

Właściwości reologiczne ciężkich betonów samozagęszczalnych

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SELF-CONSOLIDATING HEAVYWEIGHT CONCRETES

Streszczenie

Ciężkie betony od wielu lat używane są do wykonywania elementów osłonowych przeciw promieniowaniu. Wytwarzane są one zarówno przy użyciu kruszyw ciężkich naturalnych, takich jak magnetyt czy baryt, jak również kruszyw odpadowych jak żelazofosfor. Natomiast, niewiele jest informacji w literaturze światowej na temat możliwości wykonywania ciężkich betonów samozagęszczalnych. Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie, przy użyciu kruszywa barytowego, ciężkiego betonu o właściwościach samozagęszczalnych. Skład betonu ustalano stosując trzyetapową metodę projektowania, najpierw projektując skład zaczynów, następnie zapraw i ostatecznie betonu. Przeprowadzone zostały normowe badania właściwości reologicznych mieszanek samozagęszczalnych zaczynów, zapraw i betonów oraz ich właściwości wytrzymałościowych. Ze względu na charakter betonów samozagęszczalnych oraz dodatkowo zastosowanie ciężkiego kruszywa, kluczową kwestią było badanie odporności na segregację, które przeprowadzono przy zastosowaniu adaptacji amerykańskiej metody kolumny segregacyjnej. Wyniki badania rozpięty (Slump Flow), przepływu przez zbrojenie (J-Ring) oraz oceny segregacji zarówno mieszanki (VSI), jak i stwardniałego betonu pozwoliły na zakwalifikowanie zaprojektowanego betonu jako beton samozagęszczalny. Dodatkowo przeprowadzono badania właściwości reologicznych mieszanki betonowej reometrem BT2. Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań lekkich i zwykłych betonów samozagęszczalnych.

mgr inż. Mateusz Techman – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Technologii Betonu

dr hab. inż. Maria Kaszyńska, prof. ZUT – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Technologii Betonu

Abstract

Heavyweight concretes have been used for many years in radiation shielding. These concretes are produced with heavyweight natural aggregates such as magnetite or barite or with artificial aggregates such as ferrophosphorus. However, there is little to none information on the topic of heavyweight self-consolidating concretes. This paper shows an attempt to design and produce a heavyweight self-consolidating concrete with barite aggregate. The mix was acquired based on three steps design method, starting from designing of cement pastes, following with mortars and ending on concrete. Rheological tests of cement pastes, mortars and concretes as well as strength tests of mortars and concretes were performed in accordance with European Standards. Because of the characteristics of self-consolidating concretes and due to use of heavyweight aggregate, the key test was the evaluation of the resistance to segregation performed on a modified segregation column. The Slump Flow test, J-Ring test and Visual Stability Index allowed to categorize the designed concrete as self-consolidating. Additionally, rheological characteristics were measured with BT2 rheometer. The results were compared with results of lightweight and ordinary self-consolidating concretes.

1. Wprowadzenie

Betony samozagęszczalne powstały pod koniec lat 80. w Japonii [11] i uznane zostały jako jedna z największych innowacji w technologii betonu w ostatnich latach. Podstawową cechą betonu samozagęszczalnego jest jego zdolność do płynięcia, przepływu przez zbrojenie i szczelnego wypełnienia form lub deskowań, nie ulegając przy tym segregacji [8]. Ta ostatnia cecha, jest najtrudniejsza do osiągnięcia w procesie projektowania i wykonywania samozagęszczalnych mieszanek betonowych [1].

Nie istnieje jedna, uniwersalna metoda projektowania betonów samozagęszczalnych. Rozbudowany skład, między innymi o dodatki mineralne i domieszki chemiczne, powoduje, że w porównaniu do betonów zwykłych, ciężko jest przewidzieć dokładnie właściwości reologiczne i mechaniczne tych betonów [3, 6]. Betony samozagęszczalne z kruszywem zwykłym są już powszechnie stosowane na świecie szczególnie w gęsto zbrojonych konstrukcjach mostowych, w budynkach wysokich czy w prefabrykacji. Pojawiają się też już pierwsze realizacje z zastosowaniem betonów samozagęszczalnych, do których stosuje się tylko kruszywa lekkie lub kombinację kruszyw lekkich i zwykłych. Natomiast, uzyskanie samozagęszczalnych betonów ciężkich jest dużym wyzwaniem badawczym i technologicznym.

Badania nad betonami ciężkimi są od wielu lat licznie publikowane [4, 9, 10, 13]. W związku z ogłoszonym planem budowy elektrowni atomowej w Polsce wzrosło zainteresowanie technologią betonów ciężkich w naszym kraju. Betony ciężkie według normy PN-EN 206:2014 są betonami o gęstości w stanie suchym przekraczającej 2600 kg/m^3 . Stosowane są one głównie w celach ochrony radiologicznej w elektrowniach atomowych, jednostkach naukowych czy szpitalach. Dodatkowo mogą być stosowane jako przeciwwagi do mostów. Właściwości pochłaniania i zatrzymywania promieniowania rosną wraz ze wzrostem ciężaru betonu. Wraz ze wzrostem ciężaru mieszanki betonowej pojawiają się jednak dodatkowe problemy związane nie tylko z produkcją mieszanki, ale również z jej transportem i pompowaniem [2].

Do uzyskania betonów ciężkich konieczne jest zastosowanie kruszywa ciężkiego o gęstości powyżej 3000 kg/m^3 . Stosuje się zarówno kruszywa naturalne – baryt, magnetyt, ilmenit, jak i kruszywa sztuczne, głównie odpady hutnicze – żelazofosfor, śrut ołowiany [12]. Baryt jest kruszywem szczególnie często stosowanym do produkcji ciężkich zapraw i betonów [15, 16].

W artykule przedstawiono wyniki badań betonów prowadzące do uzyskania betonu ciężkiego o właściwościach samozagęszczalnych.

2. Projektowanie składu betonu

Projektując skład samozagęszczalnego betonu ciężkiego, jako bazę wyjściową przyjęto receptury ustalone dla zwykłych i lekkich betonów samozagęszczalnych [6, 7]. Zastosowano trzyetapową metodę projektowania, najpierw ustalając skład zaczynów, następnie zapraw i ostatecznie betonu. W badaniach zastosowano dwa cementy: cement portlandzki CEM I 42,5 R oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5 N, oba cementy z cementowni Górażdże. W lekkich i zwykłych betonach samozagęszczalnych frakcją pyłową stanowił cement, pył krzemionkowy i popiół lotny. W celu uzyskania betonu ciężkiego, w zaczynach zastąpiono wymienione dodatki pyłem barytowym lub magnetytowym, do wykonania zapraw użyto kruszywa barytowego i magnetytowego frakcji 0,125–2 mm lub piasku 0–2 mm,

a w samych betonach wykorzystano piasek, baryt i magnetyt frakcji 0,125–2 mm oraz baryt i magnetyt frakcji 2–8 mm. Na podstawie przeprowadzonych badań określono gęstości właściwe kruszyw: magnetytowego – 4,66 g/cm³, barytowego – 3,71 g/cm³.

2.1. Badania zaczynów i zapraw

Przeprowadzono badania rozplywu 6 zaczynów, w których przyjęto stałą ilość cementu (400 kg/m³) oraz dodatku mineralnego (160 kg/m³). Odpowiedni stosunek objętości wody do objętości pyłów (V_w/V_p) ustalono na podstawie badań rozplywu zaczynów przy użyciu stożka do zapraw. Następnie wyznaczono wartość współczynnika (β_p) wyrażającego stosunek objętości wody do objętości frakcji pyłowej, przy którym zaczyn nie wykazuje zdolności płynięcia, czyli rozplyw jest zerowy. Wartości współczynnika (β_p) dla badanych zaczynów zestawiono w tabeli 1, w zależności od cementu i dodatku. Procedurę wyznaczania (β_p) przedstawiono w pracy [5]. Najwyższe wartości współczynnika (β_p) uzyskały zaczyny z dodatkiem pyłu barytowego a najniższe z popiołem lotnym.

Tabela 1. Wartości współczynnika β_p

Dodatek	CEM I	CEM III
Pył magnetytowy	1.1605	1.2717
Pył barytowy	1.2289	1.2771
Popiół lotny	1.1141	1.2500

Aby ustalić optymalne dla zapraw samozagęszczalnych proporcje między objętością wody, pyłu i superplastyfikatora przeprowadzono badania wielkości oraz czasu rozplywu zapraw przy użyciu stożka do zapraw. Skład frakcji pyłowej w zaprawach był identyczny jak w zaczynach. W badaniach wstępnych ilość wody w zaprawie obliczono na podstawie wartości współczynnika β_p uzyskanego dla danej kompozycji spoiwa i danego cementu z badań zaczynów, przyjmując stosunek objętościowy woda/pył zgodnie z wzorem (1):

$$V_{wody} = 0,8 \cdot \beta_p \cdot V_{spoiwa} \quad (1)$$

Objętość kruszywa drobnego, którym w zaprawach był piasek, kruszywo magnetytowe lub barytowe frakcji 0,125–2,0 mm każdorazowo przyjmowano równą 40% objętości zaprawy.

$$V_{k.drobne} = 0,4 \cdot \frac{V_{zaczynu}}{0,6} \quad (2)$$

Zaprojektowano 9 zapraw z cementem CEM I 42,5 R oraz 9 zapraw z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N. Wyjściowe składy zapraw i ich oznaczenia zestawiono w tabeli 2. Przyjęto następującą zasadę oznaczania zapraw (pył/kruszywo drobne/cement). Pył: PM – pył magnetytowy, PB – pył barytowy, PL – popiół lotny; Kruszywo drobne: M – magnetytowe, B – barytowe, P – piasek naturalny; Cement: CI i CIII.

Ilość superplastyfikatora dobierano tak, aby uzyskać zalecane dla zapraw samozagęszczalnych parametry reologiczne. Wyjściowa ilość superplastyfikatora wynosiła 1.0%. Założeniem było otrzymanie zaprawy o jak największym rozplywie bez widocznej segregacji.

Tabela 2. Oznaczenia badanych zapraw

Skład	PM.M.CI	PM.M.CIII	PM.B.CI	PM.B.CIII	PM.P.CI	PM.P.CIII	PB.M.CI	PB.M.CIII	PB.B.CI	PB.B.CIII	PB.P.CI	PB.P.CIII	PL.M.CI	PL.M.CIII	PL.B.CI	PL.B.CIII	PL.P.CI	PL.P.CIII
CEM I	X		X		X		X		X		X		X		X		X	
CEM III		X		X		X		X		X		X		X		X		X
Pył magnetytowy	X	X	X	X	X	X												
Pył barytowy							X	X	X	X	X	X						
Popiół lotny													X	X	X	X	X	X
Kruszywo magnetytowe	X	X					X	X					X	X				
Kruszywo barytowe			X	X					X	X					X	X		
Piasek naturalny					X	X					X	X					X	X

Górną granicę rozplywu przyjęto na 30,0 cm. W przypadku zbyt dużego rozplywu lub segregacji, zmniejszono ilość superplastyfikatora lub zredukowano współczynnik korekcyjny wody k. Przykład procedury ustalania ostatecznego składu zaprawy (ilości wody i superplastyfikatora) pokazano na przykładzie zaprawy z kruszywem barytowym. Wyniki badań wielkości rozplywu i czasu rozplywu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki badań właściwości reologicznych zapraw

Zaprawa /pył/piasek/ cement/k/Sp	Wielkość i czas rozplywu po czasie							
	5 min		15 min.		25 min.		35 min.	
	d _{sr} [mm]	t [s]	d _{sr} [mm]	t [s]	d _{sr} [mm]	t [s]	d _{sr} [mm]	t [s]
PB/P/CI.0.8.1.0 *	30.0	-	-	-	-	-	-	-
PB.P.CI 0.8.0.8	23.6	6.5	30.0*	-	-	-	-	-
PB.P.CI 0.8.0.6	22.5	7.8	30.0*	-	-	-	-	-
PB.P.CI 0.8.0.4	20.6	9.4	28.1	20.1	28.3	27.2	28.9	29.7
PB.P.CIII 0.8.1.0 *	30.0	-	-	-	-	-	-	-
PB.P.CIII 0.7.1.0 *	30.0	-	-	-	-	-	-	-
PB.P.CIII 0.6. 1.0	29.8	36.0	30.0*	-	-	-	-	-
PB.P.CIII 0.6. 0.8	11.2	-	22.2	7.5	17.4	8.0	13.8	6.0

*Zaprawa wykazywała oznaki segregacji

Badanie pokazało, iż w przypadku zapraw na cemencie hutniczym konieczna była znaczna redukcja wody w celu uniknięcia segregacji. Zaprawa do 15 minut osiągała maksimum rozplywu, po czym tężała i zmniejszała rozplyw.

Po ustaleniu składu zapraw charakteryzujących się odpowiednimi właściwościami reologicznymi przeprowadzono badania gęstości, wizualnej stabilności oraz normowe badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie na beleczkach 4x4x16 cm po 28 dniach dojrzewania. Wyniki badań zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Właściwości badanych zapraw

Zaprawa	Średni rozptyw [mm]	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
PB.M.CI	259	3460	9.9	75.2
PB.M.CIII	290	3400	15.3	94.3
PB.B.CI	230	3160	5.8	56.7
PB.B.CIII	204	3110	10.4	63.8
PB.P.CI	300	2480	11.7	88.3
PB.P.CIII	300	2470	11.3	87.8
PM.M.CI	231	3310	10.6	79.2
PM.M.CIII	286	3460	12.6	89.1
PM.B.CI	275	3110	6.3	55.7
PM.B.CIII	250	3060	10.6	70.8
PM.P.CI	258	2420	8.2	72.4
PM.P.CIII	298	2570	13.2	80.4
PL.M.CI	235	3380	12.8	73.9
PL.M.CIII	283	3190	11.6	73.1
PL.B.CI	275	2840	7.4	57.6
PL.B.CIII	280	2910	8.9	56.0
PL.P.CI	207	2310	9.8	75.5
PL.P.CIII	300	2400	12.4	84.3

Zaprawy z piaskiem niezależnie od rodzaju zastosowanego pyłu uzyskały wymagane rozptywy i gęstości charakterystyczne dla zapraw zwykłych tj. od 2310 kg/m³ do 2570 kg/m³. Zaprawy z kruszywem drobnym barytowym od 2840 kg/m³ do 3160 kg/m³, a z kruszywem drobnym magnetytowym od 3190 do 3400 kg/m³, czyli wartości charakterystyczne dla zapraw ciężkich. Najniższe wytrzymałości uzyskały zaprawy z kruszywem barytowym.

2.2. Projektowanie betonu ciężkiego

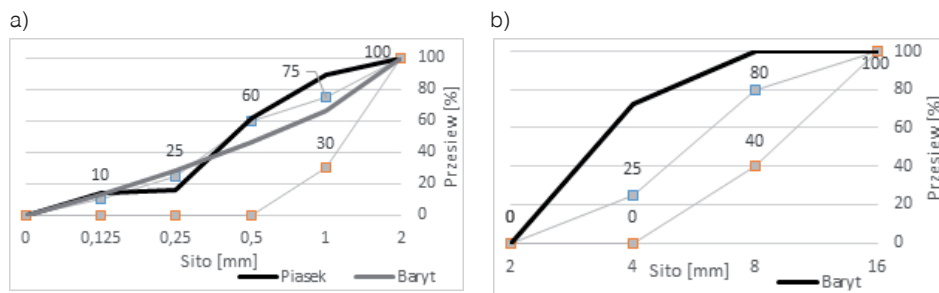
Skład betonu ustalano przez dodanie kruszywa frakcji 2–8 mm do zaprojektowanych wcześniej zapraw z pyłem magnetytowym i barytowym oraz piaskiem naturalnym. Do wykonania mieszanek wykorzystano frakcje 2–4 mm i 4–8 mm w stosunku 50/50. Kruszywo barytowe pochodziło z polskiego złoża barytowo-kwarcowego Boguszów-Gorce, a kruszywo magnetytowe z Kiruny w Szwecji. Kompozycje pyłów i kruszyw w wybranych mieszankach przedstawiono w tabeli 5. Użycie piasku jako kruszywa drobnego pozwoliło

na uzyskanie lepszego rozplywu mieszanki kosztem jej gęstości. Aby uzyskać samozagęszczalną mieszankę betonu ciężkiego wykonano wiele betonów o zmiennej kompozycji kruszywa, odpowiednio modyfikując zawartość wody i superplastyfikatora. Każdorazowo wykonywano test rozplywu (Slump Flow) oraz oceniano wizualnie stabilność mieszanki. Dla mieszanek wykazujących właściwości samozagęszczalne i odporność na segregację wykonano test przepływu przez zbrojenie (J-Ring). W tabeli 5 przedstawiono również właściwości charakterystyczne zaprojektowanych betonów: rozplyw (uśrednioną średnicę rozplywu oraz czas płynięcia t_{500}), gęstość oraz wstępne wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonane na próbkach sześciennych 10x10x10 cm.

Tabela 5. Kompozycja składu mieszanek pyłów i kruszywa oraz gęstość i właściwości reologiczne i wytrzymałościowe

Mieszanka	M3	M4	M5	M6	M7
CEM I 42,5 R, [kg/m ³]	400	-	-	-	-
CEM III 42,5 N, [kg/m ³]	-	400	400	400	400
Pył magnetytowy, kg/m ³	160	160	160	-	-
Pył barytowy, kg/m ³	-	-	-	160	160
Piasek 0/2, kg/m ³	646	672	672	730	735
Magnetyt 2/4, kg/m ³	999	1048	-	985	-
Baryt 2/4, kg/m ³	-	-	834	-	784
Magnetyt 4/8, kg/m ³	999	-	1048	985	-
Baryt 4/8, kg/m ³	-	834	-	-	784
Gęstość, [kg/m ³]	3190	3070	3170	3380	2960
Wytrzymałość na ściskanie, [MPa]	68.0	72.3	81.3	88.0	77.2
Wytrzymałość na rozciąganie, [MPa]	4.2	4.3	4.5	4.7	4.2
Slump Flow, rozplyw, [mm]	35.0	51.0	59.5	62.0	66.0
Slump Flow, czas t_{500} [s]	-	21.2	15.6	11.0	12.6

Najlepsza z uwagi na urabialność i stabilizację właściwości w czasie była mieszanka M7 z kruszywem barytowym. Krzywe przesiewu barytu frakcji 0–2 mm i 2–8 mm oraz zastosowanego piasku przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przesiew zastosowanych kruszyw a) barytu i piasku 0–2 mm b) barytu 2–8 mm

Na fotografii 1 pokazano rozplływ mieszanki M7 nie wykazującej żadnej segregacji, a na fotografii 2 przykładowo mieszankę rozsegregowaną M3 i z lekką segregacją M6.

a)



b)



Fot. 1. a) Mieszanka M7 betonu ciężkiego w badaniu rozplwy i b) zbliżenie na krawędź

a)



b)



