



dr inż. Paweł ŁUKOWSKI
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych

POLIMEROWO-CEMENTOWA ZAPRAWA NAPRAWCZA O PODWYŻSZONEJ PRZYCZEPNOŚCI DO BETONU

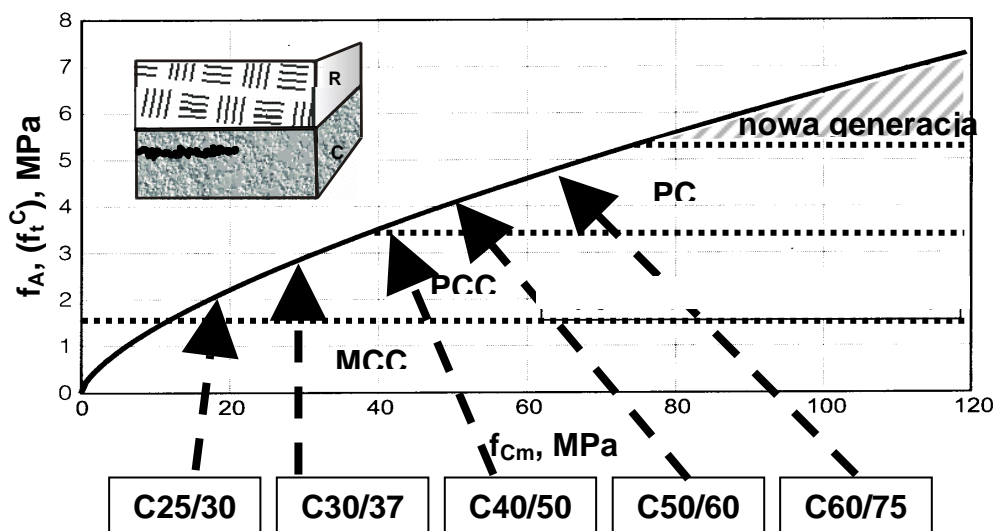
POLYMER-CEMENT REPAIR MORTAR OF HIGH BOND STRENGTH TO CONCRETE

Streszczenie Zapewnienie odpowiedniej przyczepności materiału naprawczego do podłoża jest podstawowym warunkiem skuteczności i trwałości naprawy bądź ochrony przed korozją. W artykule przedstawiono wyniki projektu badawczego, którego celem było uzyskanie polimerowo-cementowej zaprawy naprawczej o podwyższonej przyczepności do podkładu betonowego. Na podstawie wyników badań wstępnych wybrano jako najbardziej obiecujący modyfikator akrylowy. Przeprowadzenie wielokryterialnej optymalizacji materiałowej, której podstawą był statystyczno-eksperymentalny model materiałowy kompozytu, pozwoliło na sformułowanie składu zaprawy zapewniającego bardzo wysoką adhezję do betonu. Wyniki badań weryfikacyjnych potwierdziły, że oprócz podwyższonej przyczepności do podkładu betonowego, uzyskana zaprawa charakteryzuje się także dobrymi lub bardzo dobrymi wartościami innych ważnych właściwości technicznych, spełniając wysokie wymagania stawiane wyrobom do napraw konstrukcji betonowych, na przykład przez normę PN-EN 1054-3.

Abstract Proper adhesion of the repair material to the substrate is basic condition of effectiveness and durability of repair or anti-corrosion protection. Results of research project, aimed at obtaining the polymer-cement mortar of high bond strength to concrete, have been presented in the paper. The acrylic modifier has been selected on the basis of introductory tests as the most promising one. Multi-criteria optimisation, based on the statistical-experimental material model of the composite, has been carried out and composition of PCC mortar of high bond strength has been formulated. Results of verifying tests have confirmed that besides of the improved adhesion, the obtained mortar has also good or very good values of other important properties and thus meets the stringent requirements for repair materials, given for example in the European Standard EN 1054-3.

1. Wprowadzenie

Zapewnienie odpowiedniej przyczepności w układzie „materiał naprawczy – podłoże” stanowi podstawowy warunek skuteczności i trwałości naprawy bądź ochrony przed korozją. Adhezja w złączu (f_A) powinna przewyższać wytrzymałość na rozciąganie elementów łączonych, przy czym zgodnie z EN 1504 wytrzymałość materiału naprawczego (f_t^N) powinna być nie mniejsza od wytrzymałości podkładu betonowego (f_t^B): $f_A > f_t^N \geq f_t^B$. Oznacza to, że naprawa betonów wysokiej wytrzymałości będzie wymagała opracowania materiałów naprawczych nowej generacji o znacznie podwyższonej przyczepności do naprawianego podkładu betonowego (rys. 1).



