

mgr inż. Piotr Acalski^{1*)}
mgr inż. Agnieszka Grzybowska¹⁾
mgr inż. Paweł Piekarski¹⁾
dr inż. Łukasz Mrozik¹⁾

Wybrane problemy nowoczesnej technologii betonu

Selected problems of modern concrete technology

DOI: 10.15199/33.2015.05.29

(Artykuł przeglądowy)

Streszczenie. Kompozyty cementowe to stale rozwijana i unowocześniana grupa materiałów budowlanych. Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci prężny rozwój technologii betonu warunkowany był przede wszystkim wprowadzeniem domieszek chemicznych i dodatków mineralnych. Coraz powszechniej stosowane są betony wysokowartościowe o polepszonych właściwościach mechanicznych i użytkowych. Artykuł stanowi próbę wskazania wybranych, istotnych problemów współczesnej technologii betonu. Autorzy dokonali zwięzłego przedstawienia metod projektowania składu mieszanki betonowej, podejść stosowanych w modelowaniu struktury betonu oraz scharakteryzowali grupę kompozytów wykonywanych na bazie zaczynów o ekstremalnie niskim stosunku wodno-cementowym.

Słowa kluczowe: beton, wysokowartościowy, samozagęszczalny, technologia.

Abstract. Cement composites are continuously developed and modernized group of building materials. Over the last decades, dynamic development of concrete technology has been mainly conditioned by introduction of chemical admixtures and mineral additives. Increasingly, high performance concretes, with improved mechanical and utility properties, are widely used. This article is an attempt to identify selected, significant problems of modern concrete technology. Authors made a brief presentation of concrete mix designing methods, approach used in concrete structure modelling and characterized the group of composites based on extremely low water/cement ratio cement paste.

Keywords: concrete, high performance, self-compacting, technology.

Technologia betonu jest dziedziną, która rozwija się w bardzo szybkim tempie. Liczne modyfikacje składu (np. stosowanie domieszek, dodatków czy włókien stalowych) oraz wpływające na strukturę betonu powodują znaczną poprawę jego parametrów. Działania te umożliwiają produkcję m.in. betonów samozagęszczalnych, wysokowytrzymałościowych i ultrawysokowytrzymałościowych. Te ostatnie, o wytrzymałości powyżej 150 MPa, zostały wykorzystane m.in. do budowy mostu dla pieszych w Sunyudo (fotografia) oraz mostu Sakata-Mirai [1]. Ważnym elementem w technologii betonów stała się również ochrona środowiska. Przykładem tego mogą być betony proekologiczne, m.in. z dodatkiem TiO_2 , które przez proces fotokatalizy redukują z powietrza szkodliwe związki chemiczne (tlenki azotu NO_x) [2].



Most dla pieszych w Sunyudo [3]
Sunyudo Footbridge [3]

Wymienione aspekty oraz możliwości wynikające z zastosowania nowoczesnych betonów dowodzą, że materiał ten z całą pewnością jest rozwiązaniem przyszłościowym. Tendencje pokazują, że konstruktorzy powoli odchodzą od tradycyjnych betonów recepturowych na rzecz betonów projektowanych. Oznacza to, że beton w przyszłości będzie materiałem dostosowanym do wymaganych cech fizycznych, zamiast kategorii składu.

Metody projektowania składu mieszanek betonowych

Najpopularniejszą w kraju metodą projektowania mieszanki betonowej jest metoda trzech równań. Polega ona na rozwiązaniu układu trzech równań opisujących w uproszczony sposób szczelność i wodożądność mieszanki betonowej oraz wytrzymałość stwardniałego betonu. Odnosi się do ośrodka trójskładnikowego (kruszywo, cement i woda) i znajduje zastosowanie przede wszystkim w projektowaniu betonów tradycyjnych, o wytrzymałości nieprzekraczającej 60 MPa. Podobnie jak większość metod klasycznych, ogranicza się ona jedynie do ilościowego określenia objętości komponentów mieszanki betonowej, pomijając przy tym wpływ stopnia rozdrobnienia składników na stan struktury betonu.

