunku 1c. Płytę sprzężono w obu kierunkach cięgnami bez przyczepności o średnicy 15,5 mm w rozstawie 220 mm, ze stali o wytrzymałości  $f_{pk} = 1860$  MPa. Rzut i profil sprzężenia pokazano na rysunku 2. Całkowity zwis cięgien wynosi 195 mm w kierunku osi liczbowych i 215 mm w kierunku osi literowych. Kable napięto siłą 220 kN po 14 dniach od zabetonowania stropu.



Rysunek 1: Widok budynku (a), przekrój (b), rzut stropu Pł-3 (c)



Rysunek 2: Rzut i profil sprzężenia stropu

Do zabetonowania płyty użyto betonu klasy C35/45 sporządzonego na cemencie portlandzkim CEM I 52,5. Prócz piasku jako kruszywa użyto gysu dolomitowego o uziarnieniu 2÷16 mm. Uzyskano średnią wytrzymałość 28 dniową badaną na próbkach  $\phi 150 \times 300$  mm równą 37,5 MPa oraz średni sieczny moduł sprężystości równy 33,0 GPa. W przypadku wytrzymałości na ściskanie nie uzyskano więc wartości wymaganej normą, która dla klasy C35/45 wynosi 42 MPa. W momencie wprowadzania sprężenia (po 14 dniach) wartości te wynosiły odpowiednio 33,0 MPa i 30,1 GPa.

Płytę zabrojono dołem i górą siatką z prętów  $\phi 10$  mm w rozstawie 150 mm w obu kierunkach. Użyto stali żebrowanej B500B.

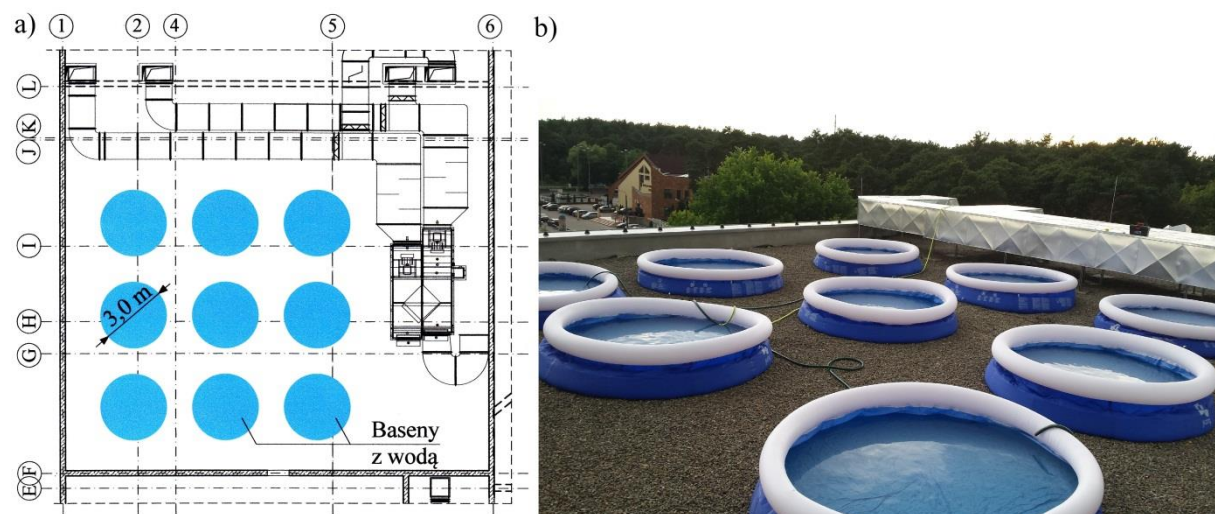
### 3. Program badań, prowadzone pomiary

Do obciążenia stropu użyto 9 basenów ogrodowych o średnicy 3,0 m. Pojemność każdego basenu wynosiła  $3,6 \text{ m}^3$ . Baseny napełniano wodą z sieci wodociągowej. Z uwagi na zbyt małą wydajność sieci, kilka basenów usytuowanych na sąsiednich płytach o mniejszych rozpiętościach, napełniono wodą znacznie wcześniej a w czasie monitorowanej próby napełniania (6 godzin) przepompowywano z nich wodę do basenów docelowych. Lokalizację basenów na stropie pokazano na rysunku 3a, a ich widok w trakcie napełniania na rysunku 3b.

