

Optymalizacja składu betonów wysokowartościowych

Dr inż. Mariusz Franczyk, dr hab. inż. Grzegorz Prokopski, Politechnika Rzeszowska

1. Wprowadzenie

Dotychczasowa technologia uzyskiwania betonów wysokowartościowych BWW (ang. High Performance Concretes – HPC) wynika z analitycznych i doświadczalnych podstaw projektowania betonów zwykłych. Określenie i dobór składu mieszanki betonowej zarówno w skali mikro, jak i makro (składników betonu) dokonywany jest z warunku minimalnej porowatości stosu okruszowego, maksymalnej wytrzymałości i szczelności zaczynu cementowego oraz maksymalnej przyczepności między zaczynem a kruszywem. Projektowanie BWW opiera się na odpowiednim kształtowaniu właściwości i doborze ilościowym wszystkich tych elementów.

W praktyce uzyskuje się to przy zachowaniu konwencjonalnych zasad, użyciu składników wysokiej jakości, ale głównie przez wprowadzenie bardzo skutecznych superplastyfikatorów minimalizujących wskaźnik W/C) oraz dodatków w postaci mikrowypełniaczy wykazujących aktywność chemiczną, takich jak: pyły krzemionkowe, żużle czy popioły lotne.

Rosnące wymagania co do zespołu cech jakościowych, użytkowych oraz trwałości projektowanego betonu, wynikające m.in. ze szczelności, odporności na czynniki agresywne itp., powodują zasadniczy wzrost liczby kryteriów i zmiennych, jakie muszą być brane pod uwagę w procedurze projektowania składu mieszanki. Projektowanie prowadzi się obecnie głównie metodami doświadczalnymi, przy wykorzystaniu dotychczasowego stanu wiedzy o BWW, coraz częściej jednak stosuje się metody statystyczne i optymalizacyjne. Wynika to z braku metod analitycznych oraz z konieczności powiązania co najmniej pięcioskładnikowego układu oraz jego wewnętrznej kompatybilności (w odróżnieniu od trzyskładnikowego betonu zwykłego $C+K+W=B$; Cement + Kruszywo + Woda = Beton).

Powstające w efekcie dotychczasowych działań projektowych, badawczych i technologicznych kompozyty betonowe, w tym BWW, charakteryzują się już określonymi cechami użytkowymi, ale posiadają także defekty identyfikowane często dopiero na poziomie mikrostruktury. Wykorzystanie w badaniach betonów mikroskopii skaningowej umożliwia obserwację i analizę tej złożonej mikrostruktury. Pozwala na identyfikację różnorodnych jej defektów, powiązanie z parametrami

składu mieszanki i określenie wpływu na właściwości betonu, a tym samym staje się dodatkowym kierunkiem odpowiedniego kształtowania i projektowania betonu [1, 2].

Opisywana wielokierunkowość działań zmierzających do ustalenia ogólnych zasad projektowania lub sprecyzowania zależności funkcyjnych pomiędzy składem mieszanki betonowej a właściwościami betonów wysokowartościowych, znajdowała odzwierciedlenie w badaniach wielu autorów [3–5, 10–14].

2. Wymagania jakościowe wobec składników

Wymagania jakościowe w stosunku do składników BWW są znane i zostały szeroko omówione m.in. w pracach [5–10]. Zaleca się stosowanie cementów portlandzkich, z możliwie niską zawartością C_3A , w ilości 400–550 kg/m³ o wytrzymałości na ściskanie nie mniejszej niż 45 MPa oraz składzie i rozdrobnieniu zapewniającym uzyskanie szczelnej mikrostruktury.

Kruszywo dobrej jakości powinno pochodzić ze skały o możliwie wysokiej wytrzymałości, ziarnach z silnie rozwiniętą powierzchnią sprzyjającą wysokiej przyczepności zaczynu oraz o uziarnieniu zapewniającym uzyskanie minimalnej jamistości stosu okruszowego. W praktyce maksymalny wymiar ziarna nie przekracza 16 mm.

