

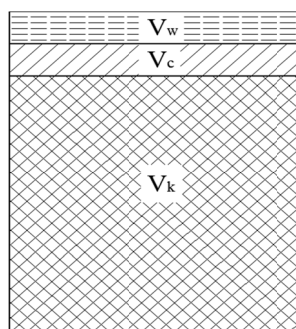
15. KSZTAŁTOWANIE STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO

1. WPROWADZENIE

Nowoczesne kompozyty cementowe to grupa materiałów budowlanych o bardzo szerokim zakresie zastosowań, wynikającym z możliwości swobodnego kształtowania ich właściwości. Jest to możliwe głównie dzięki zastosowaniu najnowocześniejszych domieszek chemicznych i/lub dodatków mineralnych, przyjęcia odpowiedniej metodyki projektowania składu mieszanki oraz starannego wykonania i pielęgnacji świeżego betonu. Należy wyraźnie podkreślić, że doświadczenia praktyczne w zakresie technologii betonu wysokowartościowego znacznie wyprzedzają rozważania teoretyczne. Doprowadziło to do sytuacji, w której w praktyce przemysłowej stosowane są przede wszystkim doświadczalne metody projektowania betonów o założonych właściwościach. Jest to podejście wiążące się na ogół z koniecznością realizowania szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych, mających na celu ustalenie empirycznych związków pomiędzy składem ilościowym i jakościowym a określonymi właściwościami mieszanki betonowej i betonu.

Powyższy problem w znacznym stopniu eliminuje podejście polegające na zastosowaniu metod analityczno-doświadczalnych, wykorzystujących zależności matematyczne ilustrujące wspomniane wyżej związki. Spośród tej grupy metod stosowana jest przede wszystkim powszechnie znana metoda trzech równań oraz jej liczne uogólnienia i modyfikacje.

Metoda trzech równań umożliwia wyznaczenie – przy uwzględnieniu docelowych właściwości mieszanki betonowej i betonu – ilości cementu, kruszywa i wody. Obliczenie poszukiwanych wartości opiera się na bilansie objętościowym tych składników (rys. 1) oraz na uproszczonych warunkach wytrzymałości i konsystencji.



Rys. 1. Udział objętościowy składników tradycyjnej mieszanki betonowej: V_w – objętość wody, V_c – objętość cementu, V_k – objętość kruszywa

Fig. 1. Volume fracture of traditional concrete mixture: V_w – water volume, V_c – cement volume, V_k – aggregate volume

Wyznaczenie poszukiwanych wartości polega na rozwiązaniu układu trzech równań: wytrzymałości, szczelności i wodozadržności. W procesie projektowania składu mieszanki betonowej, najważniejszym założonym parametrem jest zazwyczaj wytrzymałość stwardniałego kompozytu. Lata doświadczeń praktycznych wykazały jednak, że metoda trzech równań jest m.in. w tym zakresie metodą ograniczoną. Przewidywana wytrzymałość określana jest w tej metodzie ze wzoru Bolomeya:

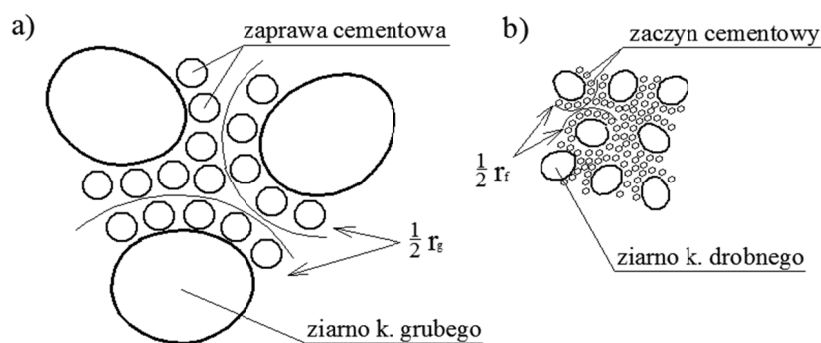
$$f_{cm} = A \cdot \left(\frac{m_c}{m_w} \pm a \right), \text{ MPa} \quad (1)$$

w którym:

- f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie, MPa,
- A – współczynnik zależny od klasy cementu i rodzaju użytego kruszywa, -
- a – współczynnik zależny od stosunku wodno-cementowego, -
- m_c – masa cementu, kg,
- m_w – masa wody, kg.

Powyższe równanie pozwala zaprojektować jedynie beton o stosunkowo niskiej wartości tej cechy mechanicznej (około 50÷60 MPa). Istotnym problemem jest tutaj brak uwzględnienia stopnia rozdrobnienia i przestrzennej konfiguracji składników. Powoduje to rozbieżność pomiędzy wytrzymałością obliczoną i rzeczywistą, przede wszystkim przy niskich wartościach stosunku wodno-cementowego. Występują ponadto trudności w uwzględnieniu domieszek i dodatków oraz ich wpływu m.in. na konsystencję mieszanki, strukturę porów powietrznych i wytrzymałość betonu.

Uogólnieniem metody trzech równań jest metoda podwójnego otulenia opracowana przez Paszkowskiego ([6] i in.). W podejściu tym stosuje się wybrane aspekty uproszczonego kształtowania makrostruktury. Zakłada się, że ziarna kruszywa drobnego zostają otoczone warstwą zaczynu, natomiast większe ziarna otacza warstwa zaprawy (rys. 2). Grubości otulenia są uwarunkowane wymaganą urabialnością mieszanki betonowej, uwzględniającą skuteczność zagęszczenia mieszanki oraz intensywność zbrojenia i kształt elementu.



Rys. 2. Model W. Paszkowskiego: a) ziarna kruszywa grubego otulone warstwą zaprawy o grubości $1/2 r_g$, b) ziarna kruszywa drobnego otulone warstwą zaczynu cementowego o grubości $1/2 r_f$

Fig. 2. W. Paszkowski's model: a) coarse aggregate grains coated by mortar layer with a thickness of $1/2 r_g$, b) fine aggregate grains coated by cement paste layer with a thickness of $1/2 r_f$

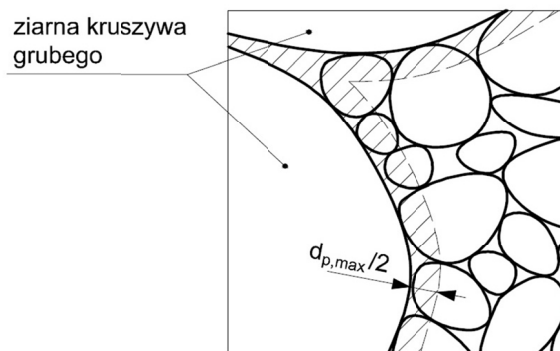
Uproszczone podejście do problemu kształtowania struktury znajduje ujęcie w opisie matematycznym. Znana ilość kruszywa grubego i drobnego pozwala obliczyć ilość zaczynu cementowego oraz kolejno: cementu, wody oraz zaprawy. W metodzie stosuje się tzw. równanie charakterystyczne, pozwalające na wyznaczenie ilości kruszywa grubego:

$$K_g = \frac{(1-j_g) \cdot \rho_g}{1 + F_g \cdot \frac{r_g}{2}} \cdot 1000, \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

w którym:

- j_g – jamistość kruszywa grubego, -
- ρ_g – gęstość kruszywa grubego, kg/m^3 ,
- F_g – powierzchnia zewnętrzna kruszywa grubego, dm^3/kg ,
- $r_g/2$ – promień otulenia ziaren kruszywa grubego zaprawą, dm.

Podobnie jak w klasycznej metodzie trzech równań, również tutaj stosowany jest wzór wytrzymałościowy Bolomeya. Jest on jednak nieprzydatny do projektowania betonów wysokowartościowych. Ponadto, nieuzasadniony wydaje się podział stosu okrucowego kruszywa na żwir i piasek. Średnice ziaren tych kruszyw są bowiem tego samego rzędu wielkości i zmieniają się w sposób ciągły. Liczne analizy szczelności upakowania ziaren, prowadzone i opublikowane m.in. przez J.D. Dewara w pracach [3] oraz [4], wykazały, że im bardziej zbliżone są wielkości ziaren mieszanych ośrodków ziarnistych, tym bardziej zauważalny jest tzw. wewnętrzny efekt ściany. Jego istotą jest brak możliwości całkowitego wypełnienia kruszywem drobnym przestrzeni międzyziarnowych kruszywa grubego bez jednoczesnego spulchnienia (rys. 3). W kontekście kształtowania struktury betonu wysokowartościowego, problem ten został podniesiony przez A. Świtońskiego w monografii [8]. Zagadnienie to było także rozpatrywane przez F. de Larrarda [1].



Rys. 3. Graficzna ilustracja wewnętrznego efektu ściany wg [5]: $d_{p,max}$ – maksymalna średnica ziaren kruszywa drobnego

Fig. 3. Graphic illustration of internal wall effect by [5]: $d_{p,max}$ – the maximum fine aggregate grain diameter

Wraz z postępowaniem w technologii betonu, upowszechniło się wprowadzanie do składu mieszanki dodatków mineralnych. Stosowane są one m.in. w celu zmniejszenia zużycia spoiwa (np. popioły lotne) czy też dla osiągnięcia polepszonych właściwości wytrzymałościowych (mikrokrzemionka).

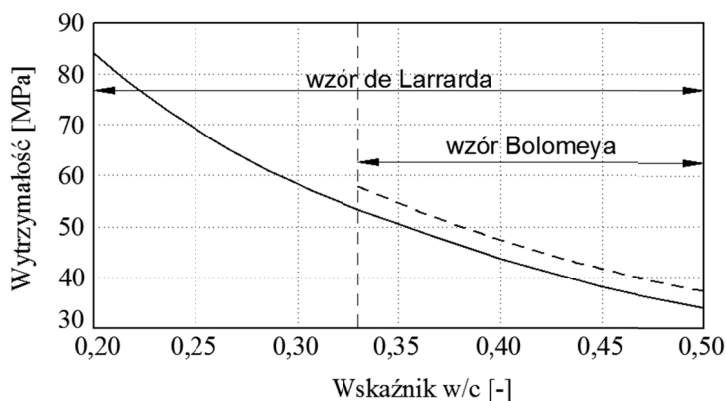
Zależność między wytrzymałością betonu a ilością poszczególnych składników zaczynu cementowego z dodatkiem pyłu krzemionkowego przytacza F. de Larrard [2]:

$$f_{c28} = \frac{\alpha_k \cdot R_c}{\left[\frac{1+3,1\omega}{1,4-0,4\exp\left(-11\frac{m_m}{m_c}\right)} \right]^2}, \text{ MPa} \quad (3)$$

w którym:

- f_{c28} – wytrzymałość betonu na ściskanie badania po 28 dniach, MPa,
- α_k – współczynnik uwzględniający wpływ rodzaju stosowanego kruszywa, -,
- R_c – rzeczywista wytrzymałość cementu, MPa,
- ω – wskaźnik wodno-cementowy, -,
- m_m – masa mikrokrzemionki, kg.

Powyższy wzór jest jedną z wielu empirycznie ustalonych zależności pomiędzy składem ilościowym zaczynu a wytrzymałością betonu. Jej graficzna ilustracja, w zestawieniu z funkcją określoną wzorem Bolomeya, została przedstawiona na rys. 4. Wykorzystanie tego typu zależności wiąże się jednak z dość oczywistymi trudnościami, polegającymi na ich przydatności wyłącznie w przypadku zastosowania określonych komponentów. Każda modyfikacja jakościowa składu wymaga kalibracji opracowanego modelu, z czym wiążą się czasochłonne i niekiedy kosztowne badania laboratoryjne.



Rys. 4. Wykres zależności wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach twardnienia bez dodatku pyłu krzemionkowego, od wskaźnika w/c wg de Larrarda (linia ciągła) oraz wg Bolomeya (linia przerywana) [7]

Fig. 4. Dependency between 28-day compressive strength of concrete without microsilica fume addition and w/c ratio by de Larrard (solid) and by Bolomey (dotted) [7]

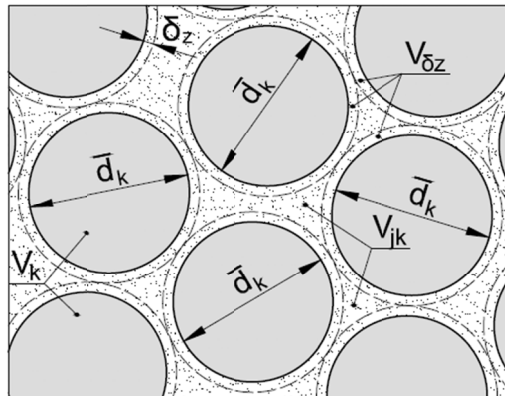
Biorąc pod uwagę powyższe, należy stwierdzić, że wciąż brakuje dostatecznie prostej i uniwersalnej metody projektowania betonu wysokowartościowego. Problem ten trzeba uznać za wymagający rozwiązania przede wszystkim z uwagi na rosnącą popularność tej grupy materiałów budowlanych. Autorzy postawili tezę mówiącą, że wszelkie właściwości mechaniczne i użytkowe betonu są wynikiem ukształtowania jego struktury oraz właściwości komponentów. Zatem odpowiedni dobór jakościowy składników mieszanki betonowej, uzupełniony przez przyjęcie określonego zestawu parametrów geometrycznych opisujących geometryczny stan struktury, gwarantuje uzyskanie betonu o z góry założonych cechach.

W niniejszej pracy autorzy podjęli się rozwiązania problemu sformułowania podstawowych przesłanek analityczno-doświadczalnej metody kształtowania struktury betonu o założonych cechach wytrzymałościowych. Zostanie wykorzystany geometryczny model struktury A. Świtońskiego, zaprezentowanego m.in. w monografii [8]. Uogólnienie tego modelu oraz weryfikację eksperymentalną wybranych założeń przedstawiono w pracy [5].

2. GEOMETRYCZNY MODEL STRUKTURY MIESZANKI BETONOWEJ

W rozważaniach za punkt wyjścia przyjęto model struktury betonu zaprezentowany przez Świtońskiego w pracy [8]. Proponowany model traktuje mieszankę betonową jako ośrodek dyspersyjny, w którym faza stała jest losowo rozmieszczona w fazie ciekłej. Z uwagi na zróżnicowany stopień rozdrobnienia poszczególnych składników oraz dużą ilość zjawisk niemożliwych do rozważenia na jednym poziomie obserwacji, model należy rozpatrywać na trzech stopniach dyspersyjności fazy stałej.

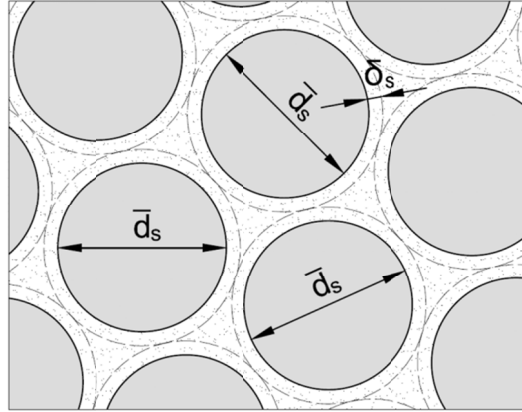
Makrolokalny poziom modelu struktury opisuje mieszankę betonową jako ośrodek dyspersyjny, w którym ziarna fazy stałej (kruszywa) o uśrednionej średnicy \bar{d}_k są losowo rozmieszczone w otaczającej ją fazie ciekłej (zaczynie cementowym) (rys. 5). Ziarna kruszywa są otoczone warstwą zaczynu o grubości δ_z , a szczelność ich układu wraz z otoczkami wynosi s_{kb} .



Rys. 5. Model struktury mieszanki betonowej na poziomie makrolokalnym

Fig. 5. The model of structure of concrete mixture – macrolocal level

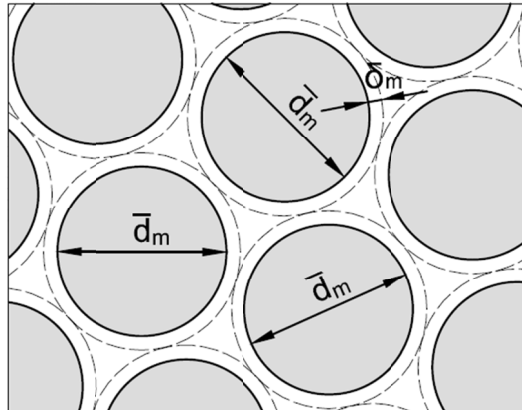
Mikrolokalny poziom modelu struktury opisuje zaczyn cementowy jako zawiesinę, w której ziarna fazy stałej (cementu z ewentualnym dodatkiem popiołów lotnych) o uśrednionej średnicy d_s są losowo rozmieszczone w otaczającej ją fazie ciekłej (rys. 6). Ziarna kruszywa są otoczone warstwą fazy ciekłej o grubości δ_s , a szczelność ich układu wraz z otoczkami wynosi s_{sz} .



Rys. 6. Mikrolokalny model struktury zaczynu cementowego

Fig. 6. The model of structure of cement paste – microlocal level

Submikrolokalny poziom modelu struktury zakłada, że ziarna mikrowypełniacza o średniej średnicy \bar{d}_m tworzą wraz z otaczającą je warstwą wody o grubości δ_m układ możliwie najszczelniej upakowanych w przestrzeni kul. Pozostała ilość wody wypełnia jamy tak założonego układu (rys. 7).



Rys. 7. Submikrolokalny model wodnej zawiesiny mikrokrzemionki

Fig. 7. The model of structure of microsilica water suspension – submicrolocal level

Zaprezentowane powyżej podstawowe założenia analizowanego modelu struktury stwarzają możliwość sformułowania opisu matematycznego przestrzennej konfiguracji składników na poszczególnych poziomach dyspersyjności. Przykładowe równanie zapisane dla poziomu makrolokalnego przyjmuje postać [8]:

$$\left(\frac{\bar{d}_k}{2} + \delta_z\right)^3 = \left(\frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_w}{\rho_w}\right) \cdot S_{kb} \cdot \frac{\rho_k}{m_k} \cdot \left(\frac{\bar{d}_k}{2}\right)^3 \quad (4)$$

gdzie:

\bar{d}_k – średnia średnica ziaren kruszywa, m,

δ_z – średnia grubość otulenia ziaren kruszywa zaczynem cementowym, m,

m_k – masa kruszywa, kg,
 m_c – masa cementu, kg,
 m_p – masa popiołu lotnego, kg,
 m_m – masa mikrokrzemionki, kg,
 m_w – masa wody, kg,
 ρ_k – gęstość kruszywa, kg/m³,
 ρ_c – cementu, kg/m³,
 ρ_p – gęstość popiołu lotnego, kg/m³,
 ρ_m – gęstość mikrokrzemionki, kg/m³,
 ρ_w – gęstość wody, kg/m³,
 s_{kb} – szczelność układu ziaren kruszywa w betonie, -.

Podobne zależności można zapisać dla poziomów: mikro- oraz submikrolokalnego modelu struktury. Szczegółową analizę tego zagadnienia przedstawiono w pracy [8]. Rozwiązaniem równań opisujących stan struktury na poszczególnych poziomach dyspersyjności jest zestaw parametrów geometrycznych opisujących grubości otulenia ziaren fazy stałej fazą ciekłą. Analiza wpływu parametrów poziomu makro i mikrolokalnego na właściwości mieszanki betonowej i betonu zostanie przedstawiona w rozdziale 3.

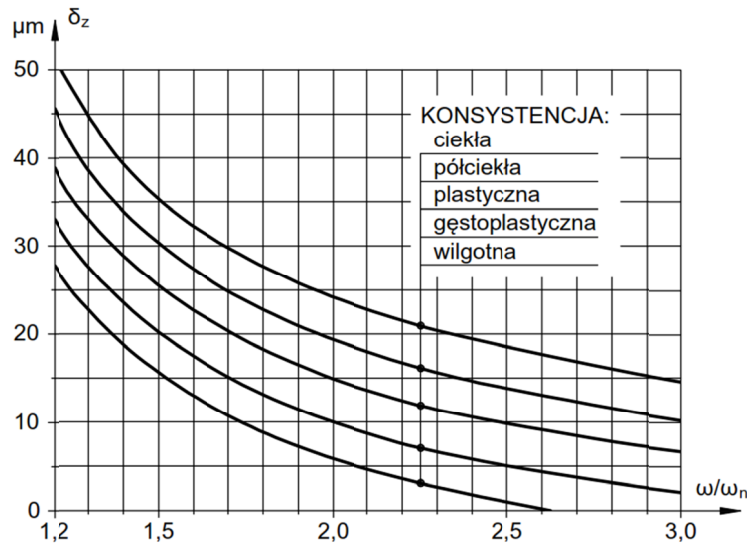
3. ZARYS METODY KSZTAŁTOWANIA STRUKTURY BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO

Rozwiązując równanie (4) względem niewiadomej δ_z , można sformułować zależność służącą do wyznaczania średniej grubości zaczynu cementowego otaczającego ziarna spoiwa:

$$\delta_z = \frac{\bar{d}_k}{2} \left[\sqrt[3]{\left(\frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_w}{\rho_w} \right) \cdot s_{kb} \cdot \frac{\rho_k}{m_k} - 1} \right], \text{ m} \quad (5)$$

Parametr ten wywiera najistotniejszy wpływ na właściwości mieszanki betonowej, w szczególności na urabialność i konsystencję. Dobierając zatem odpowiednią grubość tej warstwy oraz ciekłość zaczynu, można świadomie kształtować te cechy mieszanki. Wyniki badań w tym zakresie przedstawiono i omówiono w pracy [9] (rys. 8).

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że przytoczona analiza została przeprowadzona dla zaczynów bez domieszek korygujących ciekłość zaczynu cementowego. W przypadku użycia plastyfikatorów i superplastyfikatorów konieczne jest zatem przeprowadzenie badań mających na celu określenie równoważnych wartości stosunku ω/ω_n , zależnych od rodzaju i ilości zastosowanej domieszki.



Rys. 8. Zależność pomiędzy ciekłością zaczynu i grubością otulenia a konsystencją mieszanki betonowej; ω – stosunek wodno-cementowy, ω_n – wodożądność normowa spoiwa

Fig. 8. Dependency between cement paste fluidity and coating layer thickness and consistency of concrete mixture; ω – water/cement ratio, ω_n – normative water-demand

Grubość otulenia ziaren spoiwa fazą ciekłą określić można na podstawie znanego składu z zależności stanowiącej rozwiązanie opisu matematycznego mikrolokalnego modelu struktury:

$$\delta_s = \frac{\bar{d}_s}{2} \left[\sqrt[3]{\left(\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_w}{\rho_w} \right) \cdot s_{sz} \cdot \frac{\rho_{cp}}{m_c + m_p} - 1} \right], \text{ m} \quad (6)$$

gdzie:

- \bar{d}_s – średnia średnica ziaren spoiwa, m,
- δ_s – średnia grubość otulenia ziaren spoiwa fazą ciekłą, m,
- s_{sz} – szczelność układu ziaren spoiwa w zaczynie cementowym, -,
- ρ_{cp} – średnia gęstość cementu i popiołu lotnego, kg/m^3 .

Występującą we wzorze szczelność układu ziaren spoiwa można wyznaczyć z zależności [8]:

$$s_{sz} = \frac{\rho_w + 0,45 \cdot \omega_n \cdot \rho_c}{\rho_w + \omega_n \cdot \rho_c} \quad (7)$$

W przypadku braku możliwości oszacowania szczelności układu ziaren spoiwa w zaczynie, można przystąpić do obliczenia grubości otulenia przyjmując $s_{sz} = 1$.

Sformułowane zależności (6) umożliwiają wyznaczenie najważniejszego parametru struktury zaczynu cementowego. W sensie fizycznym wielkość ta wyraża połowę średniej odległości pomiędzy ziarnami, co w zestawieniu ze średnią średnicą w sposób jednoznaczny opisuje stan struktury modelowego zaczynu cementowego. Parametr ten stanowi podstawę analizy prowadzącej do opracowania równania wytrzymałości betonu wysokowartościowego. Szczegółowa analiza tego zagadnienia została przeprowadzona

w pracach A. Świtońskiego w monografiach: [8] oraz [9]. Na tej podstawie, w pracy [5] podano następującą zależność:

$$f_{cm} = \alpha_m \cdot \alpha_g \cdot R_c \cdot \frac{\sqrt[3]{1 + 0,5 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_w}} - 1}{\sqrt[3]{1 + \omega_m \cdot \frac{\rho_c}{\rho_w}} - 1}, \text{ MPa} \quad (8)$$

w której:

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie, MPa,

α_m – współczynnik uwzględniający wpływ pyłu krzemionkowego na wytrzymałość betonu, -,

α_g – współczynnik uwzględniający wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość betonu, -,

R_c – wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej o stosunku wodno-cementowym równym 0,5, MPa,

ω_m – stosunek masy wody do masy spoiwa z dodatkiem mikrokrzemionki, -.

Przytoczone wyżej zależności, szczególnie (5) oraz (8), mają duże znaczenie praktyczne. Stwarzają one bowiem możliwość sformułowania nowej, analityczno-doświadczalnej metody projektowania betonu wysokowartościowego. Zależność (5) może z powodzeniem zastąpić tradycyjne równanie wodożądności, które w dobie powszechnego stosowania domieszek i dodatków nie ma praktycznego zastosowania. Nowe równanie wytrzymałości (8) jest szczególnie przydatne do projektowania betonów o ekstremalnie niskich wartościach stosunku wodno-cementowego. Weryfikacja doświadczalna przeprowadzona w pracy [5] potwierdza wysoką zgodność wartości obliczonych z wytrzymałościami otrzymanymi podczas badań laboratoryjnych.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule autorzy przeprowadzili zwięzłą analizę procesu kształtowania struktury betonu wysokowartościowego o z góry założonych cechach, takich jak konsystencja mieszanki oraz wytrzymałość. Przytoczono podstawowe założenia geometrycznego modelu struktury świeżej mieszanki, zaprezentowanego i szczegółowo omówionego w pracy [8]. Wskazano na możliwość wykorzystania opisu matematycznego w nowej, analityczno-doświadczalnej metodzie projektowania betonu. Wykazano, że uzyskanie pożądanych cech technicznych jest możliwe dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu struktury świeżej mieszanki betonowej. Zaproponowana metoda może zastąpić m.in. tradycyjną metodę opierającą się na równaniu wytrzymałości Bolomeya.

LITERATURA

- [1] De Larrard F., 1999. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. E & FN Spon, London and New York.
- [2] De Larrard F., Gorse J.F., Puch C., 1992. Comparative study of various silica fume additives in high performance cementitious materials. Materials and Structures.

- [3] Dewar J.D., 1999. Computer modeling of concrete mixtures. E & FN Spon London.
- [4] Dewar J.D., 1986. The particle structure of fresh concrete. Institute of Concrete Technology London.
- [5] Mrozik Ł., 2012. Model struktury i wytrzymałość betonu wysokowartościowego. Rozprawa doktorska, UTP Bydgoszcz.
- [6] Śliwiński J., 1999. Beton zwykły. Projektowanie i podstawowe właściwości. Wydawnictwo Polski Cement Kraków.
- [7] Śliwiński J., 2003. Zasady projektowania składu betonów wysokowartościowych. Cement-Wapno-Beton 6.
- [8] Świtoński A., 2004. Struktura i wytrzymałość betonów wysokowartościowych. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.
- [9] Świtoński A., 1993. Kształtowanie struktury i wytrzymałości betonu. Wydawnictwa Wyższej Szkoły Inżynierskiej Opole.

CREATING STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Summary. High performance concrete (HPC) is modern cement-aggregate composite gaining increasing popularity. The main reason of this trend is virtually unfettered moulding of concrete mixture and hardened concrete structure. This creates more opportunities for architects and investors. It should be noted, that Niven the growing popularity of HPC, there are still many theoretical problems requiring solutions. One is the need to establish a simple dependence between quantitative and qualitative composition and fresh and hardened concrete properties.

This article is an attempt to formulate an outline of the design method for high performance concrete with pre-established properties. In this analysis, the assumption of geometric structure model of concrete mixture proposed by A. Świtoński has been shown. Analytical and experimental relationships between structure parameters and concrete mixture and hardened concrete has been presented.