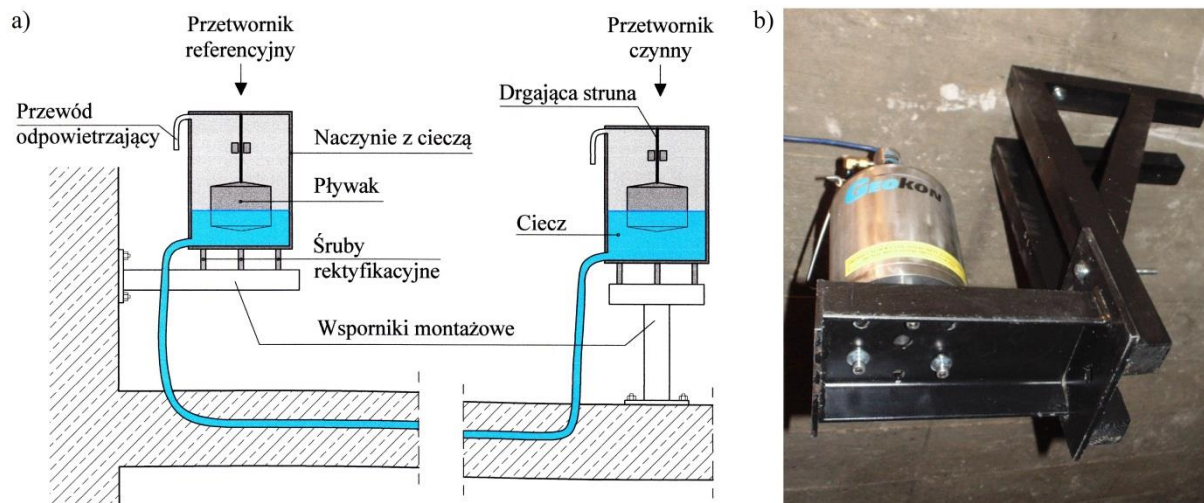
W trakcie próby napełniania monitorowano ugięcie płyty oraz przyrost odkształceń splotów sprężających (a pośrednio naprężeń). Ugięcie płyty monitorowano z wykorzystaniem systemu przetworników wodnych GEOKON 4675LV [9]. Zestaw taki składa się z dwóch naczyń ze stali nierdzewnej wypełnionych cieczą (wodą bądź glikolem) i połączonych węzłem w system naczyń połączonych (rys. 4a). Każde naczynie zaopatrzone jest w pływak wiszący na drgającej strunie. Strunę obejmuje cewka indukcyjna wzbudząco-szczytująca. Jedno z naczyń jest przetwornikiem referencyjnym, montowanym w miejscu o niezmiennym położeniu (podpora), drugi natomiast jest przetwornikiem czynnym, montowanym w miejscu monitorowanego ugięcia. Ugięcie konstrukcji powoduje zmianę wzajemnego położenia obu naczyń a tym samym zmianę poziomu cieczy w naczyniach. Zmiana poziomu cieczy wywołuje, poprzez pływaki, zmianę napięcia strun w naczyniach i zmianę częstości ich drgań. Zmiana częstości drgań strun, poprzez cewki indukcyjne, jest rejestrowana przez urządzenie szczytujące i przetwarzana na zmianę wzajemnego położenia obu naczyń czyli ugięcia stropu. Z uwagi na obecność wszystkich warstw wykończeniowych na dachu obydwie przetworniki zainstalowano pod stropem (rys. 4b).

Na rysunku 5 pokazano rozmieszczenie (5a) oraz widok (5b) tensometrów zainstalowanych na splotach sprężających. W tym celu, w środku rozpiętości stropu, wykonano odkuwkę do splotów i usunięto z nich fragment osłonki. Przyklejono 3 tensometry foliowe o bazie 5 mm, jeden na splocie górnym (Górny) oraz dwa na splocie dolnym (Dolny 1 i Dolny 2).

