

Wpływ niektórych parametrów reologicznych cementowej mieszanki iniekcyjnej na skuteczność naprawy betonu

Dr inż. Jerzy Szerafin, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie. Zarys problematyki i przesłanki podjętych badań

Naprawy konstrukcji budowlanych metodą iniekcji ciśnieniowej należą do jednych z najstarszych technik naprawczych. Za pierwszą udaną realizacją uznaje się iniekcję przeprowadzoną na zaporze w Dieppe przez Charlesa Berigryego (1772–1842) [1]. Mimo niewątpliwego postępu w tej dziedzinie sztuki budowlanej, z powodu złożoności tego sposobu naprawy, końcowy sukces w dużej mierze zależy od doświadczenia i intuicji wykonawcy [2].

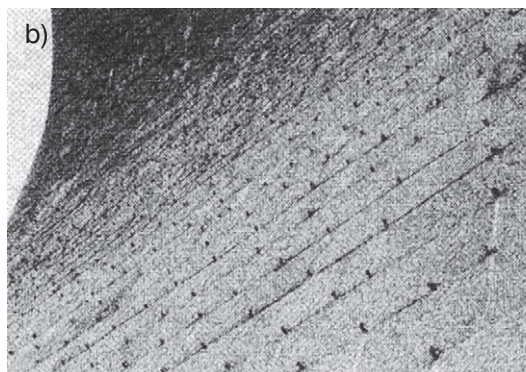
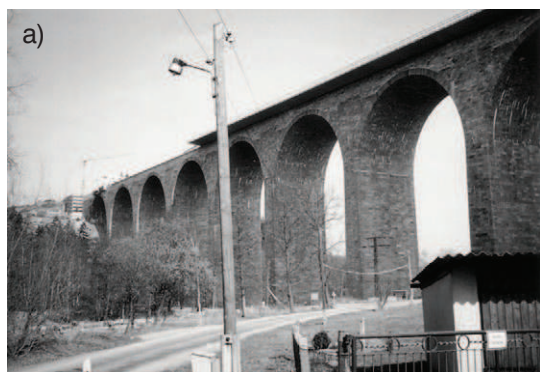
W celu uporządkowania zagadnienia, aktualnie techniki iniekcyjne w odniesieniu do ochrony i napraw konstrukcji betonowych zostały objęte ustaleniami grupy norm PN-EN 1504 opracowywanych w Polsce przez zespół Polskiego Komitetu Normalizacyjnego pod kierunkiem prof. L. Czarnieckiego. Normy te zawierają 11 sprecyzowanych zasad napraw konstrukcji betonowych, którym przyporządkowuje się określone metody realizacji, a także wymagania odnośnie systemów naprawczych. Metodyka normowego, kompleksowego ujęcia zagadnienia napraw konstrukcji została szczegółowo opisana m.in. w [3]. Wymagania dotyczące wyrobów iniekcyjnych są przedmiotem części piątej [4] wyżej wymienionej normy. Zakres ich stosowania określa się jako: przenoszące siły (kategoria F), elastyczne (kategoria D) lub dopasowujące się przez pęcznienie (kategoria S) wypełnianie rys, szczelin i pustek w betonie.

Zwykle przedmiotem naprawy iniekcyjnej elementu konstrukcyjnego, zaliczanej do jednej z wyżej wymienionych

kategorii jest zarysowanie lub pęknięcie. W literaturze polskojęzycznej szeroki opis metodyki diagnostyki oraz naprawy tego typu uszkodzeń został opisany w monografii [5], a także bliżej przedstawiony w ramach ogólnopolskiej konferencji *Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji*, w referacie [6].