Rys. 1. Wymagany poziom adhezji w zależności od klasy wytrzymałości naprawianego betonu. Możliwość przeprowadzenia naprawy przy użyciu: MCC – modyfikowanych betonów/zapraw cementowych, PCC – betonów/zapraw polimerowo-cementowych, PC – betonów/zapraw polimerowych [1]

Dodatek modyfikatora polimerowego może poprawiać przyczepność kompozytów polimerowo-cementowych (PCC – ang. Polymer-Cement Composite) do podkładu betonowego. Celem opisywanego projektu było opracowanie zaprawy o spoiwie polimerowo-cementowym, która ze względu na wysoką przyczepność do betonu, przy co najmniej nie pogorszonych innych właściwościach, spełniałaby wymagania stawiane materiałom naprawczym nowej generacji – przeznaczonym do napraw betonów wysokiej wytrzymałości.

2. Badania wstępne

Do badań rozpoznawczych, których celem było dobranie rodzaju modyfikatora polimerowego, wybrano sześć dostępnych na rynku preparatów (tabl. 1).

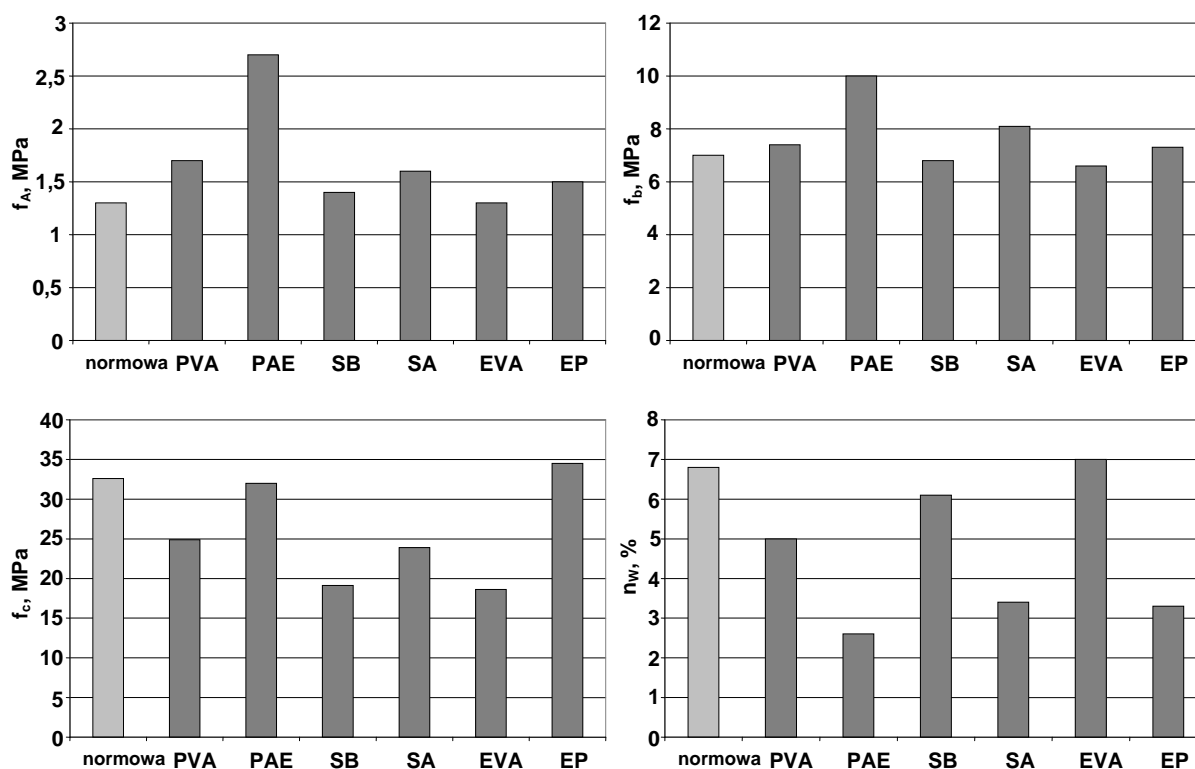
Tablica 1. Modyfikatory polimerowe do badań rozpoznawczych