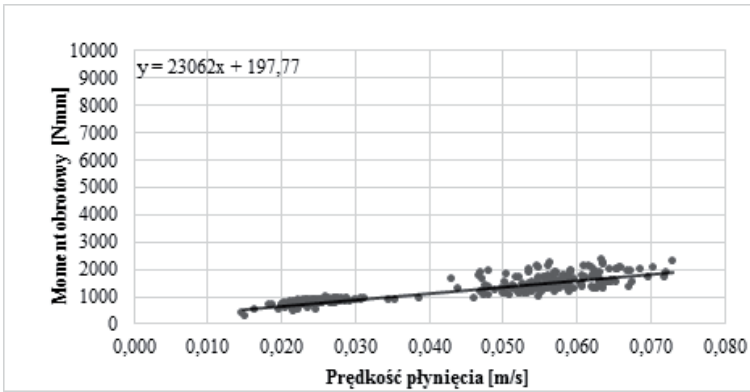
Fot. 2. a) Mieszanka M3 rozsegregowana i b) mieszanka M6

3. Wyniki badań

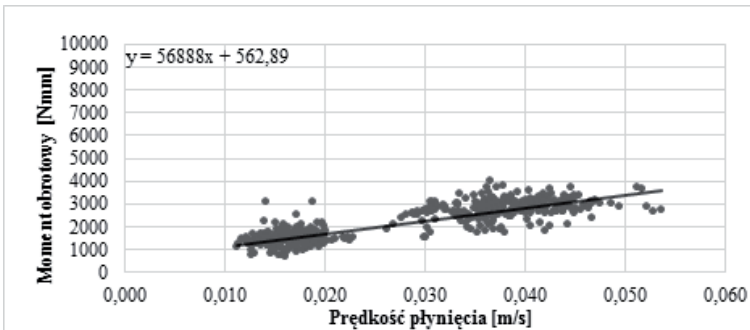
3.1. Badanie właściwości reologicznych

Dla zaprojektowanej mieszanki M7 ciężkiego betonu samozagęszczalnego wykonano dodatkowo pomiar właściwości reologicznych reometrem BT2. Badanie przeprowadzone było trzykrotnie: po 10, 30 i 60 minutach od zarobienia mieszanki. Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań samozagęszczalnego betonu zwykłego oraz samozagęszczalnego betonu lekkiego, aby wykazać jaki jest wpływ rodzaju kruszywa na właściwości reologiczne mieszanek. Mieszanki te odpowiednio zawierały kruszywo naturalne granitowe oraz lekkie kruszywo Pollytag. Punktem wyjściowym porównania mieszanek był ich rozplływ, wynoszący między 660 a 680 mm.

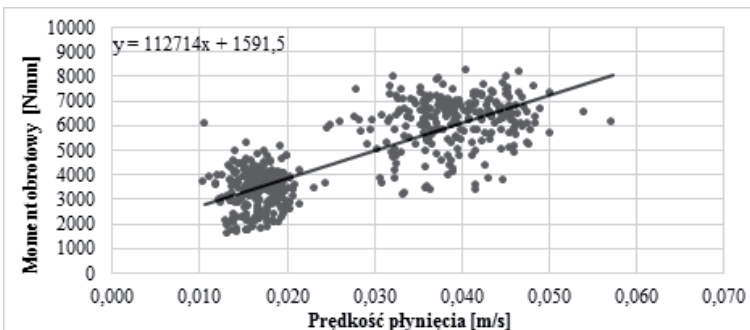
Na rysunkach 2–10 przedstawiono wyniki badań właściwości reologicznych mieszanek samozagęszczalnych uzyskane przy pomocy reometru BT2 po 10, 30 oraz 60 minutach od zakończenia mieszania.