Niezbędnym składnikiem BWW są wysokoefektywne superplastyfikatory, których zadaniem jest z jednej strony uzyskanie odpowiedniej konsystencji mieszanki przy niskim W/C, a z drugiej lepsze wykorzystanie cementu, dzięki jego dezagregacji. Jako dodatek mineralny do BWW najczęściej stosuje się pył krzemionkowy, który dzięki bardzo wysokiemu rozdrobnieniu i dużej powierzchni właściwej, a także aktywności chemicznej wobec cementu, korzystnie modyfikuje zaczyn cementowy, co ma szczególne znaczenie w strefie kontaktu zaczynu z kruszywem.

3. Projektowanie składu mieszanki

Przewidywanie wytrzymałości na ściskanie dla betonu zwykłego, jak i BWW jest jednym z podstawowych elementów projektowania składu. Występuje zarówno w istniejących klasyfikacjach, jak i normowych wymaganiach konstrukcyjnych.

Równania występujące w popularnych metodach projektowania betonów zwykłych (m.in. równania Féréta

Tabela 1. Składy betonów bazaltowych oraz wyniki badań ich właściwości fizyko-mechanicznych (według planu eksperymentu [12])

Nr serii	Zmienne standaryzowane		Zmienne materiałowe		Ilość składników [kg/m³]					Wyniki badań					
	x ₁	x ₂	W/C	Pk/C	C	P	K	W	Pk	f _{c28} MPa	E ₂₈ GPa	K _{IC} MN/m ^{3/2}	n _w %	w _b mm	ε _s
BB1	-1	-1	0,33	0	550	435	1257	181,5	0	77,4	55,1	0,941	4,06	20	0,0255
BB2	0	-1	0,36	0	469	473	1350	168,8	0	72,8	54,6	0,839	4,16	22	0,025
BB3	1	-1	0,40	0	424	602	1713	169,6	0	71,7	52,9	0,775	4,25	40	0,026
BB4	-1	0	0,33	0,05	550	406	1257	181,5	27,5	89,5	55,8	0,992	3,4	16	0,0226
BB5	0	0	0,36	0,05	469	450	1349	168,8	23,4	82,4	49,8	0,867	4,1	18	0,03
BB6	1	0	0,40	0,05	424	580	1713	169,6	21,2	72,5	52,1	0,905	4	18	0,0226
BB7	-1	1	0,33	0,1	550	376	1257	181,5	55	87,7	54,4	0,850	3,2	9	0,0266
BB8	0	1	0,36	0,1	469	427	1349	168,8	46,9	82	51,4	0,815	3,9	12	0,0334
BB9	1	1	0,40	0,1	424	459	1713	169,6	42,4	76	53	0,851	4,1	16	0,0348

i Bolomeya) opisują w jaki sposób właściwości mieszanki betonowej i 28-dniowego betonu stwardniałego zależą od jakościowej i ilościowej charakterystyki składu.

W odniesieniu do BWW zależności te stają się jednak nieprzydatne. Nie uwzględniają bowiem wpływu dodatków, domieszek oraz kruszyw (rodzaju, stanu powierzchni, reaktywności itp.), a także właściwości współczesnych cementów, na przewidywane właściwości mechaniczne betonu. Jedynym z trzech podstawowych równań, które w tym przypadku zachowuje swoją ważność jest równanie szczelności, w którym suma objętości absolutnych składników ma się równać jednostce objętości zagęszczonej mieszanki betonowej.

W wyniku prowadzonych na coraz szerszą skalę badań autorzy modyfikują istniejące lub podają nowe zależności określające wpływ składu mieszanki betonowej na właściwości betonów wysokowartościowych.