Lp	Polimer	Skrót	Forma	Zaw. części stałych, %	MFT, °C
1	Poliester akrylowy	PAE	dyspersja wodna	40% ± 1%,	~ 0
2	Kopolimer etylenowo-winylowy	EVA	dyspersja wodna	53% ± 1%,	0
3	Kopolimer styrenowo-butadienowy	SB	dyspersja wodna	65% ± 1%,	~ 15
4	Kopolimer styrenowo-akrylowy	SA	dyspersja wodna	50% ± 1%,	20
5	Polialkohol winylowy	PVA	roztwór wodny	–	~ 10
6	Żywica epoksydowa	EP	żywica ciekła	–	–

MFT – minimalna temperatura tworzenia błony

Zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5. W ramach badań rozpoznawczych wykonano próbki zapraw o proporcji spoiwa do kruszywa (piasek normowy) odpowiadającej zaprawie normowej, to jest 1:3. Zawartość modyfikatora polimerowego wynosiła 15% w stosunku do masy cementu. Ilość wody zarobowej dobierano do konsystencji normowej. Materiał kontrolny stanowiła normowa zaprawa cementowa, niemodyfikowana, według PN-EN 196-1. Próbkę zapraw modyfikowanych dojrzewały w warunkach zalecanych przez Normy Europejskie (jedna doba w formach pod folią polietylenową, po rozformowaniu i intensywnym nawilżeniu dwie doby szczelnie zawinięte w folię, następnie przechowywanie w temperaturze $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $60\% \pm 5\%$).

Badano przyczepność do podłoża betonowego (beton o klasie wytrzymałości C 30/37), oraz wytrzymałość na zginanie i ściskanie, a także nasiąkliwość wodą (rys. 2), po 28 dniach dojrzewania.



Rys. 2. Wyniki badań wstępnych zapraw PCC: a) przyczepność do podkładu betonowego; b) wytrzymałość na zginanie; c) wytrzymałość na ściskanie; d) nasiąkliwość wodą (symbole modyfikatorów – por. tabl. 1)

Najbardziej obiecującym rozwiązaniem jest modyfikacja zaprawy cementowej dyspersją poliakrylanów (PAE). Przy zawartości polimeru 15% w stosunku do masy cementu zaprawa akrylowo-cementowa wyraźnie przewyższa inne badane materiały pod względem przyczepności do podkładu betonowego i wytrzymałości na zginanie. Również nasiąkliwość wodą zaprawy modyfikowanej PAE jest najkorzystniejsza. Jedynie pod względem wytrzymałości na ściskanie kompozyt ten ustępuje nieznacznie zaprawie modyfikowanej żywicą epoksydową i niemodyfikowanej zaprawie normowej.

3. Model materiałowy zaprawy akrylowo-cementowej

Jako zmienne materiałowe przyjęto:

- zawartość polimeru w stosunku do cementu, p/c (mas.), oraz
- zawartość spoiwa polimerowo-cementowego w stosunku do kruszywa, s/k (mas.).

Biorąc pod uwagę dotychczasowe doświadczenia oraz aspekt racjonalności ekonomicznej, zakres zmienności p/c określono na 0,10 do 0,25, a zakres zmienności s/k na 0,25 do 0,60.

Jako cechy kryterialne przyjęto najważniejszą rozważaną właściwość, to jest przyczepność do podkładu betonowego, oraz wytrzymałość na rozciąganie i nasiąkliwość wodą – cechy istotne dla materiału naprawczego. Przeprowadzenie optymalizacji materiałowej wymagało zastosowania statystycznego planu eksperymentu; wybrano plan kompozycyjny Boxa-Behnkena jako odpowiedni dla zagadnień technicznych przy dwóch zmiennych. Na podstawie

wyników badań sformułowano model materiałowy [2], tzn. ilościową zależność skład – właściwości, kompozytu akrylowo-cementowego (tabl. 2).

Tablica 2. Model materiałowy zaprawy akrylowo-cementowej

Właściwość	Zależność	Współczynnik determinacji, R^2
Przyczepność do podkładu betonowego, f_A	$f_A = 2,80 - 0,20 p/c - 0,49 (p/c)^2 - 0,04 s/k - 0,46 (s/k)^2 - 0,20 p/c \cdot s/k$	0,75
Wytrzymałość na rozciąganie, f_t	$f_t = 5,27 + 0,46 p/c - 0,66 (p/c)^2 + 0,81 s/k - 1,45 (s/k)^2 - 0,76 p/c \cdot s/k$	0,73
Wytrzymałość na ściskanie, f_c	$f_c = 37,33 + 2,12 p/c - 0,28 (p/c)^2 + 2,83 s/k + 0,17 (s/k)^2 - 0,58 p/c \cdot s/k$	0,75
Nasiąkliwość wodą, n_w	$n_w = 2,28 - 0,50 p/c + 0,34 (p/c)^2 - 0,47 s/k - 0,57 (s/k)^2 + 0,48 p/c \cdot s/k$	0,83