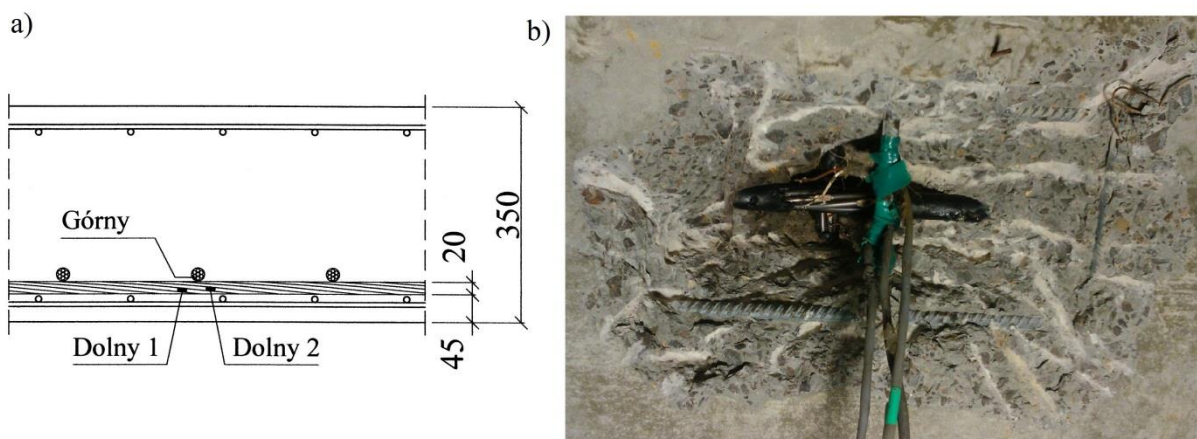
Rejestrację pomiarów uruchomiono wraz ze startem napełniania basenów. Ugięcia szczytywano z częstością co 5 minut natomiast odkształcenia z tensometrów prowadzono w sposób ciągły aż do całkowitego napełnienia basenów.



Rysunek 3: Rozmieszczenie basenów na stropie (a), widok basenów (b)



Rysunek 4: Budowa systemu hydraulicznego do pomiaru ugięć stropu (a), przetwornik czynny zamontowany pod stropem (b)



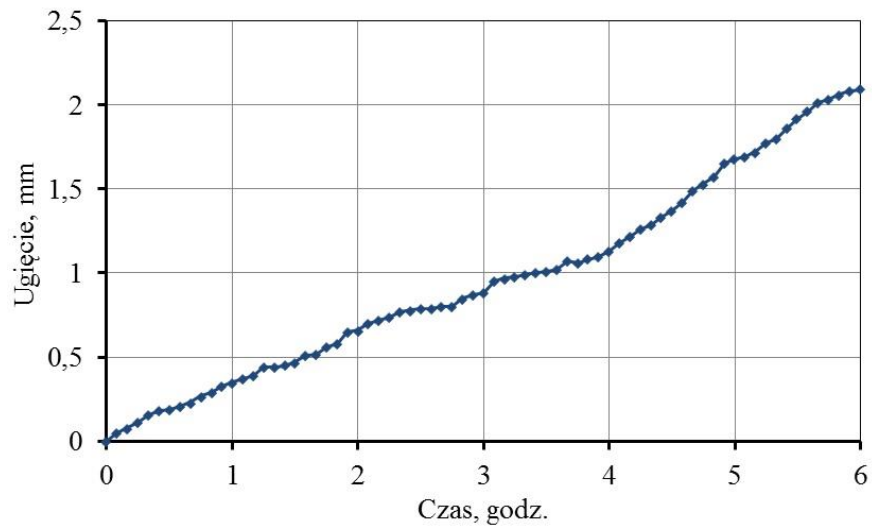
Rysunek 5: Lokalizacja (a) i widok (b) tensometrów na splotach sprężających