Próbie uwzględnienia pewnych zależności wpływających na ową strukturę podjął prof. Paszkowski, zakładając, że ziarna kruszywa grubego otulone są warstwą zaprawy o określonej grubości $r_g/2$. Metoda tzw. podwójnego otulenia wprowadza do klasycznego układu trzech równań tzw. równanie charakterystyczne, umożliwiające obliczenie ilości kruszywa grubego wynikającej ze spulchnienia jego ziaren zaprawą.

¹⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

^{*)} Autor do korespondencji: e-mail: piotr.acalski@utp.edu.pl

W ostatnich latach podjęto wiele badań prowadzących do modyfikacji równania wytrzymałości betonu, skupiając się m.in. na doświadczalnym określeniu wpływu kruszywa grubego, a także obecności domieszek. Warto przytoczyć jedną z bardziej znanych zależności, sformułowaną przez F. De Larrarda [4]:

$$f_{c28} = \frac{\alpha_g \cdot R_c}{\left[1 + 3,1 \cdot \frac{m_w/m_c}{1,4 - 0,4 \cdot \exp(-11 \cdot m_m/m_c)} \right]} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

gdzie:

f_{c28} – wytrzymałość betonu na ściskanie badana po 28 dniach [MPa];
 α_g – współczynnik doświadczalny uwzględniający wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość betonu [-];
 R_c – klasa wytrzymałości cementu [MPa];
 m_w – masa wody [kg];
 m_c – masa cementu [kg];
 m_m – masa mikrokrzemionki [kg].

Uwzględniając analityczno-doświadczalne związki pomiędzy stosunkiem wodno-cementowym, wodożądnością normową cementu, rodzajem kruszywa a geometrycznymi parametrami struktury betonu, jedną z dokładniejszych zależności pozwalających na określenie wytrzymałości betonu na ściskanie zaproponował w pracy [5] A. Świtoński:

$$f_{c28} = \alpha_k \cdot 0,505 \cdot R_c \cdot \sqrt[3]{\frac{(1 + \omega_{zn} \cdot \rho_c) \cdot \frac{\rho_w + 0,55 \cdot \omega_n \cdot \rho_c}{\rho_w + \omega_n \cdot \rho_c} - 1}{(1 + \omega \cdot \rho_c) \cdot \frac{\rho_w + 0,55 \cdot \omega_n \cdot \rho_c}{\rho_w + \omega_n \cdot \rho_c} - 1}} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

gdzie:

α_k – współczynnik uwzględniający wpływ kruszywa na wytrzymałość betonu [-];
 R_c – klasa wytrzymałości cementu [MPa];
 ω_n – wodożądność normowa cementu [-];
 ω – stosunek wodno-cementowy [-];
 ω_{zn} – stosunek wodno-cementowy zaprawy użytej do oznaczenia klasy cementu [-];
 ρ_c – gęstość cementu [kg/m³];
 ρ_w – gęstość wody [kg/m³].

Do zalet geometrycznego modelu struktury mieszanki betonowej, na podstawie którego zostało wyprowadzone równanie (2), należy uwzględnienie w nim m.in. obecności dodatków mineralnych. Warto ponadto wskazać przydatność przytoczonej zależności do projektowania betonów wysokowytrzymałościowych o małym stosunku wodno-spoiwowym.

Metody modelowania struktury betonu

Oprócz omówionych metod istnieją również modele mechaniczne, opisujące geometryczne zależności w betonie. Uwzględnienie położenia ziaren kruszywa oraz oddziaływań pomiędzy nimi jest ważne, m.in. z uwagi na występującą różnicę w modułach sprężystości ziaren i matrycy cementowej. Renius [6] zaprezentował beton jako układ idealizowanych, kulistych ziaren kruszywa grubego, połączonych układem więzi odwzorowujących zaprawę. W 1983 r. Zubelewicz [7] pokazał beton jako ośrodek dwufazowy w postaci ziaren kruszywa znajdujących się w odkształcalnej matrycy, wykorzystując analogię geometryczną w stosunku do ośrodka rzeczywistego. Jego zaletą jest wiele możliwości analizy zachowania się betonu w konstrukcji pod obciążeniem. Modele mechaniczne struktury betonu możliwe są do zaadaptowania w wersji komputerowej.

Właściwe opisanie konfiguracji i wielkości ziaren poszczególnych składników stanowi drogę do wyeliminowania niedoskonałości przedstawionych metod. Takie rozwiązanie zostało wskazane w założeniach mikrolokalnego poziomu modelu struktury A. Świtońskiego [5], który opisuje strukturę mieszanki betonowej w postaci sferycznych ziaren fazy stałej losowo rozmieszczonych w fazie ciekłej. Wszystkie ziarna mają taką samą średnicę, wynikającą ze składu ziarnowego. Z uwagi na zróżnicowany stopień rozdrobnienia, rozważane są trzy poziomy obserwacji tego modelu.

Projektowanie i wykonawstwo betonów o niskim stosunku wodno-spoiwowym

Jak wspomniano, coraz powszechniej stosowaną grupą kompozytów cementowych są betony wysokowartościowe. Ich produkcja ma na celu uzyskanie polepszonych właściwości mechanicznych i użytkowych, co można uzyskać przez obniżenie stosunku wodno-spoiwowego. Wiąże się to ze stosowaniem cementów wysokich klas, mikrowypełniaczy, superplastyfikatorów oraz specjalnych metod zagęszczania.

Przy założonej jakości komponentów, cechy stwardniałego betonu zależą nie tylko od składu ilościowego, ale także od stopnia rozdrobnienia poszczególnych komponentów, a przede wszystkim spoiwa. Stwardniały zaczyn cementowy składa się z gęsto ułożonych produktów hydratacji, pomiędzy którymi występują wolne przestrzenie zwane porami. Zawartość i kształt porów mają decydujący wpływ na wytrzymałość i trwałość betonu. Niewielkie pory żelowe nie mają dużego znaczenia, jednak większe pory kapilarne wpływają na znaczne obniżenie jakości betonu z powodu stosowania większej ilości wody, niż wynika to z rzeczywistego zapotrzebowania mieszanki betonowej. W przypadku niewielkiej wartości stosunku wodno-spoiwowego konieczne jest stosowanie superplastyfikatorów, których cząsteczki ulegają adsorpcji na ziarnach cementu, nadając im jednoimienny ładunek elektryczny, co powoduje ich dyspersję w wyniku odpychania [8]. Jednocześnie tworzona jest bardzo cienka warstwa „smarująca”, ułatwiająca wzajemny poślizg stałych cząstek mieszanki, umożliwiającą obniżenie tarcia wewnętrznego. Oprócz superplastyfikatora konieczne jest stosowanie specjalnych metod zagęszczania mieszanki betonowej w celu usunięcia jak największej ilości niechcianego powietrza, takich jak: wibroprasowanie; prasowanie; wirowanie; odwadnianie próżniowe. Dodatkowym problemem jest opracowanie dokładnej i uniwersalnej metody projektowania betonów o niskim wskaźniku wodno-spoiwowym.

Podsumowanie

Artykuł stanowi próbę wskazania wybranych, istotnych zagadnień z dziedziny nowoczesnej technologii betonu. Autorzy wskazali, że ciągle rozwój kompozytów cementowych uwarunkowany jest przede wszystkim powszechnym stosowaniem domieszek chemicznych i dodatków mineralnych. Stwarza to architektom i konstruktorom coraz większe możliwości kształtowania obiektów budowlanych.