4. Opracowanie składu zaprawy o podwyższonej przyczepności do betonu

Wielokryterialną optymalizację składu zaprawy akrylowo-cementowej przeprowadzono stosując funkcję uogólnionej użyteczności materiałowej [3]. Pierwszym krokiem jest przyjęcie przedziałów zadowalających oraz wag, czyli ilościowo wyrażonych istotności poszczególnych cech kryterialnych (tabl. 3).

Tablica 3. Kryteria optymalizacji zaprawy akrylowo-cementowej

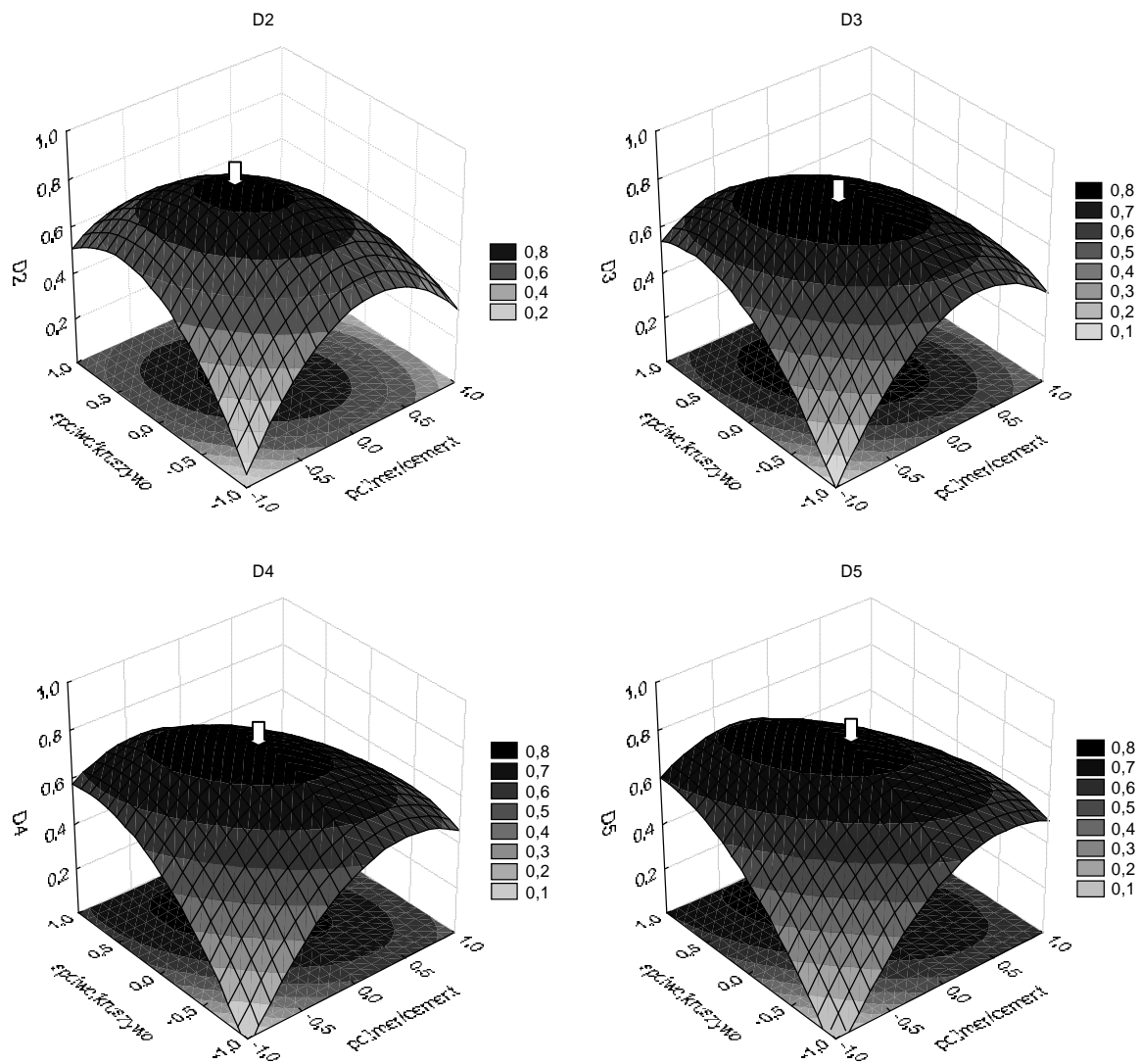
Cecha	Przedział zadowalający	Wagi – warianty				
		1	2	3	4	5
Przyczepność do podkładu	2,2 – 2,5 MPa	1	0,80	0,60	0,50	0,40
Wytrzymałość na rozciąganie	4,0 – 5,0 MPa	0	0,10	0,20	0,25	0,30
Nasiąkliwość wodą	2,5 – 2,0 %	0	0,10	0,20	0,25	0,30

