

# Zastosowanie technologii betonu lekkiego przy realizacji budowy mostu drogowego w Toruniu

*W artykule przedstawiono wybrane aspekty zastosowania betonu lekkiego przy realizacji mostu drogowego w Toruniu wraz z drogami dojazdowymi. Relacja wymaganych przez projektanta właściwości fizycznych i mechanicznych omawianego kompozytu wymusiła opracowanie precyzyjnego składu betonu oraz dotrzymanie reżimu powtarzalnej produkcji, transportu i operacji towarzyszących w budowaniu mieszanki betonowej. Pod wieloma względami technologia ta okazała się znacznie bardziej skomplikowana i wymagająca od technologii konstrukcyjnego betonu mostowego, w tym betonu o wytrzymałości gwarantowanej 60 MPa.*

## Wstęp

Dokonując przeglądu zastosowań betonu lekkiego w polskim mostownictwie, można dojść do wniosku, że realizacja kap chodnikowych mostu drogowego w Toruniu jest jedną z rekordowych pod względem objętości wbudowanego kompozytu. Fakt ten stanowi jednak wątpliwą satysfakcję dla autorów niniejszego artykułu. Uczestnictwo nie było bowiem dowodem wybitnych umiejętności, czy jedynych w swoim rodzaju rozwiązań materiałowych, a zaledwie rzadką okazją sprawdzenia warsztatu technologa. Sytuację dobrze opisuje tytuł referatu Siwowskiego z 2005 r. [7]. Chronologicznie pierwsze zastosowanie tej technologii w obiektach mostowych w Polsce miało miejsce 16 lat temu na Podkarpaciu, przy modernizacji wiaduktu Śląskiego w Rzeszowie. Aktualizując krajowe doświadczenia w użyciu betonu z kruszywem lekkim, nadal musielibyśmy użyć określenia „beton niekonwencjonalny”.

W światowej praktyce beton lekki (LWAC, *light-weight aggregate concrete*) okazał się materiałem bardzo atrakcyjnym zarówno dla inwestorów jak i projektantów. Wynika to z relatywnie niskiej gęstości w stosunku do możliwych do uzyskania właściwości mechanicznych i trwałości kompozytu. Niemal intuicyjnym skojarzeniem jest redukcja kosztów szalunków i rusztowań, niezbędnej ilości zbrojenia czy nakładów na posadowienie i zakotwienie konstrukcji. Przykładem może być realizacja mostu Grenlandzkiego (*Grenlandsbrua*), łączącego brzegi fiordu Frier w – znanym polskim kibicom narciarstwa – hrabstwie Telemark w Norwegii. Zastosowanie w przęśle betonu lekkiego zamiast betonu o normalnej gęstości (zwy-

kiego) pozwoliło uzyskać oszczędność na poziomie 1,08% w skali całego kontraktu, którego koszt wyniósł prawie 100 milionów koron norweskich (1994) [6].

W przypadku betonu zwykłego gęstość jest praktycznie stałą materiałową, dla celów projektowania przyjmowaną jako wartość 24 lub 25 kN/m<sup>3</sup>. Dla lekkiego betonu konstrukcyjnego właściwość ta staje się już jedną ze zmiennych. Stąd efektywne wykorzystanie materiału sprowadza się najczęściej do redukcji gęstości przy założonej wytrzymałości. Wyzwanie pojawia się wówczas, gdy te dwie (zależne) cechy zostaną powołane w trudnej do pogodzenia relacji. I nie chodzi tu o rozwiązanie laboratoryjne, lecz odtwarzalne i powtarzalne w warunkach standardowej produkcji. Taki przypadek miał miejsce podczas realizacji mostu drogowego w Toruniu, który oddano do użytku 9.12.2013 roku.

