

WYBRANE PARAMETRY MIESZANEK INIEKCYJNYCH Z CEMENTU I POPIOŁU LOTNEGO DO RENOWACJI RUROCIĄGÓW METODĄ RELININGU

Anna M. Grabiec¹, Jowita Lach-Łączna²

¹ Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań

² ZRUG Sp. z o.o., Poznań

Streszczenie. Podjęto próbę ustalenia optymalnych receptur mieszanek iniekcyjnych na bazie cementu i popiołu lotnego oraz dwóch superplastyfikatorów nowej generacji, umożliwiających dokładne wypełnienie przestrzeni międzyrurowej podczas renowacji rurociągów metodą reliningu. Receptury wytypowano pod względem najkorzystniejszych właściwości reologicznych kompozytów iniekcyjnych, badając czas wypływu z wiskozymetru, czas rozplywu na odległość 100 cm, maksymalną długość rozplywu oraz czas potrzebny do osiągnięcia maksymalnego rozplywu. Ponadto określono początek czasu wiązania mieszanek iniekcyjnych, wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach oraz skurcz. Stwierdzono wpływ rodzaju i ilości superplastyfikatora oraz stosunku cementu do popiołu na właściwości reologiczne kompozytów iniekcyjnych. Za pomocą stosunkowo łatwych w realizacji metod laboratoryjnych pomiaru cech reologicznych wybrano receptury mieszanek iniekcyjnych, które w warunkach technicznych skutecznie wypełniają przestrzeń międzyrurową.

Słowa kluczowe: kompozyt iniekcyjny, cement, relining

WSTĘP

Kanalizacja wielu miast została wybudowana jeszcze przed 1900 rokiem. Ocena stanu technicznego często pozwala stwierdzić, że uszkodzenia przewodów, nieszczelności i ubytki w materiale konstrukcyjnym kanałów ściekowych powodują przede wszystkim infiltrację w dwóch kierunkach: do wód gruntowych i do kanałów. Skutkuje to rozcieńczeniem ścieków, wymywaniem gruntu i tworzeniem zapadlisk [Kuliczkowski 2005], a także przepływem ścieków do gruntu, czyli jego zanieczyszczeniem oraz skażeniem wód gruntowych [Kempa 1995, Buczkowski 2007].

Adres do korespondencji – Corresponding author: Anna M. Grabiec, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, ul. Piątkowska 94E, 60-649 Poznań, e-mail: agra@up.poznan.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

Ze względu na z jednej strony rosnące potrzeby poprawy stanu technicznego istniejących przewodów kanalizacyjnych, ulegających ciągłej dekapitalizacji i niszczeniu wskutek starzenia się materiału konstrukcyjnego, korozyjnego działania ścieków i coraz większych obciążeń dynamicznych wywołanych ruchem pojazdów [Madryas i in. 2002, Kuliczkowski 2005], a z drugiej strony możliwość uzyskania dofinansowania z funduszy Unii Europejskiej przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne coraz częściej decydują się na renowację rurociągów [Madryas 2007]. Wśród znanych i dostępnych metod rehabilitacji i odnowy dużą popularnością cieszą się technologie bezwykopowe, które w Polsce zaczęto stosować w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Są szybkie i proste w realizacji. Główną ich zaletą jest brak robót podziemnych lub ich minimalizacja [Kuliczkowski 2009]. Prace renowacyjne polegają na zastosowaniu wykładziny, która, w zależności od rodzaju występujących w przewodzie uszkodzeń, całkowicie lub częściowo przejmuje obciążenia, jakim poddawany jest kanał, bądź też pełni funkcję zabezpieczenia przed infiltracją wody gruntowej i estryfikacją ścieków. Bezodkrywkowe metody odnowy rurociągów dzielą się na ściśle pasowane i swobodne. Metody ściśle pasowane (tzw. metody *insituform*) polegają na wykonaniu wykładziny wewnątrz istniejącego kanału ściśle przylegającego do wnętrza naprawianego przewodu, metody swobodne zaś – na montażu naprawianego przewodu rur lub modułów o mniejszych gabarytach niż pozwala na to jego światło [Abel 2006, 2009]. Według Demskiego i Abła [2005] do najpopularniejszych metod renowacji zaliczane są metody utwardzonego rękawa oraz metody z zastosowaniem wykładzin z polimerów, obejmujące: metodę swagelingu, Kan-Rem, troliningu oraz reliningu.

Terminologia stosowana w opisie technologii renowacji w wielu przypadkach jest anglojęzyczna i dlatego często spotykane są „spolszczenia”, nie do końca należycie ujednolicone. Także w niniejszym artykule zastosowano zamiennie pojęcia: kompozytu iniekcyjnego, mieszanki iniekcyjnej, masy iniekcyjnej, iniektu i wypełniacza przestrzeni, przestrzeni międzyrurowej oraz przestrzeni pierścieniowej, natomiast nową rurę wprowadzaną do starego kanału zamiennie nazwano linerem, modulem, wykładziną bądź segmentem.

Relining jest technologią naprawy i wzmocnień, polegającą na wprowadzeniu w światło istniejącego obiektu konstrukcji z tworzyw sztucznych lub stali karbowanej, a następnie wypełnieniu przestrzeni pomiędzy nową i starą konstrukcją specjalnymi wypełniaczami. Technologia reliningu polega na wprowadzeniu do uszkodzonego rurociągu nowej rury, najczęściej polietylenowej. Segmenty renowacyjne mają kształt odpowiadający kształtowi rurociągu poddawanego renowacji (kołowy bądź niekołowy). Technologia długiego reliningu stosuje się dla jednego wykopu na odcinkach kanałów długości do około 300 m, przy zastosowaniu rur o średnicach od 80 mm [Demski i Abel 2005]. Alternatywą do technologii długiego reliningu jest technologia krótkiego reliningu, stosowana wszędzie tam, gdzie ze względu na brak miejsca prace muszą być prowadzone na małej powierzchni.

Celem wypełnienia wolnej przestrzeni pomiędzy rurami jest:

- ustabilizowanie położenia linera,
- zapobieganie przedostawaniu się wody i gruntu do przestrzeni pierścieniowej,
- stworzenie kontrolowanych warunków posadowienia linera w kanale,
- zapewnienie równomiernego przenoszenia obciążeń zewnętrznych,
- zapobieganie gromadzeniu się gazu w przestrzeni pierścieniowej.

Jako wypełniacze wolnej przestrzeni stosowane mogą być różne materiały. W ujęciu absolutnie historycznym, ze wzmianką, iż była ona przedmiotem pierwszej rozprawy doktorskiej obronionej w Akademii Górniczo-Hutniczej przez W. Budryka w 1929 roku, należy wymienić pulę piaskową [Knothe 2003], a współcześnie – pianobeton [Chady 2007] oraz masy iniekcyjne w postaci zaczynów i zapraw o zróżnicowanym składzie [Barczyński i Podziemski 2006], modyfikowane superplastyfikatorami, mikrowypełnierzami i/lub regulatorami lepkości.

Kompozyty wykorzystywane do wypełniania przestrzeni pierścieniowej powinny charakteryzować się: krótkim czasem wiązania, brakiem odstoju wody, małą lepkością, zdolnością do całkowitego wypełnienia przestrzeni międzyrurowej, nieprzepuszczalnością gazu, dobrą przyczepnością do stali i polietylenu, zadowalającą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu i ściskanie [Abel 2006, Barczyński i Podziemski 2006]. Wymienione właściwości sytuują mieszanki iniekcyjne do wypełniania przestrzeni międzyrurowej w grupie samozagęszczalnych materiałów kompozytowych, w których kluczowe są parametry reologiczne, umożliwiające swobodne płynięcie mieszanki, jej samoodpowietrzenie bez segregacji składników. Cechy wytrzymałościowe i trwałościowe traktowane są jako wtórne, co akcentowane jest w literaturze dotyczącej betonów samozagęszczalnych [Gołaszewski 2003, Szwabowski i Gołaszewski 2010]. Na ogół cechy te są zadowalające pod warunkiem uzyskania stosownych właściwości reologicznych.

Duże osiągnięcia w technologii betonów samozagęszczalnych zachęcają do komponowania różnych mas iniekcyjnych poprzez stosowanie wysokoefektywnych superplastyfikatorów kompatybilnych z rodzajem użytego cementu [Łukowski 2003, Spiratos i in. 2006, Kurdowski 2010, Szwabowski i Gołaszewski 2010, Grabiec 2011, Neville 2012], różnych mikrowypełniaczy [Łukowski 2003, Jasiczak i Mikołajczyk 2003, Jamroz 2005, Grzeszczyk i in. 2006, Kurdowski 2010, Szwabowski i Gołaszewski 2010] oraz skutecznych modyfikatorów lepkości [Woyciechowski 2006, Gołaszewski 2009, Grabiec 2012, Nepomuceno i in. 2012]. Świadome celowości takiego podejścia firmy branżowe coraz częściej „stawiają” na wielokomponentowe masy iniekcyjne do wypełniania wolnej przestrzeni między rurami.

CEL I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

Celem badań było ustalenie optymalnych receptur kompozytów iniekcyjnych wykonanych z cementu i popiołu lotnego oraz wysokoefektywnych środków upłynniających, które osiągając najkorzystniejsze właściwości reologiczne, zdolne byłyby do całkowitego wypełnienia wolnej przestrzeni pomiędzy rurami w renowacji rurociągów metodą reliningu.

W przyjętych założeniach kierowano się wiedzą i wynikami badań własnych na temat betonów samozagęszczalnych [Grabiec i Kosiński 2005, Grabiec i Chutek 2008, Grabiec 2011, 2012], zakładając pewne podobieństwa mieszanek iniekcyjnych do samozagęszczalnych mieszanek betonowych, a także czerpiąc z praktycznych doświadczeń kilku wiodących na rynku krajowym i zagranicznym firm zajmujących się montażem nowych i naprawianiem istniejących przewodów rurowych metodą bezwykopową.

Za kluczowe kryterium oceny przydatności mieszanki iniekcyjnej do wypełniania przestrzeni międzyrurowej przyjęto czas jej wypływu z wiskozymetru skonstruowanego w Katedrze Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu [Kostrzewski 2005], uznając za zadowalający czas wypływu mieszczący się w przedziale od 6 do 8 sekund. Przyrząd jest aktualnie przedmiotem postępowania w Urzędzie Patentowym RP, co uniemożliwia podanie szczegółów dotyczących jego budowy. Badania czasu wypływu wykonano jako wstępne [Lach 2010] i na ich podstawie wytypowano receptury iniektów do badań zasadniczych. Objętość pojedynczego zarobu wynosiła $1,1 \text{ dm}^3$.

Harmonogram mieszania składników kompozytów iniekcyjnych przeznaczonych do badań reologicznych, zarówno wstępnych, jak i zasadniczych, opisano w pracy Lach [2010].

Iniekty do badań wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, odpowiadającego wymaganiom normy PN-EN 197-1:2012, który jako spoiwo czystoklinkierowe w większości prowadzonych badań z zakresu technologii kompozytów cementowych traktowany jest jako referencyjny.

W związku z różnorodną efektywnością współdziałania cement – superplastyfikator w badaniach zastosowano dwa rodzaje domieszek upłynniających, jedną w formie proszkowej, drugą – w płynnej. Obie należą do grupy PE i PC, ale o zróżnicowanych składach, których, co oczywiste, w szczegółach producenci nie podają.

Popiół lotny z elektrociepłowni, spełniający według informacji od dostawcy wymagania normy PN-EN 450-1:2009, wybrano jako mikrowypełniacz, kierując się wiedzą o przydatności tego dodatku mineralnego w technologii kompozytów samozagęszczalnych oraz względami ekologicznymi, bo jest to propozycja racjonalnego zagospodarowania go jako materiału odpadowego.

Chociaż cechy reologiczne kompozytów iniekcyjnych są najistotniejsze, to zbadano również ich 28-dniową wytrzymałość na ściskanie, zakładając, że powinna wynosić około 10 MPa. Uznano także za uzasadnione badanie skurczu kompozytów w związku ze zmniejszaniem się, wskutek skurczu, dokładności wypełnienia wolnej przestrzeni międzyrurowej w renowacji rurociągów.

METODYKA

Mieszanki iniekcyjne zawierające proszkowy oraz płynny superplastyfikator, wykonane według receptur zestawionych w tabeli 1, zbadano pod kątem ich cech reologicznych: czasu rozplywu na odległość 100 cm, maksymalnej długości rozplywu oraz czasu potrzebnego na jej osiągnięcie. Zbadano początek czasu wiązania kompozytów iniekcyjnych, wytrzymałość iniektów na ściskanie po 28 dniach twardnienia oraz skurcz do ustabilizowania w czasie.

Zaroby iniekcyjne wykonywano w dwóch rodzajach mieszarek. Zaroby o objętości wynoszącej $1,1 \text{ dm}^3$, przeznaczone do badań reologicznych i początku czasu wiązania, były przygotowywane w mieszarce do cementowych zapraw normowych, natomiast zaroby o objętości 30 dm^3 , przeznaczone do wykonania próbek do badania wytrzymałości na ściskanie i skurczu – w mieszarce przeciwbieżnej Tz 100/60 typu Atika.

Tabela 1. Receptury iniektów zastosowanych do badań zasadniczych
 Table 1. Recipes of injects used for basic studies

Oznaczenie receptury Recipe designation	Ilość cementu na 1 m ³ iniektu [kg] Cement amount per cubic meter of inject [kg]	W/(C+P) [-]	Ilość superplastyfikatora [% masy (C+P)] Superplasticiser amount [% masy (C+P)]	Ilość składników [g] na 1,1 dm ³ iniektu Ingredient amount [g] per 1.1 dm ³ of inject			
				cement	popiół fly ash	woda water	superplastyfikator superplasticiser
A	200	0,25	0,082	220	1350	393	1,29
B	220	0,25	0,080	242	1332	394	1,26
C	240	0,25	0,080	264	1315	395	1,26
D	260	0,25	0,080	286	1297	396	1,27
E	200	0,25	0,75	220	1337	389	11,7

Wykonaną mieszankę iniekcyjną poddawano najpierw badaniu czasu wypływu z wiskozymetru. Jeśli czas wypływu nie mieścił się w założonym przedziale, to sukcesywnie dokonywano weryfikacji receptury mieszanki iniekcyjnej poprzez zmianę procentowej ilości superplastyfikatora względem sumy masowej cementu i popiołu lotnego (tab. 2).

Tabela 2. Czas wypływu iniektu z wiskozymetru [s]
 Table 2. Time of inject flowing from viscometer [s]

Ilość superplastyfikatora w stosunku do suchej masy [%] Superplasticiser amount [%]	Stosunek cementu do popiołu [-] Cement-fly ash ratio [-]			
	0,16	0,18	0,20	0,22
0,080	7,41	6,85	6,95	7,02
0,085	6,50	6,56	6,58	6,82
0,090	5,71	6,46	6,50	6,54
0,095	5,52	6,26	6,36	6,40
0,100	5,30	6,14	6,16	6,28

Czas potrzebny do rozplywu mieszanek iniekcyjnych na odległość 100 cm, wykonanych według receptur wytypowanych na podstawie wyników badań wstępnych (tab. 1), pomierzono za pomocą wymienionego wiskozymetru i rynny z PCV długości 200 cm, zablokowanej z obu stron zaślepkami PCV. Rynna została umiejscowiona w ten sposób, aby w rzucie poziomym odległość zewnętrznej krawędzi wiskozymetru była oddalona o 1 cm od zaślepki. Czas potrzebny do rozplywu mieszanki na 100 cm mierzony był od momentu uruchomienia stopera wiskozymetru do chwili osiągnięcia rozplywu w rynn timerze na długość 100 cm (tab. 3).

Określenie maksymalnej długości rozplywu kompozytów iniekcyjnych odbyło się za pomocą tego samego oprzyrządowania, w którym mierzono czas potrzebny do rozplywu iniektu na odległość 100 cm. Za maksymalną długość rozplywu iniektu w rynn timerze przyjęto odległość, którą osiąga on do momentu zaprzestania płynięcia (tab. 4).

Podobne pod względem metodyki pomiarów było badanie czasu potrzebnego do rozplywu mieszanki na maksymalną odległość. Różnica polegała na tym, że czas mierzony był od momentu uruchomienia stopera wiskozymetru do chwili osiągnięcia maksymalnego rozplywu kompozytu iniekcyjnego w rynnice (tab. 5).

Początek czasu wiązania kompozytów iniekcyjnych zmierzono w aparacie Vicata. Napelniano pierścien aparaty iniektem sporządzonym według wybranej receptury, a następnie, zgodnie zaleceniami normy PN-EN 196-3:2006, mieszano wszystkich składników mieszanki iniekcyjnej do momentu, w którym odległość igły od płytki bazowej wyniosła 6 ± 3 mm (tab. 6).

Badanie wytrzymałości na ściskanie kompozytów iniekcyjnych po 28 dniach zostało wykonane zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2002. Przeprowadzono badania na trzech próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm dla pojedynczej serii, w maszynie wytrzymałościowej typu 107/3000 A DIG 2000-P.C. produkcji szwajcarskiej (tab. 7).

Do badania wielkości skurczu, z pozostałej po wykonaniu próbek do badania wytrzymałości mieszanki iniekcyjnej, uformowano próbki prostopadłościennne o wymiarach $100 \times 100 \times 500$ mm. Próbkę wyjęto z form po 48 godzinach i przeniesiono do basenu z wodą. Skurcz iniektu oznaczono według zaleceń Instrukcji ITB 194/98. Po rozformowaniu zostały na nich zamontowane repery (przyklejone klejem szybkoschnącym). Wartość skurczu iniektów odczytywano z czujników zamontowanych nad próbkami. Pomiar wykonywano przez pierwsze 15 dni codziennie, następnie co drugi dzień (do 68. dnia), a później raz w tygodniu – do 111. dnia, czyli do momentu ustabilizowania. Pomiar skurczu odbywał się za pomocą czujników pomiarowych z podziałką o dokładności $\pm 0,01$ mm w stalowych stelażach wykonanych na potrzeby KMBiBR UP w Poznaniu.

Każde pojedyncze badanie danej cechy mieszanki iniekcyjnej, zarówno na etapie poszukiwań optymalnej receptury, jak i badań zasadniczych, oraz oznaczanie cech stwardniałych kompozytów iniekcyjnych wykonywano w trzech powtórzeniach.

Interpretacji statystycznej poddano wyniki badań, dotyczące parametru do przyjętego jako podstawowe kryterium oceny efektywności mieszanki iniekcyjnej wypełniającej przestrzeń międzyrurową, a mianowicie czasu wypływu iniektu z wiskozymetru (tab. 2). Przeanalizowano wyniki badań czasu wypływu iniektów zawierających superplastyfikator proszkowy, z którego zastosowaniem wykonano cztery mieszanki iniekcyjne. Rozpatrzono dwie zmienne: czynnik A – ilość superplastyfikatora, i czynnik B – stosunek ilości cementu do popiołu. W odniesieniu do czynników A i B, traktowanych indywidualnie oraz łącznie, sformułowano hipotezy o braku ich wpływu na czas wypływu iniektu (hipotezy: H_0^1 , H_0^2 , H_0^3) oraz hipotezy o istnieniu tego wpływu (hipotezy: H_1^1 , H_1^2 , H_1^3). W celu sprawdzenia prawdziwości postawionych hipotez zerowych zastosowano analizę jednoczynnikową, biorąc pod uwagę wyniki dla pięciu populacji ($r = 5$), dokonując pomiaru każdej populacji w czterech próbach w odniesieniu do czynnika A oraz dla $r = 4$ i $n = 5$ w odniesieniu do czynnika B. Natomiast słuszność hipotezy zerowej w odniesieniu do czynników A i B zbadano za pomocą analizy dwuczynnikowej. Przyjęty poziom istotności α wynosił 0,05. Hipotezy zweryfikowano według Lach [2010], za Brandtem i Szymanowskim [1998].

WYNIKI BADAŃ

Czas rozplywu mieszanek iniekcyjnych, wykonanych według receptur zestawionych w tabeli 1, na odległość 100 cm, maksymalną długość ich rozplywu oraz czas potrzebny do osiągnięcia tej długości przedstawiono w tabelach 3, 4 i 5. Wyniki badania początku czasu wiązania kompozytów iniekcyjnych zestawiono w tabeli 6, wytrzymałości 28-dniowej – w tabeli 7, a skurczu (wartości średnie) – na rysunku 1. Wyniki wygenerowane za pomocą modułu analiza danych w zakresie wpływu ilości superplastyfikatora na czas wypływu kompozytu iniekcyjnego z viskozymetru oraz wpływu stosunku ilości cementu do popiołu na czas wypływu kompozytu iniekcyjnego zestawiono odpowiednio w tabelach 8 i 9. Tabela 10 pokazuje rezultaty dotyczące równoczesnego wpływu ilości superplastyfikatora i stosunku ilości cementu do popiołu na czas wypływu mieszanki iniekcyjnej.

Tabela 3. Czas rozplywu iniektów na odległość 100 cm
Table 3. Time of inject spreading at a distance of 100 cm

Nr próbki No. of sample	Czas rozplywu iniektów na 100 cm [s] Time of inject spreading [s]				
	Receptura A Recipe A	Receptura B Recipe B	Receptura C Recipe C	Receptura D Recipe D	Receptura E Recipe E
Próbka 1 Sample No. 1	26	26	28	26	2,0
Próbka 2 Sample No. 2	26	27	27	28	2,0
Próbka 3 Sample No. 3	24	26	28	28	3,0
Średnia Average	25,3	26,3	27,7	27,3	3,3

Tabela 4. Maksymalna długość rozplywu iniektów
Table 4. Maximal spread length of injects

Nr próbki No. of sample	Maksymalna długość rozplywu [cm] Maximal spread length [cm]				
	Receptura A Recipe A	Receptura B Recipe B	Receptura C Recipe C	Receptura D Recipe D	Receptura E Recipe E
Próbka 1 Sample No.1	120	128	120	128	230
Próbka 2 Sample No. 2	121	128	120	129	243
Próbka 3 Sample No. 3	135	128	121	129	234
Średnia Average	125	128	120	129	238

Tabela 5. Czas rozplywu iniektów na maksymalną długość
Table 5. Time of inject spreading to maximal length

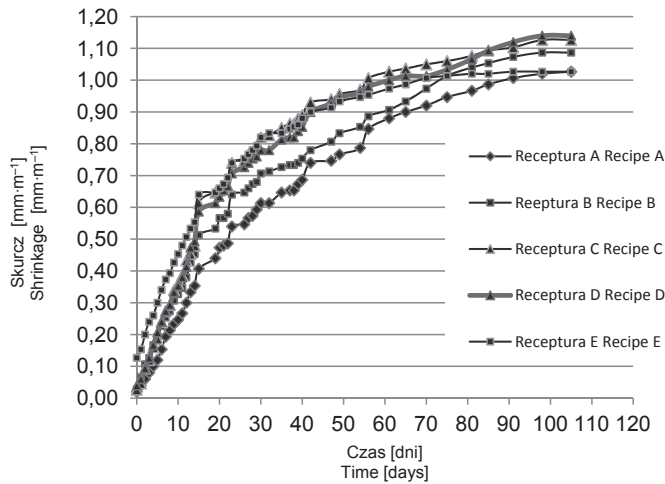
Nr próby No. of sample	Czas rozplywu na maksymalną odległość [s] Time of inject spreading to maximal length [s]				
	Receptura A Recipe A	Receptura B Recipe B	Receptura C Recipe C	Receptura D Recipe D	Receptura E Recipe E
Próbka 1 Sample No. 1	99	99	92	100	16
Próbka 2 Sample No. 2	99	99	92	99	19
Próbka 3 Sample No. 3	105	98	93	99	15
Średnia Average	101,0	98,7	92,3	99,3	16,7

Tabela 6. Początek czasu rozplywu iniektów
Table 6. Initial setting time of injects

Nr próbki No. of sample	Początek czasu wiązania [godz i min] Initial setting time [hrs and minutes]				
	Receptura A Recipe A	Receptura B Recipe B	Receptura C Recipe C	Receptura D Recipe D	Receptura E Recipe E
Próbka 1 Sample No. 1	7 h 5 min	7 h 10 min	7 h 35 min	8 h 5 min	9 h 55 min
Próbka 2 Sample No.2	7 h 15 min	7 h 15 min	7 h 30 min	8 h 15 min	10 h 20 min
Próbka 3 Sample No. 3	7 h 10 min	7 h 15 min	7 h 15 min	8 h 20 min	10 h 10 min
Średnia Average	7 h 10 min	7 h 13 min	7 h 27 min	8 h 13 min	10 h 22 min

Tabela 7. Wytrzymałość iniektów na ściskanie
Table 7. Compressive strength of injects

Nr próbki No. of sample	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] Compressive strength [MPa]				
	Receptura A Recipe A	Receptura B Recipe B	Receptura C Recipe C	Receptura D Recipe D	Receptura E Recipe E
Próbka 1 Sample No. 1	8,0	9,4	11,0	12,3	16,3
Próbka 2 Sample No. 2	7,5	9,8	11,0	12,8	16,2
Próbka 3 Sample No. 3	7,9	9,6	11,2	12,7	18,6
Średnia Average	7,8	9,6	11,1	12,6	17,0



Rys. 1. Skurcz iniektów
Fig. 1. Shrinkage of injects

Tabela 8. Wyniki analizy 1-czynnikowej wariancji dla zmiennej prognozowanej (A)

Table 8. Results of 1-factor variance analysis for variable forecast (A)

Zródło wariancji Variance source	SS	df	MS	F	Wartość-p p-value	Test F F test
Pomiędzy grupami Between groups	92,05	4	23,01	26,65	1,16E-06	3,06
W obrębie grup Within groups	12,95	15	0,86	x	x	x
Razem Together	105,00	19	x	x	x	x

Oznaczenia: SS – suma kwadratów; df – liczba stopni swobody; MS – wariancja z próby (średnie kwadraty); F – wartości statystyki Fishera-Snedecora; wartość p – poziom istotności odpowiadający wartości krytycznej równej wartości statystyki testu F; test F – wartość krytyczna (F*) odczytana z tablic Fishera-Snedecora dla $\alpha = 0,05$; x – wypełnienie pozycji jest niemożliwe lub niecelowe.

Notes: SS – sum of squares; df – degrees of freedom; MS – variance (middle squares); F – values of Fisher-Snedecor statistics; p-value – significance level equal to critical value of F test statistics; test F – critical value (F*) from Fisher-Snedecor tables for $\alpha = 0,05$; x – fulfillment impossible or useless.

Tabela 9. Wyniki analizy 1-czynnikowej wariancji dla zmiennej prognozowanej (B)

Table 9. Results of 1-factor variance analysis for variable forecast (B)

Zródło wariancji Variance source	SS	df	MS	F	Wartość-p p-value	Test F F test
Pomiędzy grupami Between groups	9,30	3	3,10	0,52	0,68	3,24
W obrębie grup Within groups	95,70	16	5,98	x	x	x
Razem Together	105,01	19	x	x	x	x

Tabela 10. Wyniki analizy 2-czynnikowej wariancji dla zmiennej prognozowanej (A i B)
 Table 10. Results of 2-factor variance analysis for variable forecast (A and B)

Źródło wariancji Variance source	SS	df	MS	F	Wartość-p p value	Test F F test
Czynnik A Variable A	9,30	3	3,10	10,19	0,001	3,49
Czynnik B Variable B	92,05	4	23,01	75,62	2,09E-08	3,26
Błąd Error	3,65	12	0,30	x	x	x
Razem Together	105,01	19	x	x	x	x

Oznaczenia jak w tabeli 8.

Notes as in Table 8.

PODSUMOWANIE

Na podstawie badań przeprowadzonych na mieszankach iniekcyjnych w stanie świeżym stwierdzono, że superplastyfikator w postaci płynnej (receptura E) efektywniej wpływał na właściwości reologiczne kompozytu iniekcyjnego aniżeli superplastyfikator proszkowy (receptury: A, B, C i D). Iniekt zawierający superplastyfikator płynny osiągnął krótszy czas rozplywu na odległość 100 cm (tab. 3), a także osiągnął dłuższy rozplyw (tab. 4) w krótszym czasie (tab. 5). Zaobserwowano również, że ilość cementu, w przyjętym zakresie 200–260 kg na 1 m³ iniektu (receptury: A, B, C i D), nie wpłynęła znacząco na właściwości reologiczne iniektu.

Superplastyfikator proszkowy zastosowany w ilości od 0,07 do 0,40% w stosunku do suchej masy (cementu i popiołu lotnego), zmienił konsystencję kompozytów iniekcyjnych na bardziej płynną. Powyżej wartości 0,40% w stosunku do suchej masy nie stwierdzono zmian w upłynnieniu.

Uwagę zwraca także różne zachowanie mieszanek iniekcyjnych zarówno na bazie superplastyfikatora proszkowego, jak i superplastyfikatora płynnego podczas badania początku czasu wiązania (tab. 6). Otóż ta pierwsza po wprowadzeniu do pierścienia aparatu Vicata sukcesywnie tężała, natomiast mieszanka z superplastyfikatorem płynnym po wprowadzeniu do pierścienia aparatu Vicata w pierwszej godzinie upłynniała się, czemu towarzyszyło widoczne oddzielanie wody od cementu. Miało to wpływ na początek czasu wiązania, który dla kompozytu iniekcyjnego zawierającego superplastyfikator płynny okazał się znacznie dłuższy od początku czasu wiązania kompozytów z superplastyfikatorem proszkowym. Dodatkowo na podstawie badań przeprowadzonych na iniektach zawierających proszkowy superplastyfikator stwierdzono, że ilość cementu w nieznacznym stopniu wpłynęła na początek czasu wiązania.

Zaobserwowano również różnice we właściwościach stwardniałych mieszanek iniekcyjnych. Rodzaj superplastyfikatora wpłynął na 28-dniową wytrzymałość iniektów na ściskanie. Iniekt zawierający superplastyfikator płynny charakteryzował się większą wytrzymałością (tab. 7). Również ilość cementu wpłynęła na tę cechę. Na podstawie doświadczeń przeprowadzonych na kompozytach iniekcyjnych, w których skład wchodził

superplastyfikator proszkowy, stwierdzono, że im więcej cementu zawierał kompozyt, tym większą wytrzymałość osiągał po 28 dniach. W nawiązaniu do przyjętych założeń stwierdzono, że iniektory wykonane według receptur C i D (z superplastyfikatorem w postaci proszkowej) oraz E (z superplastyfikatorem w postaci płynnej), charakteryzujące się wytrzymałością na ściskanie powyżej 10 MPa (w tym iniekt z superplastyfikatorem płynnym wytrzymałością przekraczającą 17 MPa), pozwoliły uzyskać w pełni satysfakcjonujące cechy stwardniałych kompozytów wypełniających przestrzeń międzyrurową. Skurcz iniektów zawierających proszkowy superplastyfikator wystąpił do około 110. dnia, natomiast skurcz iniektu zawierającego superplastyfikator płynny utrzymywał się do około 70. dnia. Końcowe wartości skurczu dla kompozytów iniekcyjnych na bazie superplastyfikatorów obydwu postaci, przy założeniu tej samej ilości cementu (200 kg, odpowiednio receptury A i E), wyniosły około $1,04 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ (rys. 1). Dodatkowo zauważono, że końcowa wartość skurczu iniektów zawierających superplastyfikator proszkowy (receptury: A, B, C i D) była zależna jedynie od ilości cementu. Kompozyty iniekcyjne zawierające od 220 do 260 kg cementu w 1 m^3 osiągnęły większe wartości końcowe skurczu w porównaniu ze skurczem kompozytów z ilością 200 kg cementu.

Udowodniono prawdziwość stwierdzenia, że ilość superplastyfikatora oraz stosunek cementu do popiołu mają wpływ na czas wypływu mieszanki iniekcyjnej z wiskozymetru, na co pozwoliła analiza z uwzględnieniem przyjętych hipotez statystycznych. Wartość statystyki F, zarówno dla czynnika zmiennego A, jak i B, należała do przyjętych obszarów krytycznych, dlatego hipotezę zerową odrzucono na rzecz hipotezy alternatywnej (tab. 8, 9, 10).

Wytypowane dzięki badaniom laboratoryjnym masy iniekcyjne sprawdziły się w warunkach technicznych, wypełniając z powodzeniem przestrzeń międzyrurową. Uznano więc, że za pomocą stosunkowo łatwych w realizacji metod laboratoryjnych można określić cechy reologiczne kompozytów iniekcyjnych (czas wypływu z wiskozymetru, czas rozplywu na odległość 100 cm, maksymalną długość rozplywu oraz czas potrzebny do osiągnięcia maksymalnego rozplywu) i wybrać receptury iniektów, które bez potrzeby weryfikacji w skali technicznej mogą być w niej zastosowane.

PIŚMIENNICTWO

- Abel, T. (2006). Maxi-trolining w Polsce. Inżynieria Bezwykopowa, 1, 58–60.
- Abel, T. (2009). Trolining – bezwykopowa technologia naprawy rurociągów. Materiały Budowlane, 12, 24–25.
- Barczyński, A., Podziemski, T. (2006). Sieci gazowe polietylenowe. Projektowanie, budowa, użytkowanie. SITPNiG, Warszawa.
- Brandt, S., Szymanowski, L. (1998). Analiza danych: metody statystyczne i obliczeniowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Buczowski, W. (2007). Badania zmierzające do określenia stopnia zużycia betonowych kolektorów kanalizacyjnych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 5, 6–8.
- Chady, A. (2007). Zastosowanie pianobetonu przy realizacji systemów komunalnych (www.muratorplus.pl; data publikacji: 30/05/2007).
- Demski, M., Abel, T. (2005). Bezodkrywkowa regeneracja rurociągów. Inwestycje Komunalne – Przegląd Zamówień Publicznych 2.

- Gołaszewski, J. (2003). Kształtowanie urabialności mieszanki betonowej superplastyfikatorami. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Gołaszewski, J. (2009). Influence of viscosity enhancing agent on rheological and compressive strength of superplasticized mortars. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15 (2), 181–188.
- Grabiec, A.M. (2011). Skuteczność działania superplastyfikatorów z uwzględnieniem różnych rodzajów cementu. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Poznań.
- Grabiec, A.M. (2012). Influence of viscosity modifying agent on some rheological properties, segregation resistance and compressive strength of self-compacting concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19 (1), 1–8.
- Grabiec, A.M., Chutek, R. (2008). Cement type and properties of self-compacting concrete. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 7 (4), 3–14.
- Grabiec, A.M., Kosiński, T. (2005). Wpływ rodzaju mikrowypełniacza na właściwości betonu samozagęszczalnego. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 4 (2), 81–94.
- Grzeszczyk, S., Janowska-Renkas, E., Skaliński, B. (2006). Właściwości reologiczne mieszanek samozagęszczalnych – wpływ mikrowypełniaczy. *Cement Wapno Beton*, 6, 337–342.
- Instrukcja ITB 194/98. Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach.
- Jamroży, Z. (2005). Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Jasiczak, J., Mikołajczyk P. (2003). Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Alma Mater. Politechnika Poznańska, Poznań.
- Kempa, E.S. (1995). Ryzyko w procesach i obiektach inżynierii sanitarnej. *Ochrona Środowiska*, 2 (8), 43–48.
- Knothe, S. (2003). Pierwszy doktorat w Akademii Górniczej. *Biuletyn Informacyjny AGH*, 118/119, 20.
- Kostrzewski, W. (2005). Projektowanie analityczno-empiryczne mieszanek betonów samozagęszczalnych w oparciu o właściwości reologiczne zapraw. Praca magisterska. Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań.
- Kuliczkowski, A. (2005). Przyczyny występowania katastrof kanalizacyjnych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 5, 20–25.
- Kuliczkowski, A. (2009). Technologie bezwykopowe budowy i odnowy sieci podziemnych. *Rynek Instalacyjny*, 11, 6–7.
- Kurdowski, W. (2010). Chemia cementu i betonu. *Polski Cement*, Kraków.
- Lach, J. (2010). Opracowanie technologii parametrów iniektów na bazie cementów i popiołów lotnych do renowacji rurociągów metodą reliningu. Praca magisterska. Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań.
- Łukowski, P. (2003). Domieszki do zapraw i betonów. *Polski Cement*, Kraków.
- Madryas, C. (2007). Beton w infrastrukturze podziemnej miast przyszłości. *Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele*, 4, 28–35.
- Madryas, C., Kolonko, A., Wysocki, L. (2002). Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
- Nepomuceno, M.C.S., Oliveira, L., Lopes, S.M.R. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, 26 (1), 317–326.
- Neville, A.M. (2012). Właściwości betonu. *Arkady*, Warszawa.
- PN-EN 196-3:2006 Metody badania cementu. Część 3: Oznaczenie czasów wiązania i stałości objętości.
- PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 450-1:2009 Popiół lotny do betonu. Definicje, specyfikacja i kryteria zgodności.
- PN-EN 12390-3:2002 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.

- Spiratos, N., Page, M., Mailvaganam, N.P., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C. (2006). Superplasticizers for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice. Marquis, Quebec.
- Szwabowski, J., Gołaszewski, J. (2010). Technologia betonu samozagęszczalnego. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków.
- Woyciechowski, P. (2006). Domieszki modyfikujące lepkość samozagęszczalnych mieszanek betonowych. Konferencja „Dni betonu”, Wisła, 623–633.

SOME PARAMETERS OF INJECTS BASED ON CEMENT AND FLY ASH FOR RENOVATION OF PIPELINES BY RELINING METHOD

Abstract. The study attempts to determine the optimal recipes based on cement, fly ash and two superplasticisers of new generation which would be able to fulfill space between the pipes in renovation of pipelines by relining. Inject recipes were selected taking into account the most favourable rheological properties of injects. There were flow time from the viscometer, time of spread at the distance of 100 cm, time needed to achieve the maximum spread. Moreover, initial setting time, shrinkage and compressive strength after 28 days were determined. It was found that the type and amount of superplasticiser and cement-to-fly ash ratio affect the rheological properties of the injects. Relatively easy laboratory methods used for measurements of rheological properties made it possible to select optimal recipes of injects which in technical scale fulfill space between the pipes successfully.

Key words: inject, cement, fly ash, relining

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.03.2016

Cytowanie: Grabiec, A.M., Lach-Łączna, J. (2016). Wybrane parametry mieszanek iniekcyjnych z cementu i popiołu lotnego do renowacji rurociągów metodą reliningu. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (1), 55–67.