W wariancie pierwszym jedynym kryterium jest przyczepność do podkładu betonowego; w kolejnych wariantach od 2 do 5 stopniowo coraz istotniejszą rolę odgrywają pozostałe cechy – wytrzymałość na rozciąganie i nasiąkliwość wodą.

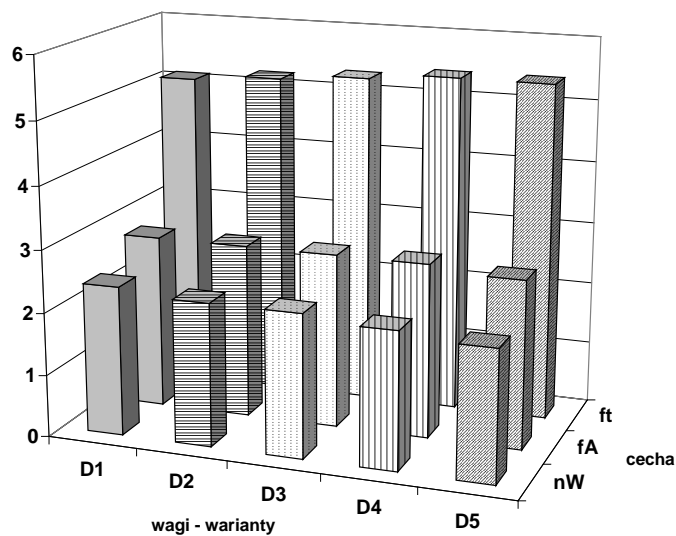
Obliczono wartości uogólnionej użyteczności przy powyższych kryteriach, a następnie sformułowano odpowiednie „uogólnione” modele materiałowe (rys. 3). W przypadku wariantu 1 (jedyne kryterium – przyczepność do podkładu betonowego) nie ma potrzeby wyznaczania osobnego modelu użyteczności (jest on tożsamy z modelem dla przyczepności), a optymalizacja sprowadza się do znalezienia składu o maksymalnej przyczepności.

Punkty o maksymalnej użyteczności (w przypadku wariantu 1 – tożsamej z maksymalną przyczepnością do podkładu betonowego) wyznaczono posługując się programem komputerowym STATISTICA; następnie obliczono wartości cech kryterialnych w tych punktach, posługując się sformułowanymi wcześniej zależnościami modelowymi (rys. 4).

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych wykazują korzystną stabilność: wartości zmiennych materiałowych w punktach optymalnych są bardzo zbliżone, podobnie jak przewidywane na podstawie modelu materiałowego wartości cech kryterialnych. W kolejnych wariantach nieznacznie poprawia się wytrzymałość na rozciąganie i nasiąkliwość wodą w punktach optymalnych (co jest zgodne z oczekiwaniami, jako że rośnie znaczenie tych cech jako kryteriów), natomiast przyczepność w tych punktach pozostaje stabilna i obniża się nieznacznie dopiero w wariancie 5, w którym jej waga jest zbliżona do wag przypisywanych pozostałym cechom).