Obserwując dynamikę i kierunek postępu technicznego w analizowanym obszarze, należy zauważyć, że rozważania teoretyczne zostały wyprzedzone przez rozwiązania

praktyczne. Jest to widoczne m.in. w przypadku stosowanych metod projektowania betonu o z góry założonych cechach. Brakuje bowiem dostatecznie prostych i uniwersalnych metod analityczno-doświadczalnych, szczególnie w przypadku kompozytów wykonywanych z wykorzystaniem zaczynów z ekstremalnie niską zawartością fazy ciekłej.

Biorąc pod uwagę znaczną liczbę parametrów (zmiennych) decydujących o właściwościach mieszanki betonowej, a zatem i betonu, sugerujemy przydatność sztucznych sieci neuronowych do projektowania składu mieszanki betonowej oraz predykcji cech m.in. mechanicznych, takich jak wytrzymałość betonu na ściskanie. Wykorzystanie tego narzędzia matematycznego może stanowić np. bazę do opracowania tzw. wirtualnego laboratorium betonu, w którym będą identyfikowane i opisywane zależności pomiędzy składem ilościowym i jakościowym a właściwościami mieszanki i stwardniałego kompozytu.

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK¹⁾

mgr inż. Marek Lehmann^{1)*}

mgr inż. Marek Ziarkiewicz¹⁾

Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych

Residual strength of fibre composite based on waste sand

DOI: 10.15199/33.2015.05.30

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości resztkowych fibrokompozytu wykonywanego przy użyciu piasków odpadowych o różnym stopniu zbrojenia rozproszonego. Omówiono metodę wyznaczania tych wytrzymałości oraz sposoby interpretacji wyników. Ostatecznie pokazano wpływ zawartości włókien stalowych na wytrzymałości resztkowe oraz wyznaczono średnie i charakterystyczne wartości wytrzymałości, niezbędne do wymiarowania elementów konstrukcyjnych z fibrokompozytu.
Słowa kluczowe: fibrokompozyt, wytrzymałość resztkowa, nośność.

Abstract. The article presents the results of the residual strength fiber composite performed using waste sands with varying degrees of dispersed reinforcement. Discusses the method of determining the strength and how to interpret the results. Finally, the effect of steel fiber content on the residual strength, and determination of the mean and characteristic strength values necessary for dimensioning of components of fiber composite.

Keywords: fiber composite, residual strength, resistance.

Kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi, ogólnie nazwane fibrokompozytami, stają się coraz popularniejsze zarówno w kraju, jak i na świecie. Włókna stalowe pełnią rolę wzmocnienia i w znaczny sposób poprawiają niektóre właściwości kompozytu [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Materiały te stanowią więc alternatywę dla betonu zwykłego, gdyż cechuje je m.in. większa wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie, wytrzymałość zmęczeniowa i udamność oraz od-

porność na ścieranie. Mówiąc o fibrokompozytowych elementach konstrukcyjnych, należy mieć przede wszystkim na uwadze sposób ich projektowania. W Europie metody obliczania nośności elementów z fibrokompozytów przedstawione zostały w RILEM TC 162-TDF [7] i fib Model Code 2010 [8]. Bazują one na znajomości wytrzymałości resztkowych, jako podstawowych wielkości, które klasyfikują mineralne kompozyty ze zbrojeniem rozproszonym. Znając wartości wytrzymałości resztkowych, można określić nośność na zginanie oraz na ścinanie elementu wykonanego z fibrokompozytu.

Celem artykułu jest omówienie metody wyznaczania wytrzymałości resztkowych oraz zaprezentowanie wyników badań fibrokompozytu o różnej zawartości włókien stalowych, wykonanego na bazie piasków odpadowych.

Metodyka badań i elementy próbnie

Charakterystykę materiałów użytych do wykonania fibrokompozytu objętego badaniami przedstawiono w pracy [2]. Wytrzymałości resztkowe określono na 47 belkach wg PN-EN 14651:2007. Sześć belek wykonano bez zbrojenia rozproszonego,

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej Środowiska i Geodezji

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: lehmann@wilsig.tu.koszalin.pl