

# Wybitne konstrukcje betonowe ostatnich 4 lat – przykłady najnowszych kierunków rozwoju

*Niezwykła forma, nietypowe wzornictwo, innowacyjne wykorzystanie materiałów, specjalna technologia wznoszenia, doskonała integracja ze środowiskiem, udane wykorzystanie odkrytego betonu, lekkość i elegancja, wysokiej jakości wykończenie powierzchni, staranna analiza różnych obciążeń i skutków dla środowiska oraz spełnienie wysokich wymagań zrównoważonego rozwoju to cechy budowli betonowych zgłoszonych na konkurs konstrukcji zrealizowanych w ostatnich 4 latach (fib Awards for Outstanding Concrete Structures), który rozstrzygnięto podczas majowego fib Symposium 2019 w Krakowie.*

Budownictwo jest obszarem działalności inżynierskiej i naukowej cały czas prężnie rozwijającym się na świecie. Nieustająco dąży się do przyspieszenia procesu budowlanego, poprawy jakości obiektów, optymalnego wykorzystania właściwości poszczególnych materiałów, a także coraz lepszego wpisania się obiektów budowlanych w otoczenie. W inżynierii lądowej, podobnie jak w innych obszarach gospodarki, trwa wyścig we wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań, zarówno materiałowych, jak i technologicznych, a także w coraz skuteczniejszym spełnianiu coraz wyższych wymagań zrównoważonego rozwoju. Wysokie standardy związane z szeroko rozumianą ochroną środowiska stają się coraz bardziej istotne. Niektóre państwa już wprowadziły przepisy w zakresie utylizacji i recyklingu odpadów (w tym odpadów budowlanych) czy zanieczyszczenia gruntu substancjami chemicznymi. Zużycie energii w skali całego budownictwa zaczyna odgrywać duże znaczenie również z punktu widzenia ograniczeń emisji dwutlenku węgla. Stąd, pojawiać się zapewne będą coraz bardziej surowe ograniczenia nałożone na procesy budowlane, na przykład w odniesieniu do emisyjności materiałów, ograniczania zużycia surowców naturalnych, wyrzucania odpadów, emisji hałasu itp. Przykładów dobrych praktyk we wznoszeniu niestandardowych budowli na świecie nie brakuje. Pośród budynków i konstrukcji inżynierskich, tworzonych przede wszystkim z betonu, co roku powstają obiekty wyjątkowe i zachwycające. Dlatego fib – Międzynarodowa Federacja Betonu Konstruktynego – regularnie ogłasza konkurs na wybitne konstrukcje zrealizowane w ostatnich 4 latach (fib Awards for Outstanding Concrete Structures). Podczas ostatniej edycji konkursu,

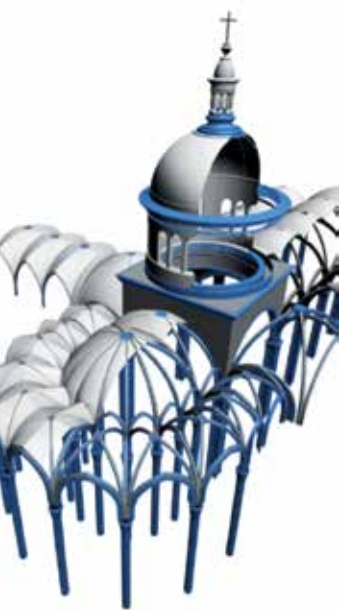
rozstrzygniętej w październiku ubiegłego roku, wybrano po trzy unikalne zdaniem jury obiekty w dwóch kategoriach: budynki oraz obiekty inżynierskie.

## Najlepsze budynki betonowe

Wszystkie zgłoszone w 2018 r. budynki wykazywały się co najmniej jedną z następujących cech szczególnych: niezwykła forma, nietypowe wzornictwo, innowacyjne wykorzystanie materiałów, specjalna technologia wznoszenia, doskonała integracja ze środowiskiem, udane wykorzystanie odkrytego betonu, lekkość i elegancja, wysokiej jakości wykończenie powierzchni, staranna analiza różnych obciążeń i skutków dla środowiska oraz spełnienie wysokich wymagań zrównoważonego rozwoju. Spośród wszystkich zgłoszonych prac komisja konkursowa pod przewodnictwem profesora Harald S. Müllera, poprzedniego prezydenta fib, wyznaczyła dwóch zwycięzców nagrody głównej oraz jedno wyróżnienie.

## Nagroda główna – rekonstrukcja dachu wraz z kopułą główną w Katedrze w San Cristóbal de La Laguna, Teneryfa, Hiszpania

Historyczne centrum miejscowości San Cristóbal de La Laguna na Wyspach Kanaryjskich stanowi jeden z najbardziej znaczących przykładów hiszpańskiego stylu kolonialnego w budownictwie. Zachowało ono swój układ urbanistyczny z końca XVI wieku i dlatego w 1999 r. zostało wpisane na listę światowego dziedzictwa UNESCO. Dawny kościół Nuestra Señora de Los Remedios, zbudowany w 1515 roku, uzyskał status katedry w 1818 r. Już 80 lat później, w wyniku rozległych zniszczeń wywołanych przez nierównomierne osiadanie podłoża budynek znalazł się w tak złym stanie technicznym, że zdecydowano o jego rozbiórce, pozostawiając jedynie neogotycką fasadę. Obecny budynek został wybudowany w stylu neogotyckim, z kopułą główną i bocznymi sklepieniami krzyżowymi, według projektu José Rodriga de Vallabrigi. W trakcie przebudowy w latach 1905-1913 pozostawiono główną fasadę niezmienną i – aby przyspieszyć tempo oraz obniżyć koszty budowy nowej katedry – wykorzystano wówczas nowatorską technologię częściowo zbrojonego betonu. Niespełna 100 lat po odbudowie, z powodu licznych zaobserwowanych uszkodzeń, w tym rozległej korozji stali i betonu, konieczne stało się wyłączenie katedry z użytkowania i tymczasowe podparcie kopuły głównej.



Wymaganiem podstawowym dla rekonstrukcji całości dachu było zachowanie geometrii obiektu ustalonej w 1913 r. oraz dopasowanie nowej konstrukcji do istniejących ornamentów na pozostających elementach konstrukcji, głównie kolumnach. Zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne obejmowało zbudowanie nowych sklepień krzyżowych i kopuły oraz krótkich słupów pomiędzy ustalonym poziomem rozbiórki a szczytem dawnych kolumn, które podtrzymywały łukowe żebra i powłoki kopuły. Zdecydowano o wykonaniu betonowych, monolitycznych sklepień i kopuły, przy czym na całości konstrukcji dachu nie zostały wykonane żadne dylatacje.

W świetle ograniczonej trwałości poprzedniego dachu zdecydowano o niestosowaniu zbrojenia stalowego. Bardzo cienkie powłoki (o grubości 80 mm) zostały zbudowane z betonu samozagęszczającego się, wzmocnionego włóknami polipropylenowymi. Z tego samego powodu krótkie słupy oraz łuki zostały zbrojone prętami z włókien szklanych (GFRP). We wszystkich masywniejszych przekrojach (np. w strefie połączeń kopuły z sąsiednimi sklepieniami), między kompozytowymi wkładkami zbrojeniowymi, zastosowano polistyrenowe wkłady odciążające.

Ponieważ nowa konstrukcja dachu wykonana miała być z elementów cienkościennych o złożonej geometrii, szczególną uwagę poświęcono doborowi mieszanki betonowej, która musi spełniać wymagania zarówno technologiczne (np. w zakresie zagęszczania), jak i trwałościowe. Opracowanie optymalnego projektu materiału PFR-SCC, w którym dodawanie włókien obniża zdolność do samozagęszczania się betonu, połączone było z szerokim programem badań różnych mieszanek określających ich wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, moduł sprężystości oraz przepuszczalność wody. Dodatkowo, w celu weryfikacji bezpieczeństwa użytkowania tak nietypowej konstrukcji, zbudowano i przetestowano pełnowymiarowy prototyp głównej kopuły dachu.