Rys. 3. „Uogólniony” model materiałowy zaprawy akrylowo-cementowej: zależność uogólnionej użyteczności (różne warianty zestawu wag) od zawartości polimeru i spoiwa polimerowo-cementowego; zaznaczono punkty o maksymalnej użyteczności



Rys. 4. Wartości (obliczone) cech kryterialnych w punktach optymalnych

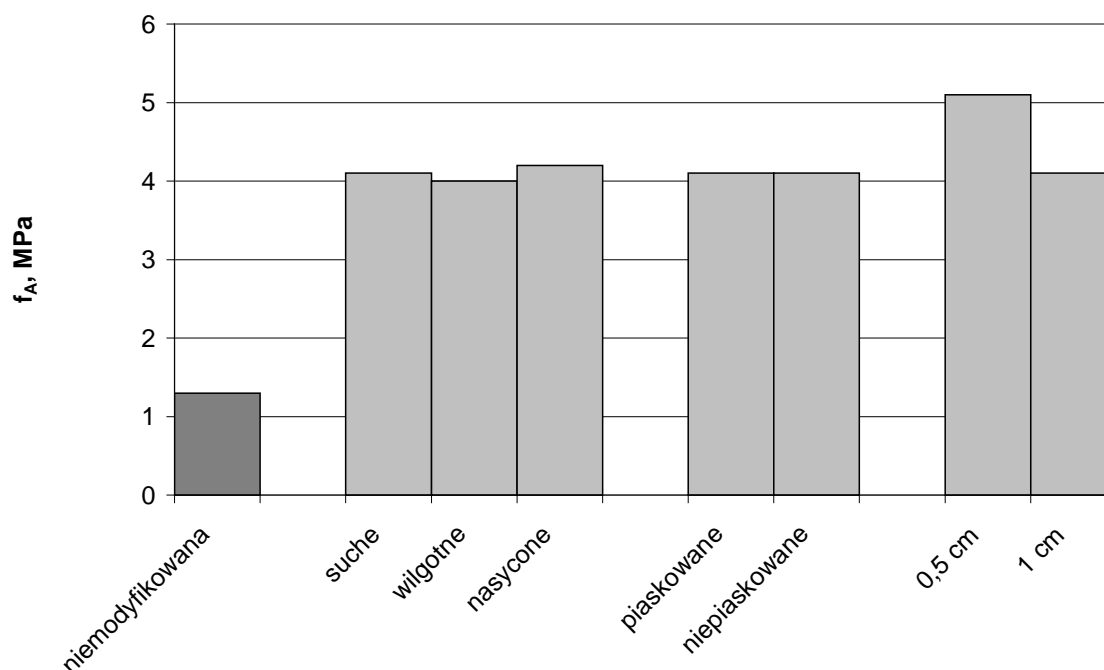
Biorąc pod uwagę powyższe, za skład zaprawy optymalny ze względu na rozpatrywane właściwości techniczne, ze szczególnym uwzględnieniem przyczepności do podkładu betonowego, uznano skład wyznaczony jako optymalny w wariancie 4, to jest (zmiennę rzeczywiste):

$$\boxed{\text{polimer / cement} = 0,17 \text{ (mas.)}, \quad \text{spoiwo / kruszywo} = 0,46 \text{ (mas.)}.}$$

5. Badania weryfikacyjne

W celu weryfikacji uzyskanej poprawy przyczepności badano tę cechę dla zaprawy o zoptymalizowanym składzie, nakładanej na podkład betonowy w kilku wariantach (rys. 5):

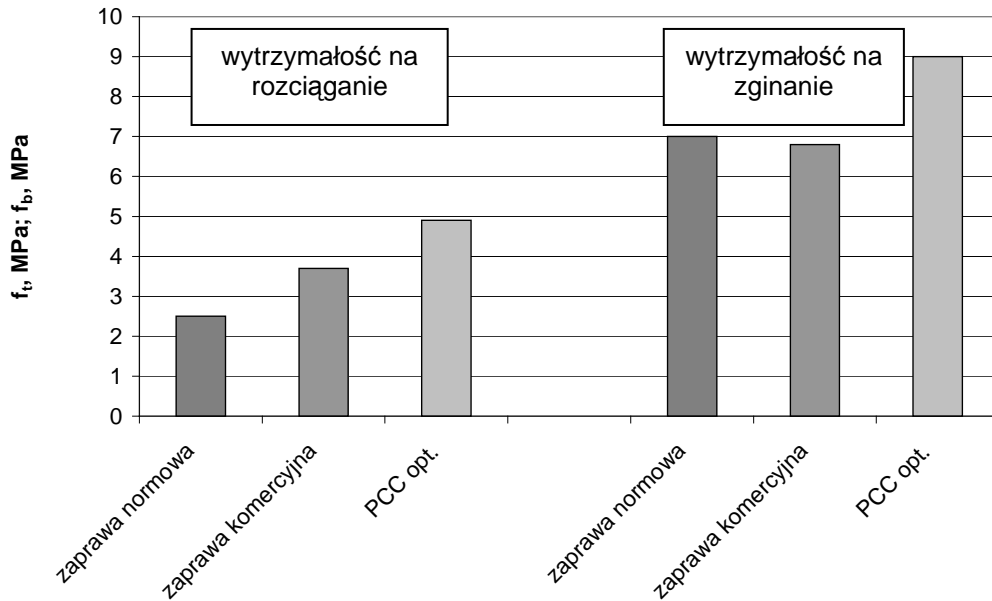
- różny stan zawilgocenia podkładu: powierzchniowo suchy, zwilżony, nasycony wodą;
- różny sposób przygotowania podkładu: z obróbką przez piaskowanie i bez obróbki;
- różna grubość warstwy zaprawy: 0,5 cm i 1,0 cm.