## Most drogowy w Toruniu

Jedną z większych i najbardziej imponujących inwestycji ubiegłego roku była budowa mostu im. Generał Elżbiety Zawadzkiej (kurierki AK, jedynej kobiety w szeregach cichociemnych) w Toruniu. Łączna długość całego układu wraz z estakadami, tunelami i drogami dojazdowymi wynosi 4100 m, przy czym sam obiekt mostowy posiada długość 540 m i szerokość 24 m. Na budowie zastosowano unikalną w skali światowej technologię montażu dwóch przęseł łukowych, każde o długości 270 m, wysokości 50 m oraz masie ok. 2700 ton. Stalowe przęsła łukowe były scalone z mniejszych fragmentów na lądzie, a następnie transportowane na holownikach drogą wodną i osadzone na dwóch filarach brzegowych i filarze środkowym na sztucznej wyspie wzniesionej w nurcie Wisły. Cała operacja sterowana była komputerowo i wymagała odpowiednich warunków wodnych i pogodowych oraz ogromnej precyzji w dopasowaniu elementów. Obok spektakularnego montażu, na budowie zastosowano wiele innowacyjnych i nietypowych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i materiałowych. Na moście zastosowano między innymi nawierzchnię z asfaltu lanego, w celu uzyskania większej równości i trwałości. W specyfikacji pojawił się rozdział dotyczący betonu lekkiego z przeznaczeniem na kapy chodnikowe i wyniesione pobocza techniczne.

Wykonawca Strabag Sp. z o.o. wbudował łącznie 61 000 m<sup>3</sup> betonu, przy czym sam obiekt mostowy „skonsumował” 21 000 m<sup>3</sup> betonu. Lekkiemu betonowi kruszywowemu przypadł udział 540 m<sup>3</sup> wbudowanych w okresie od 12.09 do 4.10.2013 r. Wszystkie dostawy betonu zrealizowano z mobilnej wytwórni RD Beton.

## Specyfikacja i projektowanie składu betonu lekkiego

W opisywanym przypadku zadaniem było opracowanie technologii betonu lekkiego. Niejednoznaczność zapisów specyfikacji [2] i [3] wymagała konsultacji wszystkich uczestników realizacji obiektu

Fot. 1. Most łukowy w Toruniu



foto: Sławomir Górnicki

inżynierskiego. W ich wyniku ustalono zestaw wymagań wg norm [4] i [5] dla mieszanki betonowej i betonu lekkiego kap chodnikowych i poboczny. Podstawowym wyzwaniem było uzyskanie wytrzymałości gwarantowanej 30 MPa (klasa LB30), przy gęstości w stanie suchym  $\leq 1800 \text{ kg/m}^3$  (odmiana 1,8).

Trwałość betonu gwarantować miała odporność na działanie mrozu dla stopnia F150 oraz przepuszczalność wody przez beton ograniczona stopniem W8. Kontrowersyjną kwestią była specyfikacja nasiąkliwości. Nasiąkliwość zdefiniowana wg [5] jest wartością względną, odnoszącą się do masy betonu w stanie suchym. A zatem identyczna ilość wody zaabsorbowanej automatycznie oznacza wyższą nasiąkliwość betonu lekkiego w porównaniu do betonu zwykłego. Ostatecznie omawianą kwestię sprowadzono do spełnienia wymagań normy [4].

Istnieje wiele zasadniczych różnic w procesie projektowania składu kruszywowego betonu lekkiego i zwykłego. Przyczyny tego stanu należy upatrywać w porowatości powszechnie stosowanych rodzajów kruszywa lekkiego. Pory otwarte, dostępne dla wody i zaczynu cementowego komplikują proces produkcji i transportu mieszanki betonowej. Praktycznie wykluczają również jedynie analityczne projektowanie składu betonu lekkiego w ujęciu bilansu objętościowego. Z kolei zawartość kruszywa lekkiego o określonym udziale porów zamkniętych decyduje o relacji gęstości i wytrzymałości betonu. Stąd projektant składu, kształtując właściwości betonu lekkiego, podstawowy – w technologii betonu zwykłego – współczynnik woda/cement transformować musi na stosunek (woda + porowatość) / cement.

Pierwszym krokiem projektowania był dobór rodzaju kruszywa lekkiego. Zarówno wymagania dla betonu, lokalizacja obiektu, jak i doświadczenia autorów wskazały kruszywo popiołoporytowe Pollytag, w formie granulatu frakcji 4/8 i 6/12.

Kompromis między łatwym wbudowaniem mieszanki a jednorodnością betonu w przekroju elementów uzyskano, przyjmując konsystencję półciekłą K-4 oraz odpowiednie uziarnienie kruszywa i zawartość ziaren drobnych frakcji. Mikrowłókna – oprócz funkcji hamowania rys od skurczu plastycznego – pełniły rolę stabilizatora położenia ziaren kruszywa lekkiego w strukturze kompozytu. Mimo dodatkowego utrudnienia przy ustalaniu bilansu objętościowego, mieszankę betonu lekkiego zaprojektowano jako napowietrzoną. Brak zatwierdzonej metody badania zawartości powietrza w mieszance wymusił dodatkowe ograniczenie tolerancji wartości gęstości. Dla zapewnienia zachowania właściwości mieszanki w odpowiednio długim ( $\geq 120$  minut) czasie skład oparto na sprawdzonej domieszce, będącej mieszaniną aminofosfonianu (APP) i polikarboksylanu (PCP). Skład betonu w ujęciu objętościowym z podstawowymi założeniami przedstawiono w tabeli 1.