Przedmiotem badań opisywanych w niniejszej pracy jest wypełnianie pustek struktury betonu przy pomocy cementowych materiałów iniekcyjnych, w celu uzyskania poprawy przede wszystkim wytrzymałości betonu, co sytuje je w ramach kategorii F. Tego typu defekty betonu, zilustrowane na rysunku 2b mogą powstać wskutek błędów popełnionych na etapie projektowania składu mieszanki betonowej, błędów wykonawczych lub szkodliwych czynników środowiskowych. W literaturze anglojęzycznej defekty te nazywane są obrazowo „honeycombing”, zaś w polskojęzycznej pracy [5], określono je jako „miejsca o rozrzedzonej strukturze betonu”. W zależności od zasięgu uszkodzeń sposób naprawy polega zwykle na wykuciu wadliwego betonu i wykonaniu reprofilacji elementu lub też na wymianie elementu w całości. Alternatywą może być naprawa dokonana metodą iniekcyjną.

Wiele udanych realizacji tego typu iniekcji przedstawiono między innymi w pracach [2, 7]. Widoczny na rysunku 1 żelbetowy most wymagał naprawy ze względu na silnie zdefektowaną strukturę betonu o niskiej wytrzymałości. Pakery iniekcyjne rozmieszczono w otworach o siatce 80×80 cm, głębokości około 60% grubości konstrukcji. W trakcie procesu iniekcji wtłoczono 21000 dm³ iniek-



Rys. 1.
Most w dolinie rzeki Elstery:
a) widok ogólny,
b) zamontowane pakery iniekcyjne (fot. b za [7])



Rys. 2.
 Betonowe próbki
 badawcze:
 a) widok ogólny,
 b) widok powierzchni
 próbki

tu cementowego, co pozwoliło podnieść wytrzymałość betonu na ściskanie do wartości $29 \div 54$ MPa [7]. Jednak pomimo sukcesów praktycznych, metoda iniekcji wciąż pozostaje stosunkowo mało rozpoznana w zakresie racjonalnego doboru właściwości reologiczno-wytrzymałościowych mieszanki iniekcyjnej do wypełniania pustek w strukturze betonu o konkretnych wymiarach i układzie oraz spodziewanego wpływu przeprowadzonej naprawy na poprawę wytrzymałości betonu.

2. Opis przebiegu badań i użytych materiałów

Opisane badania miały na celu doświadczalne określenie wpływu naprawy iniekcyjnej na wytrzymałość betonu, w zależności od niektórych parametrów reologicznych mieszanki iniekcyjnej. Badania przeprowadzono na bloczkach badawczych o wym. $25 \times 25 \times 50$ cm, widocznych na rysunku 2, w których porowatą „zdefektowaną” strukturę betonu otrzymano stosując mieszankę betonową z niedostateczną ilością zaczynu cementowego. W efekcie uzyskano układ połączonych porów, przez który możliwy jest przepływ zaczynu iniekcyjnego. Rozmiary porów pomierzono bezpośrednio na powierzchni bloczków badawczych wzdłuż ustalonych linii pomiarowych, natomiast wytrzymałość betonu określono metodą niszczącą. Wielkości te zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka betonu i defektów jego struktury

	Wielkość porów [mm]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
min.	–	14,0
średnia	1,12	16,4
max	2,8	17,8

Tabela 2. Charakterystyka mieszanek iniekcyjnych stosowanych do badań

Lp.	W/C	Zawartość superplastyfikatora	Granica płynności τ_0 [Pa]	Czas wypływu w wypływowymierzu [s]	Bleeding [%]
I	0,6	–	6,5	40	0,52
II	1,0	–	niemierzalna	29	1,60
III	1,0	0,5%	niemierzalna	26	2,67
IV	2,0	0,5%	niemierzalna	22	3,33