Jedną z form wzoru Féreta do obliczania wytrzymałości BWW zaproponował de Larrard [10] uzależniając f_{c28} od podstawowych parametrów składu mieszanki betonowej:

$$f_{c28} = \frac{K_G R_C}{[1 + 3,1 \frac{W/C}{1,4 - 0,4 \exp(-11 Pk/C)}]^2}$$

przy $W/C \leq 0,4$ (1)

gdzie:

f_{c28} – średnia wytrzymałość na ściskanie betonu badana na próbkach walcowych po 28 dniach,

R_C – wytrzymałość cementu badana na normowych próbkach z zaprawy cementowej,

W/C – wskaźnik wodno-cementowy,

Pk/C – wagowy stosunek pyłu krzemionkowego do masy cementu,

K_G – współczynnik doświadczalny zależny od rodzaju kruszywa.

W doświadczeniach de Larrarda, współczynnik K_G określono doświadczalnie przez porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie z wartościami przewidywanymi wzorem. Współczynnik ten wyniósł średnio $4,9 \pm 10\%$ (w badaniach krajowych – IPPT PAN w Warszawie, $K_G \sim 6,45$ [5], natomiast według [12] mieścił się w granicach 6,1–6,3).

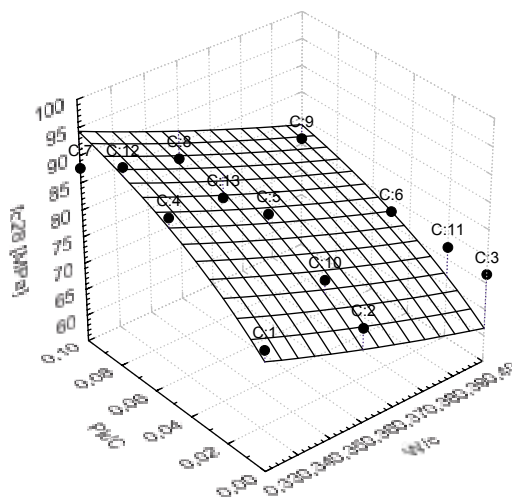
Innym przykładem doświadczalnej postaci zależności wytrzymałości betonu od jego składu, uwzględniającej dodatek pyłu krzemionkowego jest równanie podane w pracach [3, 13]:

$$f_{c28} = \frac{188,4}{21,7 \left(\frac{W}{C + Pk} - 0,15 \frac{Pk}{C} \right)} \quad (2)$$

Równanie to ma jednak istotne ograniczenie stosowności, które sprowadza się do użycia cementu o wytrzymałości ok. 55 MPa oraz kruszywa łamanego o gęstości 2,85 kg/dm³.

Z praktycznych doświadczeń autorów niniejszego opracowania wynika, że równanie de Larrarda (1) w sposób niezadowolający charakteryzuje zmiany wytrzymałości na ściskanie badanych betonów wysokowartościowych wykonywanych z surowców polskich [11, 12]. Współczynnik korelacji uzyskany dla tych betonów wynosił $R=0,74$ (rys. 1). W tabeli 1 i na rysunku 1 przedstawiono wybrane z szerokiego

b) Model: $f_{c28} = K \cdot 49,2 / (1 + 3,1 \cdot W/C / (1,4 - 0,4 \cdot \exp(-11 \cdot Pk/C)))^2$
 $f_{c28} = (6,2952) \cdot 49,2 / (1 + 3,1 \cdot x / (1,4 - 0,4 \cdot \exp(-11 \cdot y)))^2$ $R = 0,7439$



Rys. 1. Wykres funkcji wytrzymałości na ściskanie w zależności od W/C i Pk/C uzyskany przy zastosowaniu wzoru de Larrarda (1) (współczynnik $K_G \approx 6,3$) [12]

materiału badawczego wyniki badań właściwości BWW wykonanych z użyciem kruszyw bazaltowych, pyłu krzemionkowego i krajowego superplastyfikatora (sulfonowana żywica melaminowo-formaldehadowa).

Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano zmodyfikowaną zależność wytrzymałości na ściskanie opartą na wzorze de Larrarda:

$$f_{c28} = \frac{K_G R_C}{\left[1 + 3,1 \frac{0,4 \cdot W/C}{1,4 - 0,4 \exp(-11 \cdot 2,25 Pk/C)}\right]^2} \quad (3)$$

gdzie:

f_{c28} – średnia wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania,

R_C – wytrzymałość cementu badana na normowych próbkach z zaprawy cementowej (dla cementu użytego w badaniach $R_{c28} = 49,2$ MPa),

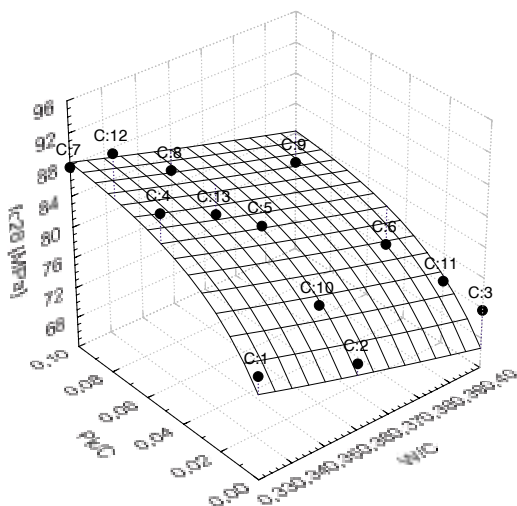
W/C – wskaźnik wodno-cementowy (w badanych betonach: $0,33 \leq W/C \leq 0,4$),

Pk/C – wagowy stosunek pyłu krzemionkowego do masy cementu ($0,0 \leq Pk/C \leq 0,1$),

K_G – współczynnik doświadczalny zależny od rodzaju kruszywa (dla badanych betonów ok. 3,0).

Wprowadzone „współczynniki efektywności” (mnożniki przy Pk/C i W/C) pozwoliły na uzyskanie zdecydowanie lepszej korelacji wyników badań doświadczalnych z wynikami przewidywanymi wzorem (3) (rys. 2), tj. ok. 90%, w porównaniu z ok. 70% korelacją przy zastosowaniu wzoru de Larrarda (1).

Model: $f_{c28} = K \cdot 49,2 / (1 + 3,1 \cdot 0,4 \cdot W/C / (1,4 - 0,4 \cdot \exp(-11 \cdot 2,25 \cdot Pk/C)))^2$
 $z = (3,03143) \cdot 49,2 / (1 + 3,1 \cdot 0,4 \cdot x / (1,4 - 0,4 \cdot \exp(-11 \cdot 2,25 \cdot y)))^2$ $R = 0,87$



Rys. 2. Wykres funkcji wytrzymałości na ściskanie w zależności od W/C i Pk/C uzyskany przy zastosowaniu wzoru doświadczalnego (3) [12]

4. Projektowanie BWW

Efektom dotychczasowych doświadczeń w technologii uzyskiwania BWW są podawane przez różnych autorów analityczno-doświadczalne schematy postępowania przy ich projektowaniu.

Dla przykładu, w pracach [3, 4] przedstawiono kolejne etapy projektowania składu BWW, jako:

1. Przyjęcie założeń dotyczących klasy wytrzymałości, konsystencji, przeznaczenia betonu i warunków eksploatacji.
2. Jakościowy dobór składników, w tym rodzaj, klasa i zawartość cementu, rodzaj superplastyfikatora oraz skład ziarnowy kruszywa.
3. Określenie wartości W/C oraz Pk/C niezbędnych do uzyskania zakładanej wytrzymałości (np. z zależności de Larrarda).
4. Przyjęcie ilości cementu C (zazwyczaj od 400 do 500 kg/m³), dodatku Pk/C (od 0,05 do 0,1) i wody $W = (W/C) \cdot C$ oraz obliczenie ilości zaczynu.
5. Obliczenie objętości i masy kruszywa oraz jego rozdzielanie na piasek i kruszywo grube.
6. Wstępne ustalenie składu: C , Pk , K_d , K_g , W .
7. Wykonanie próbnego zarobu i ustalenie ilości superplastyfikatora.
8. Weryfikacja właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego.
9. Korekty i ustalenie składu ostatecznego.

5. Możliwości komputerowego projektowania składu BWW

W ustalaniu składu BWW pomocne są coraz liczniejsze programy komputerowe wspomagające proces projektowania. Uwzględniają one wpływ superplastyfikatorów oraz dodatków mineralnych na właściwości mieszanki betonowej i betonu. Wskazuje się w tym zakresie głównie na doświadczenia francuskie [3]. W Polsce problematyką tą zajmowano się m.in. w IPPT PAN w Warszawie.

Według większości współczesnych autorów, podejście typowo doświadczalne do projektowania BWW staje się nieekonomiczne. Pomocnym narzędziem okazuje się technika planowania doświadczeń oraz wykorzystanie zagadnień optymalizacji wielokryterialnej.

W pracy [12] przedstawiono efekty szerokiego zastosowania wielokryterialnej optymalizacji statystycznej do oceny badań wysokowartościowych betonów modyfikowanych dodatkami i domieszkami. Jako zmienne decyzyjne przyjęto stosunek pyłu krzemionkowego do cementu (Pk/C) oraz wskaźnik wodno-cementowy (W/C). Optymalizację przeprowadzono po przyjęciu 6 kryteriów, przy zastosowaniu funkcji uogólnionej użyteczności U^I i U^{III} .

$$U^I(y_1, y_2, \dots, y_6) = \sum_{j=1}^6 w_j \xi_j(y_j) = \sum_{j=1}^6 w_j \frac{y_j - y_{jG}}{y_{jL} - y_{jG}} \quad (6)$$

gdzie:

$$\sum_{j=1}^6 w_j = 1$$

oraz $0 < w_j < 1$, w_j – wagi dla poszczególnych kryteriów.

$$\xi_j(y) = \frac{y_j - y_{jG}}{y_{jL} - y_{jG}},$$

$\xi_j(y)$ – funkcja dla j -tego kryterium,
 y_j – wartość w danym punkcie dziedziny eksperymentu dla j -tego kryterium,
 y_{jG} – wartość gorsza dla j -tego kryterium,
 y_{jL} – wartość lepsza dla j -tego kryterium.

$$U^{III}(y_1, y_2, \dots, y_6) = \exp \left[- \sum_{j=1}^6 w_j \exp \left(- \frac{y_j - y_{jG}}{y_{jL} - y_{jG}} \right) \right] \quad (7)$$

Jako kryteria optymalizacji przyjęto:

- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, maks f_{c28} ,
- maksimum modułu Younga po 28 dniach dojrzewania, maks E_c ,
- maksimum współczynnika intensywności naprężeń badanego według I modelu pęknięcia, maks K_{IC} ,
- minimum nasiąkliwości betonu, min n_w ,
- minimum wodoprzepuszczalności betonu, określonej maksymalną głębokością przesiąkania wody w mm, min w_b ,
- minimum skurczu, min ε_s .

Rozwiązań preferowanych poszukiwano w obszarze rozwiązań dopuszczalnych

$$\Omega = \{(x_1, x_2): x_1^2 \leq 1, x_2^2 \leq 1\}$$

dwuwymiarowej przestrzeni zmiennych decyzyjnych,

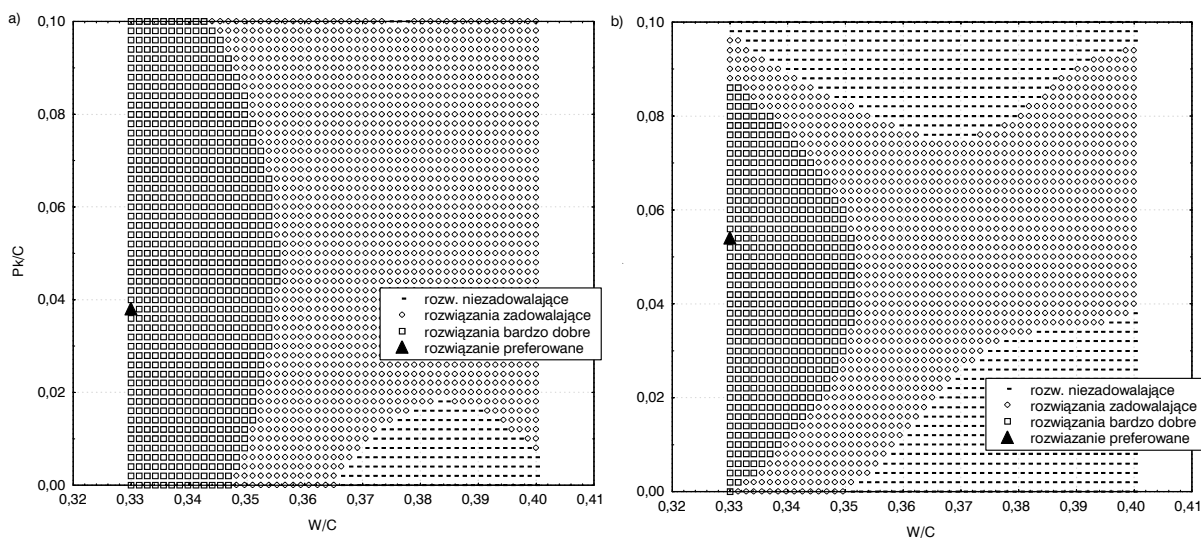
zmieniających się w przedziale od -1 do 1 i odpowiadających, wraz z wartościami pośrednimi, przyjętym zmiennym wartościom W/C i Pk/C (tab. 1).

W wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej otrzymano zbiory rozwiązań zadowolających oraz bardzo dobrych wraz z punktami preferowanymi z uwagi na przyjęte kryteria i funkcje optymalizacyjne, a tym samym rozwiązania preferowane w zakresie składu betonów (rys. 3, tab. 2).

6. Podsumowanie

Na proces projektowania mieszanki betonowej składa się dobór składników, a następnie określenie ich proporcji w taki sposób, aby otrzymany materiał uzyskał oczekiwane właściwości. Niektóre z tych właściwości mogą być zbadane w krótkim okresie czasu (konsystencja, urabialność), w dłuższym (wytrzymałość, moduł sprężystości), a nawet w bardzo długim (skurcz, pęcznienie).

Współczesna technologia BWW, mając na celu wypracowanie systemu eksperckiego, pomocnego w projektowaniu betonów, dąży do stworzenia modeli, które wiązałyby ze sobą materiały składowe mieszanki betonowej (czynniki sterujące) z parametrami betonu. Aby stworzyć takie zależności, badacze betonu odnoszą się do modelu teoretyczno-doświadczalnego analizując cechy betonu stwardniałego na podstawie uzyskanych danych doświadczalnych. Umożliwia to przejście od właściwości betonu do cech jego matrycy, powiązanej z kolei z dwoma głównymi parametrami składu mieszanki, tj. proporcjami woda/cement (W/C) i np. pył krzemionkowy/cement (Pk/C). Działania te przyczyniają się do bardziej precyzyjnego ustalania składu współczesnych betonów wysokowartościowych, a więc i zbliżenia ich rzeczywistych



Rys. 3. Zbiory rozwiązań zadowolających oraz bardzo dobrych wraz z punktami preferowanymi z uwagi na przyjęte kryteria i funkcje użyteczności: $U^I(a)$ i $U^{III}(b)$

Tabela 2. Obliczone ilości składników dla rozwiązań preferowanych z uwagi na przyjęte kryteria i wartości funkcji użyteczności

Funkcja	Współrzędne punktów preferowanych				Ilość składników [kg/m ³]				
	x ₁	x ₂	W/C	Pk/C	C	P	K	W	Pk
U ^I	-1	-0,24	0,33	0,0380	550	420,84	1256,918	181,51	21,023
U ^{III}	-1	0,08	0,33	0,0540	550	415,287	1256,849	181,518	29,659
Wartości kryteriów								Wartość funkcji użyteczności	
f _{c28} MPa	E ₂₈ GPa		K _{Ic} MN/m ^{3/2}		η _w %	w _b mm	ε _s	U ^I	U ^{III}
86,861642	54,704315		0,951785		3,575134	14,498913	0,022463	2,915306	0,907523
89,060895	54,369001		0,928038		3,449719	13,008729	0,022703	2,856189	0,920773

właściwości do właściwości zakładanych w trakcie projektowania. W każdym przypadku konieczne jest doświadczalne sprawdzenie doboru składników w konkretnych warunkach, jednak znajomość rozwiązań optymalnych oraz zależności określających wpływ składników na właściwości betonu znacznie zmniejsza liczbę doświadczeń i przyczynia się do ustalenia podstaw normatywnych w zakresie projektowania BWW i konstrukcji z BWW.

Analiza współczesnych metod ustalania składu betonów wysokowartościowych prowadzi do następujących wniosków:

- Znajomość cech betonu zwykłego, jako materiału konstrukcyjnego, wpływa na formy budowli.
- Technologia betonów nowej generacji stawia konkretne wymagania co do zespołu cech betonu odpowiadających określonym formom i funkcjom budowli.
- Z uwagi na wzrost liczby kryteriów i zmiennych, jakie muszą być brane pod uwagę w procedurze projektowania składu mieszanki, nieekonomiczne staje się doświadczalne określanie składu betonu metodą kolejnych przybliżeń.
- Ustalanie proporcji składników BWW może odbywać się za pomocą analitycznych lub numerycznych metod optymalizacji bądź statystycznych metod planowania doświadczeń.
- Wzrosły możliwości sterowania cechami betonu i jego odmian, co zwiększa zakres stosowania tego kompozytu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kurdowski W., Trybalska B., Zastosowanie elektronowej mikroskopii skaningowej do badania zaczynu cementowego. III Konferencja Naukowo-Techniczna, Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej, Matbud' 2000
- [2] Halbiniak J., Analiza wpływu warstwy przejściowej kruszywo-zaczynu cementowy na proces zniszczenia betonów konstrukcyjnych. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1999 (nie publikowana)
- [3] Śliwiński J., Zasady projektowania składu betonów wysokowartościowych. CWB 6/2003
- [4] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Górażdże Cement, Wyd. Instytut Śląski w Opolu 2002
- [5] Glinicki M. A., Kasperkiewicz J., Potrzebowski J., Betony

wysokowartościowe (BWW) do konstrukcji inżynierskich. XLI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Kraków-Krynica 1995, s. 13-20

[6] Jasiczak J., Mikołajczyk P., Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997

[7] Król M., Aspekty technologiczne betonów wysokich wytrzymałości. Przegląd Budowlany, 8-9/92, s. 348-350

[8] Kucharska L., Brandt A. M., Skład, technologia i właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych. Inżynieria i Budownictwo, 9/93, s. 356-360.

[9] Mikołajczyk J., Technologia betonów wysokiej wytrzymałości. Przegląd Budowlany, 8-9/92, s. 355-358

[10] De Larrard F., The Influence of Mix Composition on Mechanical Properties of High-Performance Silica Fume Concrete. 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, May 1992

[11] Franczyk M., Prokopski G., Badania betonów wysokowartościowych-modyfikacja wzoru Féreta. Przegląd Budowlany, 4/2000, s. 4-7

[12] Franczyk M., Wpływ składu mieszanki betonowej na właściwości betonu wysokowartościowego.

Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2002 (nie publikowana)

[13] Bhanja S., Sengupta, Modified water-cement ratio law for silica fume concretes. Cem. Concr. Res., Vol. 32, 2003

[14] Brandt A.M. i inni, Metody optymalizacji materiałów kompozytowych o matrycach cementowych. Studia z zakresu inżynierii, nr 38, IPPT PAN, Warszawa 1994

www.przegladbudowlany.pl/archiwum.html