Poprawność przyjętych założeń i recepty zweryfikowano w trakcie prób w skali przemysłowej, na 4 miesiące przed terminem realizacji. Próby te pozwoliły również opracować precyzyjne wytyczne dla produkcji, transportu oraz kontroli jakości, które wraz z receptą dały kompletną technologię betonu lekkiego dla realizacji kap chodnikowych mostu w Toruniu.

Tabela 1. Skład betonu lekkiego kap chodnikowych

Składnik	Jednostka	Ilość
CEM I 42,5N-HSR/NA (obecnie SR3/NA)	% objętości	12,6
Woda		16,0
Woda absorpcyjna		-
Piasek 0/2		25,5
Granulat 4/8		16,8
Granulat 6/12		24,8
Domieszka upłynniająca APP + PCP		0,3
Domieszka napowietrzająca		<0,1
Mikrowłókna klasa Ia		<0,1
Objętość składników bez wprowadzonego powietrza		dm <sup>3</sup>
Założona gęstość mieszanki betonowej	kg/m <sup>3</sup>	1881
Współczynnik woda/cement	-	0,41
Zawartość zaprawy	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	547
Zawartość frakcji < 0,125 mm	kg/m <sup>3</sup>	407

### Kontrola jakości, produkcja i wbudowanie mieszanki betonowej

Podstawą kontroli jakości i produkcji była notatka służbowa sporządzona po próbach przemysłowych z udziałem wszystkich uczestników procesu: nadzoru, wykonawcy, producentów/dostawców materiałów oraz autorów recepty. Stanowiła ona de facto kompletną technologię betonu lekkiego dla toruńskiej realizacji.

Szczególną uwagę poświęcono kontroli dostaw oraz przygotowaniu lekkiego kruszywa popiołoporytowego. Powszechnie dyskutuje się optymalny stan kruszywa w momencie produkcji. W opisywanej realizacji założono nasycanie wodą jego ziaren, do momentu potwierdzenia uzyskania założonej absorpcji. Kolejnym krokiem było każdorazowe wprowadzenie do systemu sterowania wytwórni dokładnych wartości wilgotności granulatu. Warunkiem powtarzalności produkcji było przygotowanie budowy na odbiór dostaw mieszanki w określonej ilości, jednak nie mniejszej niż 80 m<sup>3</sup>.

W myśl przysłowia „budowa oczekuje mieszanki, a nie odwrotnie” ustalono procedurę transportu. Wytyczono alternatywne trasy przejazdu dla zachowania czasu od momentu załadunku do wyładunku na poziomie 60÷90 minut. Próby w skali przemysłowej dostarczyły cennych wniosków dotyczących wpływu sposobu mieszania na właściwości napowietrzonej mieszanki betonu lekkiego, które uwzględniono w niniejszej procedurze.

Sprecyzowano wszelkie metody oraz częstotliwość badań składników, właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego. Kluczowym parametrem kontroli była gęstość mieszanki betonowej określana dla każdej betonomieszanki: po pierwszym zarobie, dla całego ładunku na wytwórni oraz w czasie rozładunku. Do przygotowanego deskowania mieszankę podawano bezpośrednio z betonomieszanki (lej). Właściwe zagęszczenie uzyskano przy pomocy wibratorów pogrążalnych. Technika ta w połączeniu z ustaloną konsystencją K-4 oraz makrowłóknami zapewniła pożądaną strukturę i jednorodność betonu w elemencie. Następnie powierzchnię formowanych kap wyrównywano i zacierano, przy czym zasadę „jednego przejścia” realizowano dzięki zastosowaniu pomostów roboczych podpartych na krawędziach