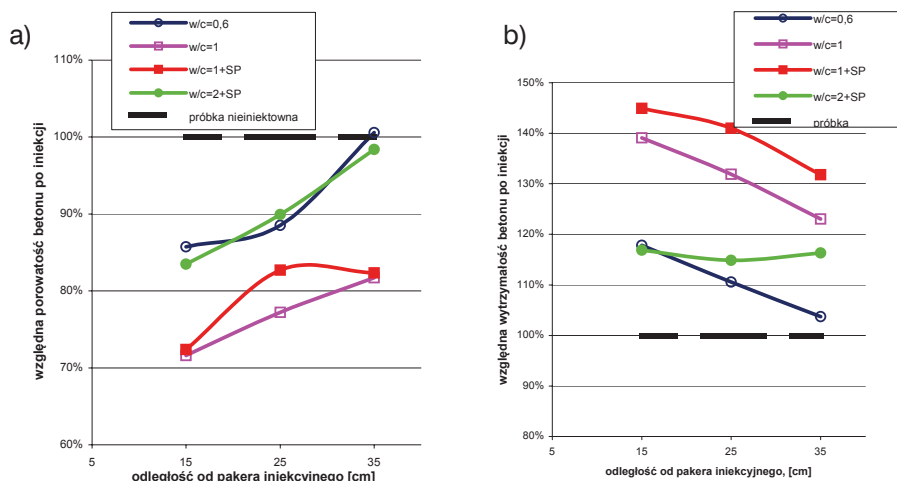
Po zasklepieniu ścianek bocznych i czołowej, bloczki badawcze iniektowano za pomocą pneumatycznej pompy membranowej Iniekta D1, przez paker umieszczony w tulei na ścianie czołowej (por. rys. 2a). Proces prowadzono do momentu wypływu iniektu przez powierzchnię przeciwległej ścianki bloczka. Iniekcję bloczków przeprowadzono przy użyciu 4 różnych rodzajów zaczynów iniekcyjnych, o charakterystyce pokazanej w tabeli 2. Zaczyny przygotowywano za pomocą miksera szybkoobrotowego.

Wszystkie mieszanki iniekcyjne sporządzano na zwykłym cemencie portlandzkim CEM I 32,5R, różnicując płynność za pomocą wskaźnika w/c oraz domieszki superplastyfikatora. Po przeprowadzeniu wstępnych prób okazało się, że zaczyny o w/c < 0,6 są nieskuteczne w danych warunkach. Parametry reologiczne określano przy użyciu „wypływowierza” o średnicy i długości rurki wypływowej odpowiednio: 7 i 177 mm, dokładniej opisanego w [8, 9]. W przypadku zastosowanych bardzo płynnych zaczynów, granica płynności praktycznie redukuje się do zera. Natomiast pomierzony czas wypływu określonej ilości zaczynu, zależny liniowo od jego lepkości może stanowić podstawę do dalszych analiz. W artykule nie opisuje się dokładniej metodyki badawczej poprzestając na stwierdzeniu, że jest to sposób analogiczny do metody lejka Marsha, zalecanej w normie [4]. Odporność na segregację składników określono na podstawie pomiaru grubości warstewki wody, wydzielającej się na powierzchni zaczynu (tzw. bleeding).

Po upływie ok. 28 dni po przeprowadzeniu iniekcji, wycięto z bloczków badawczych po 12 kostek $10 \times 10 \times 10$ cm, oznaczając ich usytuowanie względem pakera iniekcyjnego. Próbkę posłużyły do określenia porowatości betonu (poprzez badania nasiąkliwości), wytrzymałości na ściskanie oraz mrozoodporności. Te ostatnie badania nie są już omawiane w niniejszym artykule.

2. Wyniki badań iniekcyjnych i ich skrócona analiza

Na wykresach zamieszczonych na rysunku 3 zaznaczono zmiany badanych wielkości w stosunku do wielkości pierwotnej, określonej na próbkach nieiniektowanych. Każdy punkt na wykresie porowatości jest średnią z 12



Rys. 3. Zmiana porowatości (a) i wytrzymałości na ściskanie (b) betonu po procesie iniekcji. Opis w tekście

wyników (po 4 kostki z 3 bloczków), zaś na wykresie wytrzymałości z 6 wyników (po 2 kostki z 3 bloczków). W przypadku każdego z zaczynów iniekcyjnych uzyskano poprawę obu badanych cech, jakkolwiek w różnym stopniu. Widoczne zróżnicowanie wyników w zależności od położenia próbki względem pakera można wykorzystać do określenia zasięgu iniekcji.