#### 4. Omówienie wyników badań

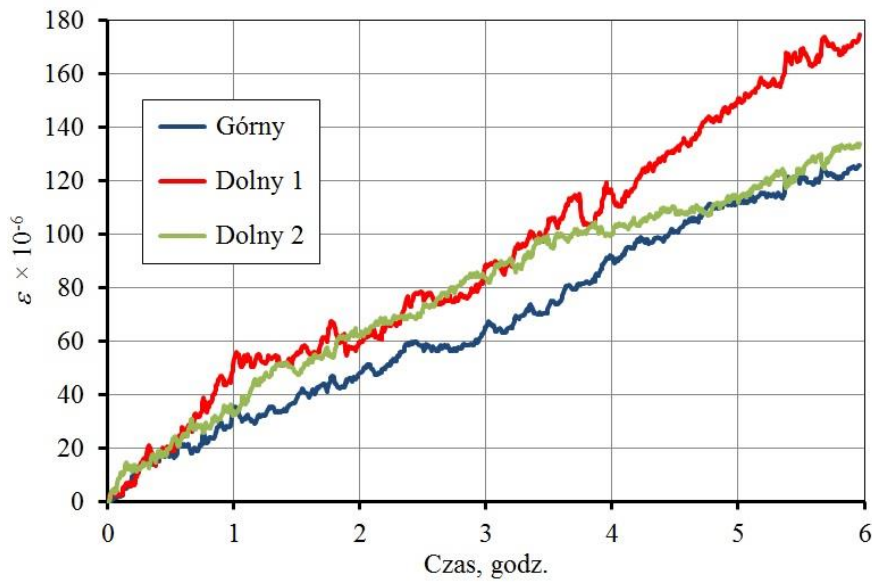
W trakcie 6 godzin napełniania basenów udało się osiągnąć głębokość wody ok. 400 mm, co odpowiada obciążeniu równomiernie rozłożonemu o wartości  $1,27 \text{ kN/m}^2$ . W tym czasie osiągnięto ugięcie płyty równe 2,09 mm (rys. 6) oraz odkształcenie stali sprężającej wynoszące  $126$ ,  $134$  i  $175 \times 10^{-6}$  odpowiednio dla tensometrów „Górny”, „Dolny 2” i „Dolny 1”. Średnia wartość odkształcenia stali sprężającej wyniosła  $145 \times 10^{-6}$ .

W celu weryfikacji uzyskanych wyników zbudowano model obliczeniowy w systemie MES, do którego przyłożono równoważne obciążenie równomiernie rozłożone na obszarze, na którym ustawiono baseny (rys. 8). Na rysunku 9 przedstawiono mapy ugięcia płyty pod wywołanym basenami obciążeniem. Rysunek 9a przedstawia ugięcie otrzymane przy założeniu modułu sprężystości uzyskanego z badań próbek po 28 dniach (33,0 GPa). Wartość ugięcia wyniosła 2,31 mm a więc jest o 10,5% wyższa niż uzyskano z pomiarów. Powszechnie wiadomo, iż wartość modułu sprężystości w konstrukcji jest znacznie niższa niż zbadana na małowymiarowych próbkach i zazwyczaj nie przekracza 80% tej wartości. Przy takim założeniu obliczone ugięcie byłoby jeszcze większe. W kolejnym modelu zwiększono moduł sprężystości betonu, tak aby uzyskać zbliżone ugięcie do wartości obliczonej. Wartość ugięcia pomierzonego (2,09 mm) uzyskano przy założeniu modułu sprężystości 37,8 GPa, czyli o 14,5% większej niż wartość uzyskana z badania próbek.