**Nagroda główna – mikro-dom wykonany w 100% z betonu recyklingowego, Tokio, Japonia**

Projektanci niewielkiego domu jednorodzinnego w Tokio otrzymali następujące zlecenie: „Chcemy widzieć odśnieżone powierzchnie betonowe wewnątrz i na zewnątrz budynku. Chcemy wyróżniającej się architektury, która jest jednocześnie przyjazna dla środowiska”. Te słowa stały się punktem wyjścia, a interdyscyplinarny zespół projektowy powstał w celu opracowania nowego przyjaznego dla środowiska betonu. Zmniejszanie się złóż naturalnego kruszywa od dawna stanowi poważny problem w Japonii. Piasek rzeczny jest coraz mniej dostępny i pojawiły się próby zastępowania go przez żwir zbierany z dna oceanu. Jednak większość samorządów lokalnych zakazała stosowania żwiru morskiego ze względów środowiskowych. Wyjściem jest więc stosowanie kruszywa z recyklingu betonu; wymaga to jednak dużej ilości energii do produkcji, co powoduje zwiększoną emisję CO<sub>2</sub>.

Autorzy zwrócili jednak uwagę na fakt, iż starożytny rzymski beton znany jest ze swojej długowieczności – rzymskie konstrukcje betonowe przetrwały prawie dwa tysiące lat, podczas gdy współczesne betony nie spełniają wymagań często już po kilkudziesięciu latach. Badania wykazały, że trwałość rzymskiego betonu wynika z zastosowania pyłu wulkanicznego.



Mikro-dom w Tokio, Japonia



W Japonii wiele wulkanów było i jest nadal aktywnych. Piroklastyczny przepływ lawy wulkanicznej sprzed tysięcy lat wytworzył w okolicy Kagoshimy złoża skały SHIRASU. Tak więc opracowano beton SHIRASU, w którym kruszywo drobne pochodzi ze wspomnianych złóż wulkanicznych. Beton ten nie tylko przyczynia się do ograniczenia wydobycia złóż piasku, ale także cechuje się bardzo gładką i wodoszczelną powierzchnią.

Innym problemem, z którym przyszło się zmierzyć twórcom mikro-domu, była bardzo ograniczona przestrzeń. W tak gęsto zaludnionych miastach jak Tokio trudno jest o luksus dużych, otwartych obszarów, nie mówiąc już o wizualnym lub fizycznym połączeniu z naturą. Architekci uznali, że jedynym kierunkiem, w stronę którego można się zwrócić, jest niebo. W nagrodzonym projekcie osiągnięto to poprzez „ścięcie” narożnika prostopadłościennej przestrzeni domu pod dużym kątem. Duże otwory okienne skierowane w stronę nieba stały się skutecznym sposobem włączenia otwartej przestrzeni do zwartej wnętrza.

**Wyróżnienie – „Manta” – konstrukcja powłokowa wykonana technologią pneumatycznego formowania stwardniałego betonu, Bleiburg, Karyntia, Austria**

Betonowe powłoki cienkościenne mogą być estetycznymi i ekonomicznymi konstrukcjami wsporczymi o dużej nośności. Niestety trudność ich realizacji, w tym przede

„Manta” – Bleiburg, Karyntia, Austria





„Manta” – Bleiburg,  
Karyntia, Austria

wszystkim konieczność stawiania skomplikowanych szalunków, powoduje na tyle wysokie koszty, że nie znajdują one szerszego zastosowania w praktyce.

Zespół z Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu opracował nową metodę wznoszenia betonowych powłok cienkościennych – pneumatyczne formowanie stwardniałego betonu (PFHC). Technologia ta zakłada unoszenie cienkiej płyty betonowej i odkształcanie jej w dwukierunkowo zakrzywioną powłokę. Stwardniałą płytę z betonu zbrojonego podnosi się poprzez pompowanie umieszczonej pod nią poduszki powietrznej i jednocześnie naciąganie cięgien sprężających zabetonowanych na obwodzie elementu.

Pierwsze praktyczne zastosowanie tej metody stanowi realizacja dwóch betonowych powłok „muszli” dla Kolei Austriackich – cienkościennego zadania dla imprez na świeżym powietrzu, a także mostu służącego jako przejście dla zwierząt nad dwoma torami kolejowymi.

Zadanie wykonano z płyty o grubości 50 mm i wymiarach rzutu poziomego 28,3 x 21,4 m, która po podniesieniu została przekształcona w podwójnie zakrzywioną konstrukcję powłokową o wymiarach 26,5 x 19,1 m i wysokości 4,2 m.

Obiekt mostowy o wymiarach 36,2 x 38,7 m i wysokości 8,1 m, ukończony wiosną 2018 roku, udowodnił, że nowa metoda budowy takich powłok może być z powodzeniem stosowana w przypadku konstrukcji o dużych wymiarach.

#### Najlepsze betonowe obiekty inżynierskie

Zgłoszone do konkursu kilkanaście obiektów inżynierii lądowej stanowi zróżnicowaną grupę

konstrukcji, obejmującą różnego rodzaju obiekty mostowe, ale także obiekty zabezpieczenia przeciwlawinowego, punkty widokowe i konstrukcje osłonowe kolei w centrum miasta.

Autorzy wykazali się bardzo starannym doborem układów konstrukcyjnych i technologii realizacji, zastosowania innowacyjnych materiałów, integracji konstrukcji z otoczeniem, elegancji, oryginalności i piękna w formie i wyglądzie, wysokiej jakości wykończenia powierzchni, rozsądnego wykorzystania zasobów naturalnych, a także efektywności ekonomicznej i maksymalnego skrócenia czasu prac budowlanych. Niektóre z tych obiektów pobity rekordy dotychczasowych konstrukcji betonowych. Jury postanowiło, że jedna konstrukcja uzyskała nagrodę główną, a dwie kolejne zostały wyróżnione.

#### Nagroda główna – most Takubogawa – 10-przęstowy most autostradowy, Japonia

Most Takubogawa na wschodnim wybrzeżu wyspy Kiusiu w Japonii jest 10-przęstowym ciągłym mostem z dźwigarem o przekroju skrzynkowym o ażurowych środnikach „motylkowych”, którego najdłuższa rozpiętość przęsa wynosi 87,5 m. Jest to pierwsze na świecie zastosowanie tego typu środników mostowego przekroju skrzynkowego.

W zastosowanym przekroju poprzecznym motylkowe panele środników przenoszą jedynie siły ścinające, natomiast siły podłużne przenoszone są jedynie przez pasy: górny i dolny, wykonane z betonu ze zbrojeniem rozproszonym. Duże siły ściskające przenoszone są przez beton, natomiast strefa rozciągana wspomagana jest przez kable sprężające. Prefabrykowane panele motylkowe montowane są niezależnie od siebie – są one łączone z pasami za pomocą sztywnych trzpieni, bez konieczności łączenia sąsiednich paneli, co ułatwia szybką konstrukcję obiektu.

Mieszankę betonową na potrzeby tego projektu opracowano przy założeniu wykorzystania lokalnie dostępnych materiałów i chęci uzyskania stosunkowo wysokiej wytrzymałości na ściskanie. Panele motylkowe, o grubości 150 mm, wykonano z betonu o wytrzymałości charakterystycznej 80 MPa z włóknami stalowymi o średnicy 0,2 mm i długości 22 mm.

Projekt ten cechowała duża prędkość wznoszenia konstrukcji – możliwe było przyspieszenie prac o około 50% w porównaniu z tradycyjnie wykonywanymi żelbetowymi, monolitycznymi dźwigarami skrzynkowymi. Ważne również było zmniejszenie masy konstrukcji przy zachowaniu dużej jej sztywności, z uwagi na konieczność projektowania na obciążenia sejsmiczne. Samo zastosowanie środników motylkowych pozwoliło na zmniejszenie masy konstrukcji o 10%, umożliwiając jednocześnie zmniejszenie wymiarów przekroju konstrukcji nośnej. Ostatecznie, zaprojektowana konstrukcja mostu pozwoliła na zmniejszenie kosztów budowy, a także ograniczyła niekorzystny wpływ budowy na środowisko w porównaniu z tradycyjnie wykonywa-

Most Takubogawa, Japonia





nymi mostami o tej rozpiętości – jest to szczególnie ważne w czasach wzrastającej troski o zrównoważony rozwój gospodarki.

#### **Wyróżnienie – punkt widokowy Utsikten, Gaularfjell, Norwegia**

Krajowe trasy turystyczne w Norwegii to drogi prowadzące przez najpiękniejsze krajobrazy, najczęściej wzdłuż niesamowitych fiordów. Wzdłuż tych tras zbudowano miejsca piknikowe, przy czym ich założeniem projektowym było dostosowanie architektury do niepowtarzalnej scenarii, z jednoczesnym zapewnieniem wszystkich funkcji użytkowych.

Prezentowana betonowa konstrukcja platformy widokowej Utsikten znajduje się na trasie Narodowego Szlaku Turystycznego Gaularfjellet. Jest to duża, trójkątna betonowa platforma o grubości 800 mm i wymiarach boku sięgających 49 metrów, z dwoma narożnikami silnie podniesionymi do góry, a trzecim wspornikowo wysuniętym nad głęboką doliną. Każdy narożnik ma inną funkcję – wspornik jest platformą widokową, a te zadarte do góry tworzą stromy amfiteatr na specjalne imprezy kulturalne oraz zaplecze socjalne.

Stromy teren okazał się szczególnym wyzwaniem dla projektantów i wykonawców konstrukcji – szczególnie trudne w realizacji były szalunki oraz prawidłowe wykonanie i powiązanie bardzo dużej ilości prętów zbrojeniowych.

#### **Wyróżnienie – most nad rzeką Almonte, Cáceres, Hiszpania**

Szybka linia kolejowa między Madrytem a Estremadurą przecina rzekę Almonte nad zalewem Alcantara, stąd konieczna była budowa obiektu mostowego o długości 996 m.

Konstrukcję nośną głównego przęsła mostu stanowi łuk o rozpiętości 384 m. Sprawia to, że jest to największy zbudowany do tej pory most łukowy dla kolei dużych prędkości. Przyjęto realizację łuku metodą wspornikową, z zastosowaniem tymczaso-



Punkt widokowy Utsikten, Gaularfjell, Norwegia

wych kabli podwieszających konstrukcję do dwóch tymczasowych wież stalowych.

Konstrukcja pomostu jest ciągłą, 23-przęsłową skrzynką z betonu sprężonego, wykonywanego na miejscu budowy, o całkowitej szerokości 14,0 m. Dla ograniczenia kosztów budowę pomostu zaplanowano w kolejno następujących po sobie etapach, wykorzystując system rusztowań przesuwnych.

Obiekt został zbudowany z betonu samozagęszczającego się, o wytrzymałości charakterystycznej 80 MPa. Projekt mieszanki betonowej uwzględnić musiał wysoką temperaturę otoczenia w trakcie realizacji.

Całkowity czas budowy mostu wynosił 5,5 roku.

#### **Podsumowanie**

Opisane przykłady wybitnych obiektów realizowanych przede wszystkim z betonu, pokazują nie tylko możliwości tworzenia ładnych i ciekawych budowli, ale dają obraz najnowszych kierunków rozwoju tego typu konstrukcji. Bez wątpienia innowacje w tym obszarze skupiają się obecnie na stosowaniu coraz to lepszych i trwalszych materiałów budowlanych, spełnianiu wymogów budownictwa zrównoważonego, optymalizacji dobranych schematów statycznych i przekrojów poprzecznych elementów konstrukcyjnych, ale także na zaspokajaniu potrzeb inwestorów w zakresie zwiększonego bezpieczeństwa, estetyki i odpowiedniego wpisania się obiektu w otoczenie. Ten kierunek tworzenia nowych rozwiązań w inżynierii lądowej z pewnością może być rozwijany również na naszym rynku krajowym.

**dr hab. inż. Wit Derkowski, prof. PK  
Politechnika Krakowska**

Most nad rzeką Almonte, Cáceres, Hiszpania