2

foto: Archiwum R. Walkowiak



3

foto: M. Konopska-Piechurska

Fot. 2. Formowanie kap chodnikowych jako ciąg zabiegów: rozładunek, zagęszczenie, wyrównanie i zacieranie powierzchni mieszanki betonu lekkiego Fot. 3. Wykonana kapa chodnikowa z betonu lekkiego

deskowania (fot. 2). Technologii betonu lekkiego dopełniło zabezpieczenie zaformowanych płyt przed nadmiernym odparowaniem wody w krytycznej fazie dojrzewania młodego betonu. Na marginesie warto dodać, że „gruszki” z ładunkiem mieszanki betonu lekkiego były praktycznie pierwszymi pojazdami, które 12.09.2013 r. obciążąły prześło realizowanego mostu łukowego w Toruniu. Badania wykonywano na próbkach sześciennych o wymiarze 150 mm, zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie [4] i [5]. Wyniki badań mieszanki betonowej i betonu lekkiego zestawiono w tabeli 2. Wszystkie badania wykonało laboratorium TPA Sp. z o.o.

Tabela 2. Wyniki badań betonu lekkiego stosowanego na kapy chodnikowe

Właściwość	Jednostka	Kolejne partie betonowania kap chodnikowych						Wymagania
		12.09	16.09	23.09	27.09	30.09	04.10	
Data betonowania	dd.mm	12.09	16.09	23.09	27.09	30.09	04.10	-
Konsystencja	cm opadu stożka	7	7	8	8	7	8	6÷11 (K-4)
Gęstość mieszanki betonowej	kg/m <sup>3</sup>	1905	1897	1885	1872	1869	1893	1830÷1910
Wytrzymałość na ściskanie R <sub>sr28</sub>	MPa	40,6	39,5	37,8	36,7	36,5	38,5	≥ 36 (LB30)
Gęstość betonu	kg/m <sup>3</sup>	1779	1766	1754	1751	1736	1759	1601÷1800 (odmiana 1,8)
Nasiąkliwość	M.-%	11,8	-	-	-	-	9,9	≤ 20 (12)
Mrozoodporność	stopień mrozoodporności	F150	-	-	-	-	F150	F150
Przepuszczalność wody	stopień wodoszczelności	W8	-	-	-	-	W8	W8

Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych Konferencji Dni Betonu 2014

**Podsumowanie**

Liczność zastosowań betonu lekkiego w polskim mostownictwie nie jest odzwierciedleniem umiejętności projektantów czy technologów. Jest kwestią konwencji. Póki co za „konwencję” uznać musimy nie tyle beton zwykły, ile beton z kruszywem bazaltowym bądź granitowym oraz cementem o ściśle określonym składzie. W tym sensie lekki „beton niekonwencjonalny” przyciągać będzie uwagę na konferencjach, ale w praktyce odstraszać „odstępstwami od zapisów specyfikacji”. Oddając do rąk czytelników niniejszy artykuł autorzy mają nadzieję na zmianę opisaną sytuację. Udałe zastosowanie betonu lekkiego na moście w Toruniu nie było sztuką, lecz efektem poświęcenia nieco większej uwagi znanej technologii materiału.

**Małgorzata Konopska-Piechurska**  
**TPA Sp. z o.o.**  
**Robert Walkowiak**  
**Chryso Polska Sp. z o.o.**  
**Jacek Weretelnik**  
**Strabag Sp. z o.o.**

*Literatura*

- 1 Jackiewicz-Rek W., M. Konopska, Rola specyfikacji betonu w zapewnieniu bezpieczeństwa obiektów mostowych, XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie, 2011
- 2 Szczegółowe specyfikacje techniczne na budowę obiektów inżynierskich dla zadania: Etap I – Budowa mostu drogowego wraz z dojazdami łączącymi drogę krajową nr 1 z drogą krajową nr 15 i nr 80 SST M-13.01.07a, Beton kap chodnikowych i wyniesionych poboczy technicznych klasy LB30
- 3 Szczegółowe specyfikacje techniczne na budowę obiektów inżynierskich dla zadania: Etap I – Budowa mostu drogowego wraz z dojazdami łączącymi drogę krajową nr 1 z drogą krajową nr 15 i nr 80 SST M-13.00.00 Beton
- 4 PN-B-06263:1991 Beton lekki kruszywowym
- 5 PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- 6 EuroLightCon, European Union Brite EuRam III, Document BE96-3942/R22, The economic potential of lightweight aggregate concrete in c.i.p. concrete bridges, czerwiec 2000
- 7 Siwowski T., Przykłady zastosowań betonów niekonwencjonalnych w polskim mostownictwie, Geoinżynieria, drogi, mosty, tunele, nr 04/2005