Rys. 5. Przyczepność zoptymalizowanej zaprawy akrylowo-cementowej do podkładu betonowego o różnym stanie zawilgocenia, poddanego obróbce mechanicznej i bez obróbki oraz przy różnej grubości warstwy

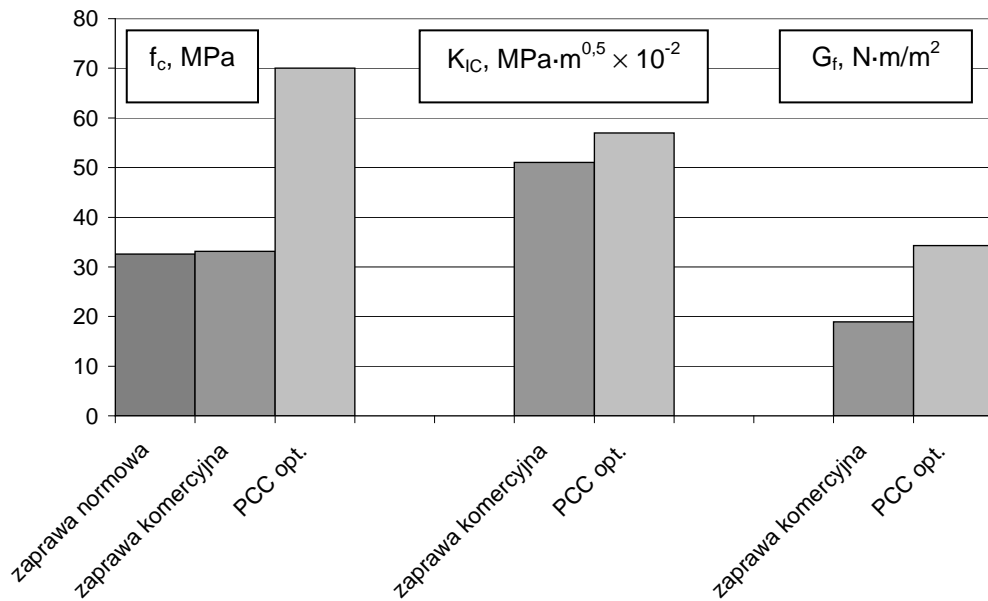
Zaprawa polimerowo-cementowa o zoptymalizowanym składzie charakteryzuje się bardzo wysoką (przekraczającą 4 MPa przy normalnym typie zniszczenia według PN-EN 1542) przyczepnością do podkładu betonowego. Stopień zawilgocenia podłoża, a także jego ewentualna obróbka mechaniczna (piaskowanie) nie wpływają na poziom ocenianej właściwości. Jeszcze wyższe przyczepności (rzędu 5 MPa, a zatem na poziomie wytrzymałości na rozciąganie zaprawy) można uzyskać stosując zaprawę w warstwach o mniejszej grubości. Powyższe wyniki potwierdzają korzystny wpływ dodatku polimeru na przyczepność kompozytu do betonu; uzyskano zaprawę o podwyższonej przyczepności.

Wysoka wytrzymałość na rozciąganie i zginanie zoptymalizowanej zaprawy polimerowo-cementowej świadczy o znaczącym uelastycznieniu kompozytu w porównaniu z materiałem niemodyfikowanym (rys. 6).



Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie i zginanie zoptymalizowanej zaprawy akrylowo-cementowej w porównaniu z wytrzymałością zaprawy niemodyfikowanej i typowej dostępnej na rynku zaprawy naprawczej

Oznaczono także wytrzymałość na ściskanie oraz cechy wyznaczone w badaniu rozłupywania próbki przez wciskanie klina (WST – wedge splitting test) – współczynnik intensywności naprężeń i energię pęknięcia (rys. 7).