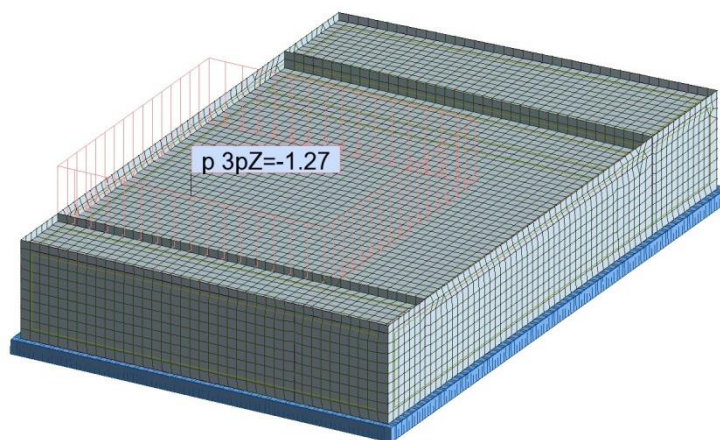
Prezentowane wyniki pokazują, że sztywność badanej płyty kablobetonowej jest znacznie większa niż wynika to ze sztywności przekroju. Nie jest to z pewnością spowodowane udziałem uboższego zbrojenia zwykłego (zbrojenie  $\phi 10 \text{ mm}$  co 150 mm góra i dołem) czy też stali sprężającej



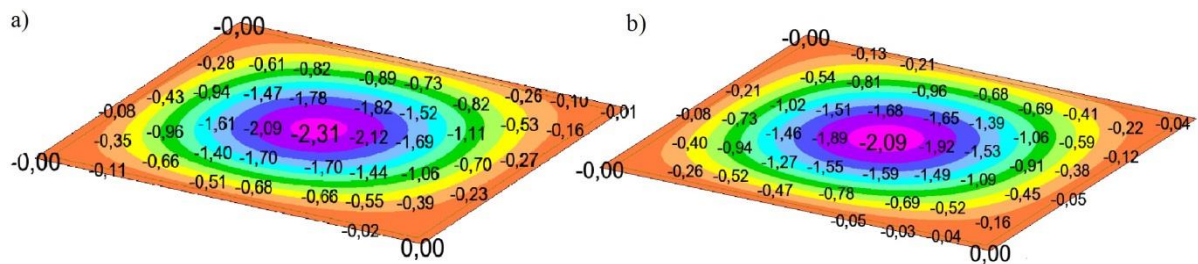
Rysunek 6: Ugięcie stropu w trakcie napelniania basenów



Rysunek 7: Odkształcenie splotów sprężających w trakcie napelniania basenów



Rysunek 8: Model obliczeniowy w systemie MES



Rysunek 9: Ugięcie płyty dla modułu sprężystości uzyskanego z badań (33,0 GPa) (a) oraz dla modułu sprężystości 38,0 GPa (b)

w przekroju (ciągną bez przyczepności). Taką samą wartość ugięć pomierzonych i obliczonych uzyskano zwiększając sztywność stropu o 18%, w stosunku do tej wyznaczonej dla modułu sprężystości zbadanego na próbkach walcowych. Jeśli założyć, że moduł sprężystości betonu w konstrukcji nie przekracza 80% wartości uzyskanej z badań laboratoryjnych próbek, wzrost sztywności płyty wyniósł aż 43%.

Przyczyną należy z pewnością upatrywać w sprężystym działaniu zakrzywionego okładu sprężenia. Wzrost ugięcia płyty wywołuje dodatkową deformację cięgien sprężających oraz wzrost efektu ich działania pionowego na strop wzdłuż długości cięgna. Deformacja ta wywołuje również przyrosty siły w cięgnie. Zakładając, że średni pomierzony w cięgnach przyrost odkształceń wynosi  $175 \times 10^{-6}$  a moduł sprężystości stali dla splotów sprężających to 195 GPa, przyrost naprężeń w stali sprężającej wyniósł 28,2 MPa, a przyrost siły w splotcie 4,2 kN. Zgodnie z równaniem swobodnego zwisu cięgna:

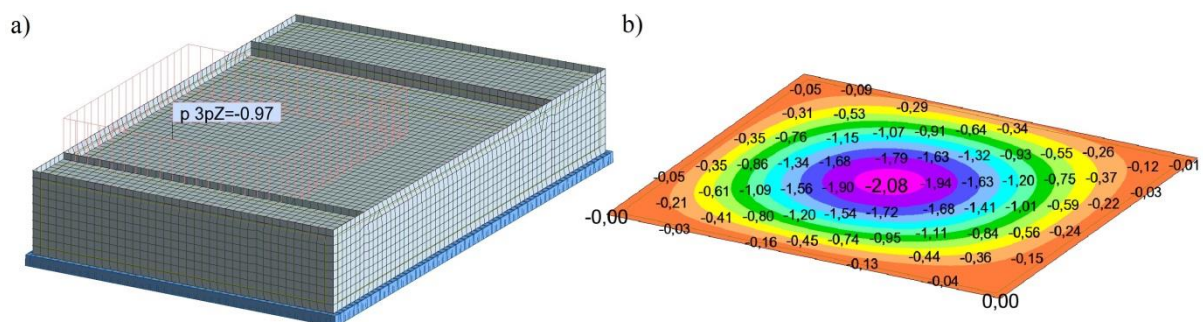
$$w = \frac{8P \cdot \delta}{L^2} \quad (1)$$

przy założeniach, że:

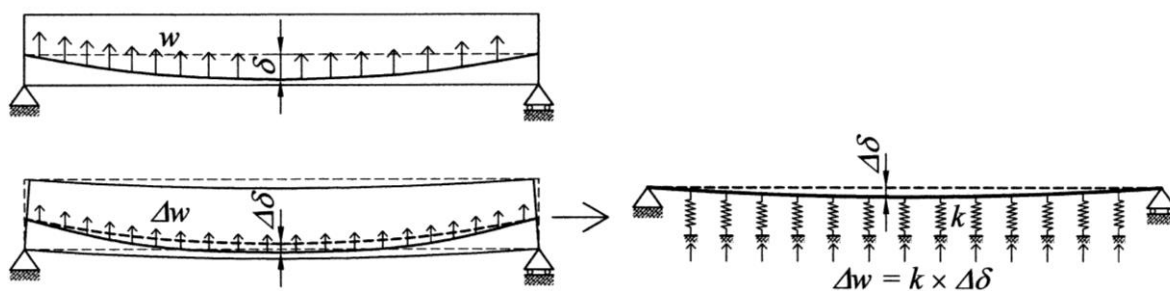
- średnia rozpiętość płyty wynosi 18,63 m,
- średni zwis splotu wynosi 205 mm,
- rzeczywista siła w splotcie wynosi 176 kN (80% wartości początkowej) ( $0,63f_{pk}$ ),

obliczono, że wzrost siły w splotcie o 4,2 kN oraz dodatkowa deformacja splotów o 2,09 mm wywołała wzrost obciążenia radialnego na długości splotu o 0,032 kN/m a przy rozstawie splotów wynoszącym 220 mm w obu kierunkach o 0,295 kN/m<sup>2</sup>. Wzrost obciążenia pionowego na strop, w wyniku jego ugięcia, stanowi 23,2% przyłożonego obciążenia zewnętrznego, a to już koresponduje z podniesieniem sztywności stropu o 18%, potrzebnym do uzyskania ugięć zgodnych z wartościami pomierzonymi.

W kolejnych rozważaniach obliczeniowych zmniejszono przyłożone obciążenie 1,27 kN/m<sup>2</sup> o wartość powstałego obciążenia radialnego 0,30 kN/m<sup>2</sup> (rys. 10a) oraz zmniejszono moduł sprężystości betonu do 80% wartości otrzymanej z próbek walcowych (26,4 GPa). Otrzymano ugięcie niemal identyczne niż pomierzone, tj. 2,08 mm (rys. 10b).



Rysunek 10: Model obliczeniowy z obciążeniem uwzględniającym przyrost działania radialnego w cięgnach (a) oraz ugięcie wyliczone dla modułu sprężystości 26,4 GPa (b)



Rysunek 11: Przyrost obciążenia radialnego w wyniku deformacji elementu i propozycja jego modelowania przy użyciu sprężystych podpór

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów ugięć i przyrostu naprężeń w cięgnach sprężających w wyniku wykonania próbnego obciążenia stropu kablobetonowego o wymiarach w rzucie  $17,65 \times 19,6$  m. Przeprowadzona analiza obliczeniowa pokazała, iż istotnym w szacowaniu ugięć jest uwzględnienie przyrostu obciążenia radialnego od sprężenia wywołanego deformacją stropu oraz wzrostem sił w cięgnach. Efekt ten zazwyczaj nie jest uwzględniany w inżynierskim projektowaniu. Wykazanie jego pozytywnego wpływu może być jednak odpowiedzią, dlaczego udało się skonstruować aż tak duże płyty kablobetonowe, pomimo obowiązywania znacznie ostrzejszych wytycznych dotyczących maksymalnych rozpiętości i smukłości. Rozwiązanie może przynieść modelowanie zmiany tego obciążenia przy pomocy systemu sprężystych podpór (rys. 11). W takim założeniu, intensywność obciążenia jest wprost proporcjonalna do ugięcia płyty co dobrze opisuje działanie sprężenia w trakcie deformacji stropu. Pewien problem może wywołać jednak nierównomierna intensywność działania sprężyn w modelu wywołana zróżnicowanym przesunięciem pionowym punktów płyty. Problem ten można jednak rozwiązać wyznaczając zastępczą podatność podpór. Zagadnienie to będzie z pewnością przedmiotem przyszłych rozważań autora.

## Bibliografia

- [1] PIEKARSKI J., 1994-2004. 10 konstruktywnych lat BBR Polska. *Inżynieria i Budownictwo*, 4/2014, 175–176.
- [2] Concrete Society Technical Report No. 43: Post-tensioned concrete floors. Design Handbook. Cromwell Press, Wiltshire, UK 2005.
- [3] KHAN S., WILLIAMS M., *Post-tensioned Concrete Floors*. Butterworth-Heinemann, Bodmin, UK 1994.
- [4] Fib-Bulletin No. 31: Post-tensioning in building. Lausanne, February 2005.
- [5] SZYDŁOWSKI R., MIESZCZAK M., Gdzie jest granica smukłości sprężonych płyt stropowych? O projekcie i badaniach stropów sprężonych w budynku Centrum Kulturalno-Artystycznego w Kozienicach. Materiały *Konferencji Naukowo-Technicznej Konstrukcje Sprężone KS2015*, Kraków, 16–17 kwietnia 2015.
- [6] SZYDŁOWSKI R., ŁABUZEK B., Post-Tensioned Concrete Long-Span Slabs in Projects of Modern Building Construction. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, 12-16 June 2017, Prague, Czech Republic oraz *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245 (2017) 022065.
- [7] SZYDŁOWSKI R., ŁABUZEK B., Współczesne rozwiązania kablobetonowych konstrukcji sprężonych w *Innowacyjne i współczesne rozwiązania w budownictwie. Konstrukcje żelbetowe*. Tom II, Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Gliwicach, str. 317-388 oraz wykład na *XXXIII Ogólnopolskich Warsztatach Pracy Projektanta Konstrukcji*, szczyrk, 6-9 marca 2018, tom II – wykłady, 317–388.
- [8] SZYDŁOWSKI R., Concrete properties for long-span post-tensioned slabs. *International Symposium on Advanced Material Research ISAMR 2018*, March 15–16 2018, Jeju Island, South Korea.
- [9] SZYDŁOWSKI R., MAŚLAK M., PAZDANOWSKI M: Monitoring of the prestressed concrete slabs with unbonded tendons during erection and in use, *International RILEM*

Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, Conference Segment on Reliability, Safety and Value, 22–24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

## **Load test of long-span post-tensioned slab**

**Abstract:** The paper presents the results of load test of two-way post-tensioned slab with unbounded tendons. The slabs has dimensions of  $17,65 \times 19,6$  m and thickness of 350 mm. This slab is the only such a large post-tensioned slab in the world. It was the reason for carrying out the load test. The obtained results of deflection and prestress steel increase given the knowledge about the slab sensitivity to external load.

**Keywords:** increase of prestressed steel stress, post-tensioned slabs, post-tensioning, slab deflection