Wpływ właściwości reologicznych na skuteczność iniekcji, definiowaną jako zmianę porowatości betonu (skuteczność wypełnienia) lub zmianę jego wytrzymałości (skuteczność wzmocnienia) zilustrowano na rysunku 4. Linie ciągłe, kreskowane i kropkowane na wykresach odnoszą się do próbek pobieranych z odległości odpowiednio: 15 cm, 25 cm i 35 cm od pakera iniekcyjnego. Wystąpienie wyraźnego maksimum wskazuje na istnienie przeciwstawnych tendencji przy zmianie płynności iniektu cementowego. Wzrost płynności zaczynu ułatwia wprawdzie wypełnianie porowatej struktury, zwiększając skuteczność iniekcji, jednocześnie jednak zmniejsza się odporność na segregację składników, co obniża skuteczność procesu zgodnie z mechanizmem opisanym w [9] (powstawanie zatorów w zwężeniach kanałków tłocznych, powstawanie wtórnych pustek wskutek sedimentacji cząstek cementu i inne negatywne zjawiska).

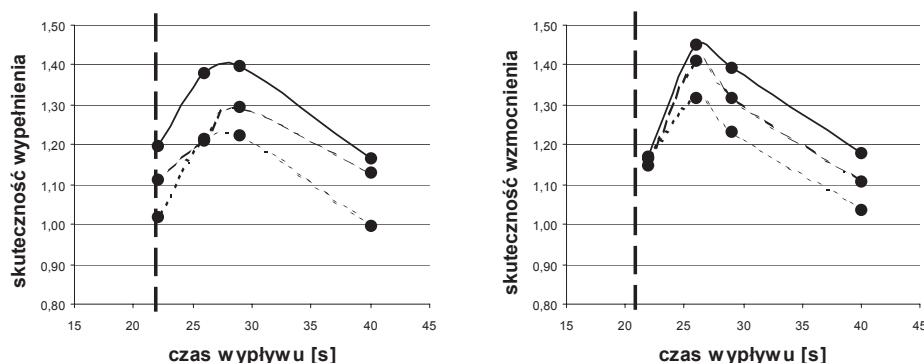
4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania świadczą o możliwości uzyskania wyraźnego wzmocnienia betonu o opisanej struk-

turze defektów, za pomocą iniekcji z użyciem zwykłego cementu (zastosowanie mikrocementów podwyższyłoby prawdopodobnie skuteczność naprawy). Wyniki badań wskazują na istnienie optymalnych właściwości reologicznych cementowej mieszanki iniekcyjnej, przy których skuteczność procesu będzie najwyższa w danych warunkach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ziming W., Daneng H., Yaosheng X., Investigation of the rheological properties and groutability of fresh cement pastes. Mat. konf. Rheology of Fresh Cement and Concrete. 16–29 Marzec 1990
- [2] Warner J., Practical Handbook of Grouting. Soil, Rock and Structures. Wiley and Sons, New Jersey 2004
- [3] Czarnecki L., Łukowski P., Naprawy i ochrona betonu zgodnie z PN-EN 1504, Materiały Budowlane, 2/2009, s. 2
- [4] PN-EN 1504-5:2006 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 5: Iniekcja betonu
- [5] Czarnecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Wyd. Polski Cement Sp.z o.o., Kraków, 2002
- [6] Chmielewska B., Koper J., Naprawa rys w konstrukcjach żelbetonowych metodą iniekcji. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, tom I, Szczyrk 2006, s. 55
- [7] Ivanyi G., Rosa W., Füllen von Rissen und Hohlräumen im Konstruktionsbeton mit Zementsuspension. Beton- und Stahlbetonbau 9/92, 224–229
- [8] Schulze B., Kühling G., Tax M., Neue Zusatzmittel für feststoffreiche Feinstzement-Suspensionen. Sonderdruck aus Bauingenieur. Bd. 67 11/1992
- [9] Szerafin J., Dyspersje cementowe w procesie iniekcyjnej naprawy defektów struktury betonu. Monografia. Politechnika Lubelska, 2011



Rys. 4. Wpływ płynności iniektu na skuteczność wypełnienia i wzmocnienia betonu. Opis w tekście