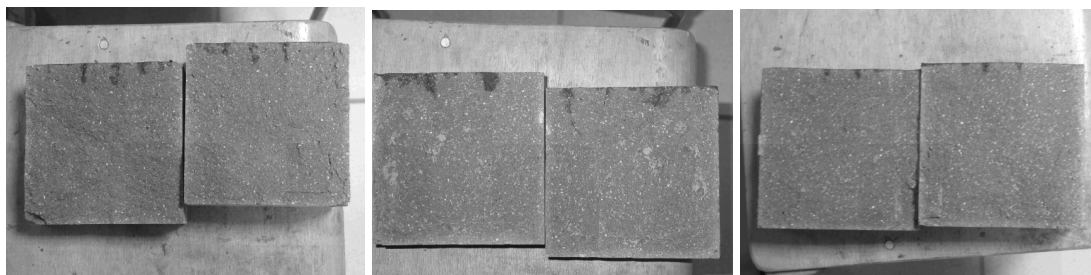


Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie (f_c), współczynnik intensywności naprężeń (K_{IC}) i energia pęknięcia (G_f) zoptymalizowanej zaprawy akrylowo-cementowej w porównaniu z wytrzymałością zaprawy niemodyfikowanej i typowej dostępnej na rynku zaprawy naprawczej

Wytrzymałość na ściskanie zoptymalizowanej zaprawy PCC jest bardzo wysoka (około 70 MPa) – porównywalna z betonem wysokiej wytrzymałości według PN-EN 206-1. Wartości cech oznaczanych w próbie WST są około dwukrotnie niższe niż w przypadku betonu cementowego o porównywalnej wytrzymałości na ściskanie, jednakże znacznie przewyższają odpowiednie wartości typowej zaprawy naprawczej.

Szczelność zaprawy może być charakteryzowana przez nasiąkliwość wodą oraz wodoszczelność pod ciśnieniem. Nasiąkliwość wodą zoptymalizowanej zaprawy polimerowo-cementowej wynosi 2% i jest korzystnie ponad trzykrotnie niższa niż zaprawy.

Badanie wodoszczelności według PN-EN 12390-8 polega na działaniu na powierzchnię materiału wody pod stałym ciśnieniem 500 ± 50 kPa przez 72 godziny. Następnie próbkę rozłupuje się i określa maksymalną głębokość wniknięcia wody. Istotny jest również kształt i powierzchnia obszaru zajętego przez wodę, która wniknęła do wnętrza próbki (rys. 8).



Rys. 8. Przelamane próbki zoptymalizowanej zaprawy polimerowo-cementowej po badaniu wodoszczelności; od góry widoczne ślady wniknięcia

Maksymalna głębokość wnikania wody wynosi około 20 mm i jest podobna do głębokości wnikania w beton o porównywalnej wytrzymałości na ściskanie (około 70 MPa). Zdecydowanie odmienny jest natomiast charakter obszaru zajętego przez wodę, która wniknęła do wnętrza próbki. Do zoptymalizowanej zaprawy akrylowo-cementowej woda wnika jedynie wąskimi „klinami”, podczas gdy w przypadku betonu cementowego – zazwyczaj szerokim frontem.

6. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań zoptymalizowanej zaprawy polimerowo-cementowej świadczą, że oprócz podwyższonej przyczepności do podkładu betonowego, charakteryzuje się ona także dobrymi lub bardzo dobrymi wartościami innych ważnych właściwości technicznych, spełniając wysokie wymagania stawiane wyrobom do napraw konstrukcji betonowych, na przykład przez normę PN-EN 1054-3 – wyroby klasy R4 przeznaczone do napraw konstrukcyjnych: $f_A > 2,0$ MPa, $f_c > 45$ MPa; uzyskana zaprawa: $f_A > 4,0$ MPa, $f_c \cong 70$ MPa, a więc odpowiednio o 100% i o ponad 50% więcej.

Literatura

1. Czarnecki L., Łukowski P.: Naprawa konstrukcji betonowych według norm europejskich. 20 Konferencja Naukowo-Techniczna „Beton i Prefabrykacja – Jadwisin 2006”, 2006.
2. Łukowski P.: Użyteczność jako miara przydatności zapraw polimerowo-cementowych. *Materiały Budowlane*, 5 (2000), 84-85 i 97.
3. Czarnecki L., Łukowski P.: Optimization of polymer-cement concretes, in: Optimization methods for material design of cement-based composites (A.M.Brandt ed.). E & FN Spon, London and New York, 1998.

Pracę wykonano w ramach pracy statutowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej