

BUILDER
FOR THE
FUTURE

BUILDER
FOR THE
YOUNG
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



Barbara Łabuzek
ORCID – 0000-0001-5007-3986
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska



Opiekun naukowy:
dr inż. Rafał Szydłowski
Instytut Materiałów
i Konstrukcji Budowlanych,
Politechnika Krakowska

POTENCJAŁ BETONU SPRĘŻONEGO

Nietypowe formy architektoniczne wymuszają na konstruktorach poszukiwania nowatorskich i jednocześnie coraz bardziej śmiałych rozwiązań. Przykładem jest zastosowanie cięgien sprężonych bez przyczepności w projekcie Pawilonu Muzycznego w Muszynie.

Kablobeton w budownictwie kubaturowym w Polsce jest rozwiązaniem stosunkowo młodym. Pierwsze kablobetonowe stropy zrealizowano dopiero w obecnym stuleciu, a za przełomowy uznaje się rok 2002, kiedy stworzono pierwsze stropy płytowe sprężone kablami płaskimi [1]. Od tego czasu nieustannie poszukuje się nowszych i doskonalszych form stropów sprężonych w budynkach, w wersji kablobetonowej [2,3], ale także prefabrykowanej [4]. Warto nadmienić, iż podjęto również badania zmierzające do zastosowania do płyt kablobetonowych lekkiego betonu kruszywowego [5].

Konstrukcja Pawilonu Muzycznego w Muszynie

Jednym z przykładów rozwiązań stropów kablobetonowych opracowanym w ostatnim czasie jest konstrukcja Pawilonu Muzycznego realizowana w ramach projektu zagospodarowania terenu Nad Popradem w Muszynie. Opracowane rozwiązania konstrukcyjne, a w szczególności zaprojektowane elementy sprężone – belka i strop – pozwoliły na zrealizowanie przyjętej koncepcji architektonicznej kładącej nacisk na zachowanie jedności konstrukcji z istniejącym otoczeniem.

Jednokondygnacyjny Pawilon Muzyczny zaprojektowano na planie koła o średnicy 19,40 m i całkowitej wysokości 4,40 m. Obiekt posadowiono na płycie żelbetowej, a jego konstrukcję nośną stanowią żelbetowe ściany zewnętrzne oraz wewnętrzne, na których wsparto przykrywający obiekt stropodach. Wizję i oczekiwania względem fi-

nalnego projektu pokazano na wizualizacji zamieszczonej na rysunku 1. Głównym celem i założeniem przyjętym na etapie projektowym jest odzwierciedlenie jedności konstrukcji z otoczeniem. Efekt ten uzyskano poprzez częściowe obsypanie budynku gruntem, a częściowe pozostawienie konstrukcji przeszklonej, ograniczając tym samym możliwość stosowania podpór w części przeszklonej. Przeszklenie zaprojektowane na niemal 1/3 obwodu wymusiło skonstruowanie belki obwodowej o kącie opasania 140 stopni i rozpiętości 16,1 m. Rzut oraz przekrój obiektu wraz z opisem głównych elementów konstrukcyjnych pokazano na rysunku 2.

Stropodach sprężony

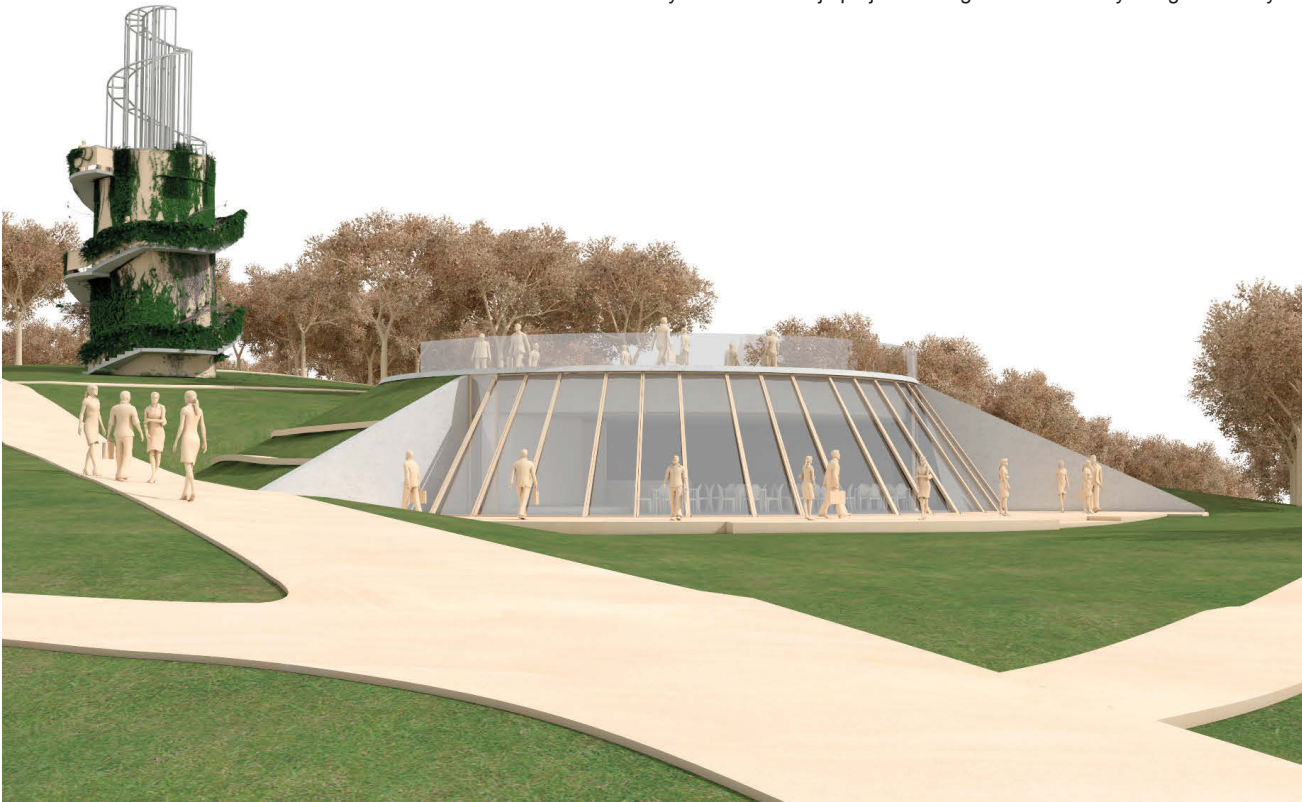
Przewidywane obciążenia w postaci dachu zielonego z dostępem dla użytkowników, projektowany układ podpór oraz wynikające z niego znaczne rozpiętości sięgające do 9,40 m spowodowały, że najlepiej uzasadnionym konstrukcyjnie i jednocześnie ekonomicznie rozwiązaniem było zaprojektowanie stropodachu z betonu sprężonego. W płycie o grubości 250 mm rozplanowano cztery wiązki cięgien bez przyczepności, w których rozmieszczono cięgna w rozstawach 200 i 300 mm. Sumarycznie przyjęto 44 sploty bez przyczepności o maksymalnym zwisie 125 mm, ze stali Y1860. Plan rozmieszczenia oraz szczegół zakotwienia cięgien pokazano na rysunku 3. Geometria stropu oraz układ podpór jako kluczowe czynniki wpłynęły na rozmieszczenie splotów w planie. Na rysunku 3a pokazano, że jedna z czterech wiązek, o rozstawie splotów co 200 mm, przebiega po cięciu konstrukcji i jest zakotwiona w belce krawędziowej oraz w ścianie zewnętrznej. Rysunek 3b pokazuje, że dwie kolejne wiązki o rozstawach splotów 200 i 300 mm podobnie są cięgniemy prostymi w planie, jednak ze względu na niekorzystny wpływ tak dużej liczby splotów w obszarze wydzielonym ścianami wewnętrznymi nie zostały przeciągnięte do ścian zewnętrznych. Stąd jednostronnie są kotwione w belce i ścianie zewnętrznej, natomiast drugi koniec cięgien zakotwiono za żelbetowymi ścianami wewnętrznymi w odległościach 1,0 i 1,5 m. Duże zagęszczenie splotów w okolicy przecięcia osi A i B zde-

KOMENTARZ

prof. dr hab. inż.
Kazimierz Flaga
Politechnika Krakowska

Artykuł dotyczy bardzo ciekawego zastosowania w praktyce cięgien sprężonych bez przyczepności w projekcie i realizacji Pawilonu Muzycznego w Muszynie nad Popradem. Dodatkowo autor wsparł pracę szczegółowymi obliczeniami z wykorzystaniem MES, z podaniem ugięć sprężystych belki krawędziowej i płyty stropu od charakterystycznej kombinacji obciążeń oraz od sprężenia.

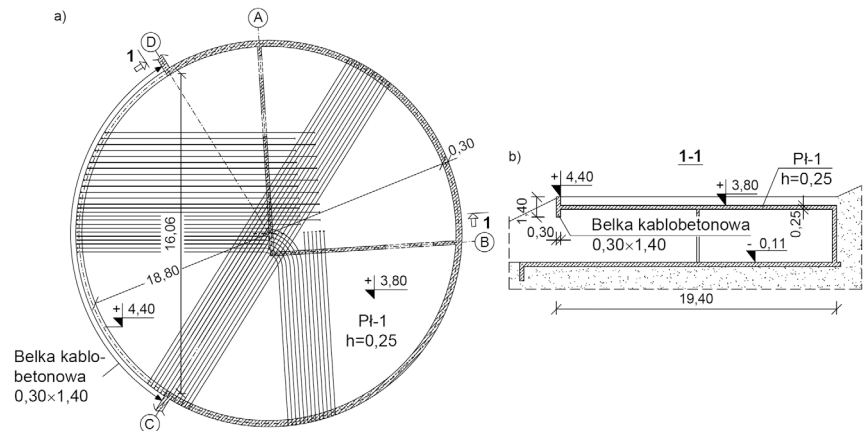
Rys. 1. Wizualizacja projektowanego Pawilonu Muzycznego w Muszynie



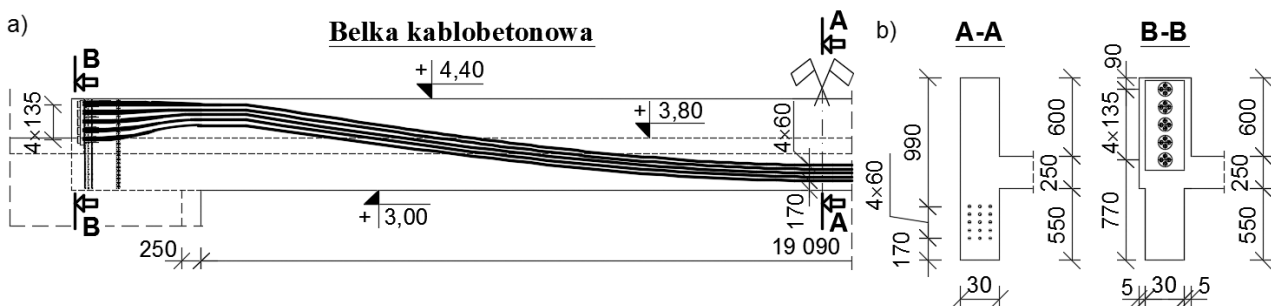
terminowało zastosowanie części cięgien o trasie zakrzywionej w planie. Jak pokazuje opracowany i zrealizowany w latach 2012–2013 projekt Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego w Krakowie [3], stosowanie zakrzywionych w planie cięgien bez przyczepności nie powoduje nadmiernych spadków siły sprężającej, co pozwala z powodzeniem aplikować przyjęte rozwiązania.

Belka sprężona

Belkę krawędziową o rozpiętości 19,09 m (rys. 2 i 3.) zaprojektowano o przekroju 0,30 x 1,40 m. Jednak, ze względu na rozwiązanie strefy zakotwienia przyjęte przez wykonawcę, konieczne okazało się poszerzenie jej końców. Ostatecznie przekrój w strefach zakotwień zwiększono o 100 mm, tworząc strefę przejściową długości 1,0 m. Na



Rys. 2. Rzut (a) i przekrój (b) przez budynek Pawilonu Muzycznego



Rys. 3. Przekrój podłużny (a) oraz przekroje poprzeczne (b) obwodowej belki kablobetonowej

podstawie przeprowadzonej analizy obliczeniowej do sprężenia belki zastosowano 15 splotów bez przyczepności $7\phi 5$ mm ze stali Y1860 i założonym maksymalnym zwisie 730 mm. Ponadto zastosowano minimalne zbrojenie zwykle dołem i górą w postaci 4 prętów $\phi 16$ mm. Ze względu na skręcanie belki wywołane jednostronnym obciążeniem płytą oraz sprężeniem przyjęto zbrojenie podłużne przy powierzchniach bocznych belki w postaci prętów $\phi 16$ mm co 180 mm oraz strzemiona z pręta $\phi 10$ mm w rozstawie 150 mm. Poszerzoną strefę zakotwienia, trasę splotów oraz zbrojenie belki pokazano na rysunku 4.

Analiza obliczeniowa

Model fizyczny konstrukcji zbudowano, wykorzystując elementy prętowe oraz powłokowe o parametrach geometrycznych i materiałowych zgodnych z przyjętymi w projekcie. W modelu przyjęto dodatkowe obciążenie stałe warstwami stropodachu zielonego o wartości $2,60 \text{ kN/m}^2$, obciążenie użytkowe $2,00 \text{ kN/m}^2$, obciążenie śniegiem $1,70 \text{ kN/m}^2$ oraz obciążenia zastępcze wywołane przyłożonym sprężeniem do belki (obciążenie pionowe oraz poziome radialne) i płyty (obciążenia pionowe, poziome oraz momenty na krawędziach) z uwzględnieniem strat doraźnych na poziomie 6% dla belki i 10% dla płyty oraz opóźnionych na poziomie 10%.

W wyniku przyłożonych obciążeń stałych uzyskano ugięcie sprężyste belki równe $-52,2$ mm, natomiast wygięcie od sprężenia (z uwzględnieniem wszystkich strat sprężających) $+63,5$ mm. Ostatecznie, po uwzględnieniu wszystkich obciążeń, w tym 50% obciążeń zmiennych (śnieg i użytkowe), otrzymano wygięcie sprężyste belki równe $+0,7$ mm, natomiast ugięcie płyty równe $-6,4$ mm.

Na rysunku 4. zamieszczono wykresy wybranych wartości sił wewnętrznych w belce. Rysunek 4a pokazuje wykres momentów zginających od obciążeń stałych. Łatwo zauważyć, że uzyskana wartość momentu

równa $1118,3 \text{ kNm}$ jest dominująca i stanowi niemal 3-krotność momentu zginającego od obciążeń użytkowych i śniegu ($375,7 \text{ kNm}$, rys. 7b), a co za tym idzie – w znacznym stopniu determinuje ugięcia końcowe, stąd pojawił się pomysł na zastosowanie w konstrukcjach kablobetonowych lekkiego betonu kruszywowego [8]. Na rysunkach 4c i 4d pokazano wartości momentów zginających (rys. 4c) oraz podłużnych sił ściskających (rys. 4d) wywołanych sprężeniem przyłożonym do belki ($963,0 \text{ kNm}$) oraz podłużnych sił ściskających od wszystkich splotów przyłożonych do belki i płyty. Wartości wynoszą odpowiednio $963,0 \text{ kNm}$ i $832,2 \text{ kN}$. Interesującym wnioskiem wynikającym z wykresu 4d jest to, że większość siły sprężającej została przejęta przez płytę, nie przez belkę. Świadczy o tym fakt, że wprowadzając w belkę siłę o wartości 2772 kN (15 splotów, naciąg 220 kN , straty całkowite 16%), uzyskano w odpowiedzi w belce siłę podłużną tylko $832,2 \text{ kN}$.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono przypadek ciekawego wykorzystania kablobetonu z cięgnami bez przyczepności w konstrukcji budynku na planie koła. Nieregularny układ płyty wynikający z kolistego kształtu budynku oraz układu podpór wewnętrznych wymusił zaprojektowanie skomplikowanego układu sprężenia o niestandardowym rozplanowaniu cięgien. Pozwoliło na to użycie lekkich cięgien bez przyczepności o małych promieniach zakrzywienia i niewielkich średnicach, które w powodzeniem można stosować dla cięgien o zakrzywionej w planie trasie, jak pokazały doświadczenia z poprzednich realizacji. Szczegółowe podejście do problemu na etapie projektowania pozwoliło uniknąć kolizji cięgien, jednak należy pamiętać, że nie wszystkie problemy można rozwiązać na etapie projektowania, co widać na przykładzie rozwiązania strefy zakotwienia w belce sprężonej, dlatego powstałe wątpliwości zostały rozwiązane w trakcie przygotowania do budowy. ■

Bibliografia

- [1] Piekarski J. 1994-2004. 10 konstruktywnych lat, BBR Polska, „Inżynieria i Budownictwo”, s. 175–176, 4/2014.
- [2] Szydłowski R., Łabuzek B., Post-Tensioned Concrete Long-Span Slabs in Projects of Modern Building Construction, „IOP Conference Series: Material Science and Engineering”, 245 (2017) 022065.
- [3] Szydłowski R., Łabuzek B., Współczesne rozwiązania kablobetonowych konstrukcji sprężonych, wykład na XXXIII Ogólnopolskich Warsztatach Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 6–9 marca 2018, tom II – wykład, s. 317–388.
- [4] Derkowski W., Skalski P., New Concept of Slimfloor with Prestressed Composite Beams, „Procedia Engineering, Elsevier”, Vol. 193 (2017), s. 176–183.
- [5] Szydłowski R., Mieszczak M., Study of application of lightweight aggregate concrete to construct post-tensioned long-span slabs, 12th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, 26–27 May 2016, „Vilnius, Lithuania and Procedia Engineering, Elsevier”, Vol. 172 (2017), s. 1077–1085.

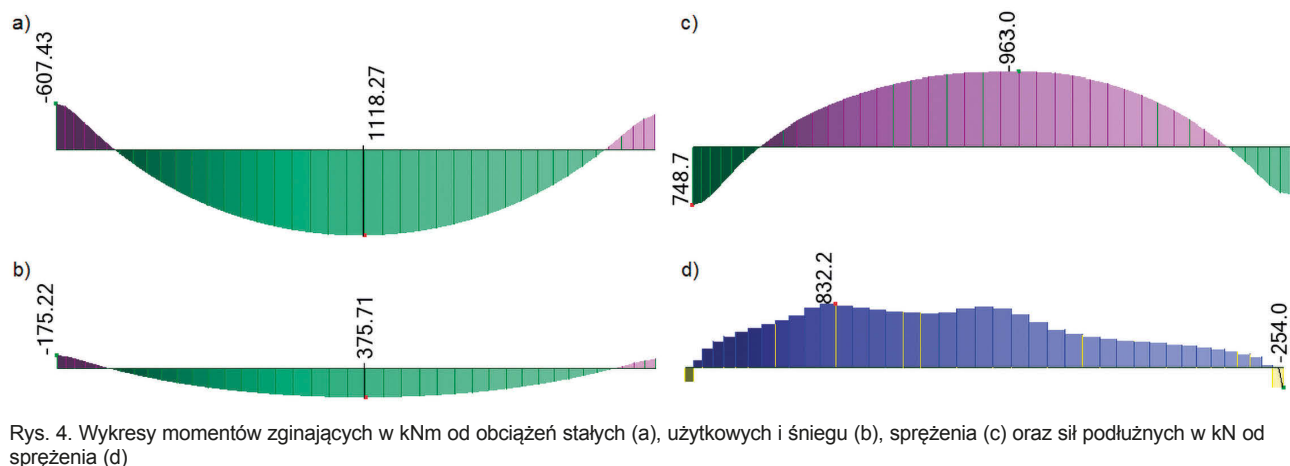
Streszczenie: W artykule przedstawiono przypadek ciekawego wykorzystania kablobetonu z cięgnami bez przyczepności w konstrukcji Pawilonu Muzycznego w Muszynie. Opracowane rozwiązania konstrukcyjne, a w szczególności zaprojektowane elementy sprężone – belka i strop – pozwoliły na realizowanie przyjętej koncepcji architektonicznej kładącej nacisk na zachowanie jakości konstrukcji z istniejącym otoczeniem.

Słowa kluczowe: cięgna bez przyczepności, belka sprężona, płyta sprężona

Abstract: THE USAGE OF PRESTRESSED CONCRETE IN THE PROJECT OF THE MUSIC PAVILION IN MUSZYNA

The work presents a description of the proposed solutions, assumptions along with the results of static and strength analysis and relevant applications. The design of The Music Pavilion in Muszyna is an example of the innovative application of construction elements made in the cable-concrete technology.

Key words: post-tensioned beam, post-tensioned slab, unbonded tendon



Rys. 4. Wykresy momentów zginających w kNm od obciążeń stałych (a), użytkowych i śniegu (b), sprężenia (c) oraz sił podłużnych w kN od sprężenia (d)