Rys. 2. Wynik badania betonu ciężkiego po 10 minutach

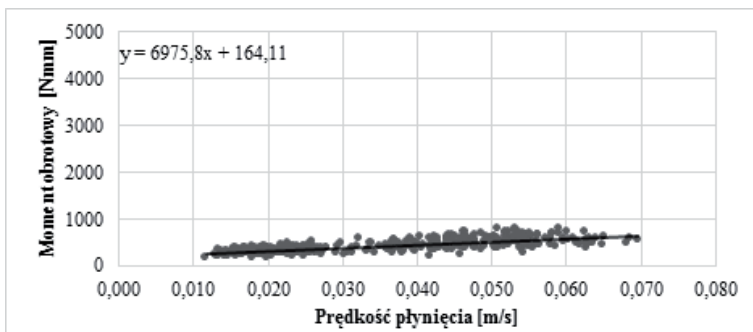


Rys. 3. Wynik badania betonu ciężkiego po 30 minutach

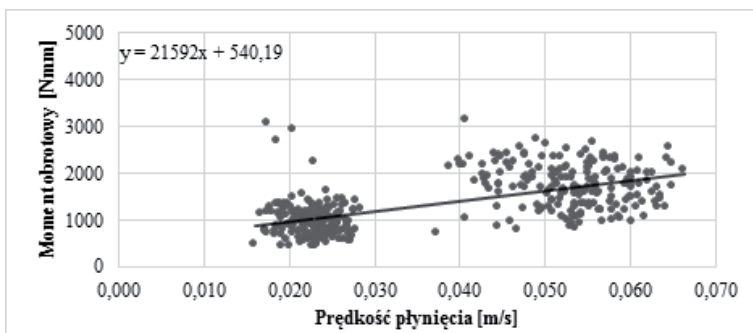


Rys. 4. Wynik badania betonu ciężkiego po 60 minutach

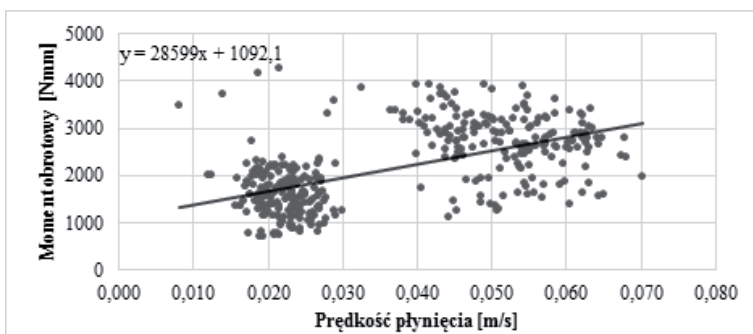
Badanie wykazało zdecydowany przyrost granicy płynięcia mieszanki. Oznacza to, że mieszanka szybko tężeje, ograniczając jej możliwości rozplywu. Lepkość mieszanki wzrastała liniowo w czasie.



Rys. 5. Wynik badania betonu lekkiego po 10 minutach

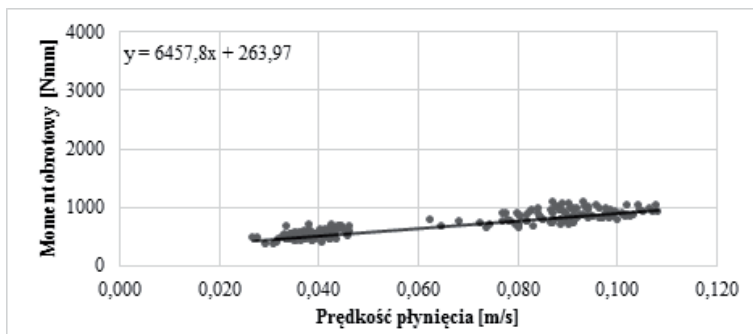


Rys. 6. Wynik badania betonu lekkiego po 30 minutach

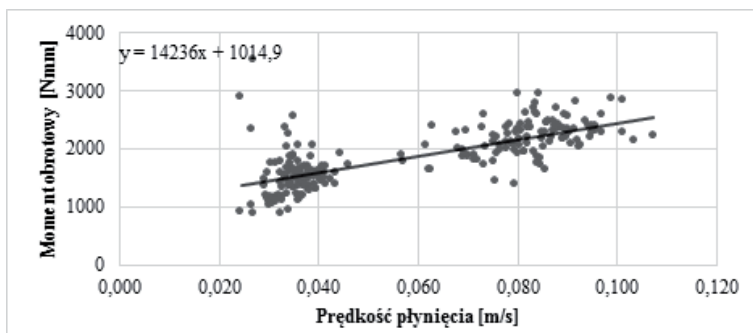


Rys. 7. Wynik badania betonu lekkiego po 60 minutach

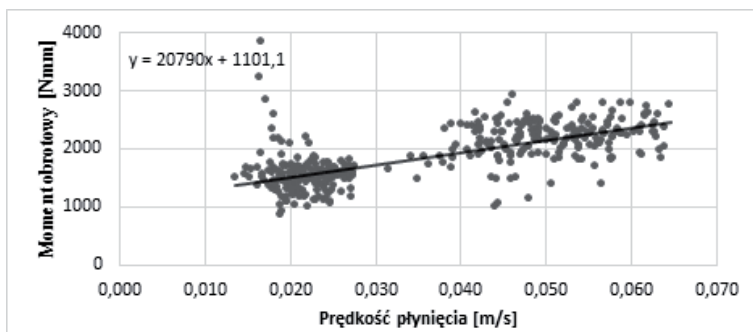
Mieszanka lekka, podobnie jak mieszanka ciężka, charakteryzowała się znacznym przyrostem granicy plastyczności w czasie. Lepkość mieszanki wzrosła trzykrotnie między 10 a 30 minutą, ale tylko o 33% między 30 a 60 minutą.



Rys. 8. Wynik badania betonu zwykłego po 10 minutach



Rys. 9. Wynik badania betonu zwykłego po 30 minutach



Rys. 10. Wynik badania betonu zwykłego po 60 minutach

Podobnie jak w przypadku mieszanki ciężkiej, mieszanka betonu zwykłego zwiększała swoją lepkość liniowo w czasie. Między 30. a 60. minutą, mieszanka zwiększyła swoją granicę płynięcia jedynie o 10%. Wśród trzech porównywanych mieszanek, mieszanka betonu ciężkiego charakteryzowała się najwyższą lepkością początkową, jak i końcową. Wartość ta po 10 minutach była ponad trzykrotnie, a po 60 minutach ponad czterokrotnie większa niż w pozostałych mieszankach.

Wyniki lepkości plastycznej i granicy płynięcia zbadanych mieszanek zostały umieszczone w tabeli 6.

Tabela 6. Zestawienie wyników pomiaru reometrem BT2

	Lepkość plastyczna [Nmms]			Granica płynięcia [Nmm]		
	10 min	30 min	60 min	10 min	30 min	60 min
Beton lekki	6976	21592	28599	164	540	1092
Beton zwykły	6458	14236	20790	264	1015	1101
Beton ciężki	23062	56888	112714	198	563	1592

W tabeli 7 przedstawiono charakterystyczne wartości wyników normowych badań właściwości reologicznych i gęstości trzech mieszanek samozagęszczalnych.

Tabela 7. Wyniki normowych badań reologicznych i gęstości mieszanki

Beton	Rozpływ		Przepływ przez zbrojenie			VSI	Gęstość kg/m ³
	d _{sr} [mm]	t [s]	d _{sr} [mm]	t [s]	Δh [mm]		
Ciężki	660	12.6	600	34.3	10	0	2960
Zwykły	670	5.1	590	13.5	10	0	2380
Lekki	680	7.0	630	11.0	8	0	1920

Samozagęszczalny beton ciężki charakteryzował się zdecydowanie dłuższym czasem rozplywu niż beton zwykły czy lekki. Kruszywo barytowe, w przeciwieństwie do kruszywa naturalnego i sztucznego Pollytag, jest kruszywem łamanym. Wpływa to zdecydowanie negatywnie na urabialność mieszanki.

3.2. Ocena odporności betonu na segregację

Jednym z największych problemów przy wykonywaniu betonów samozagęszczalnych jest ich odporność na segregację. Norma PN-EN 12350-11 zaleca zastosowanie do oceny odporności na segregację metody sitowej. W badaniach autorzy zastosowali tubę segregacyjną własnego pomysłu, wzorując się na zaleceniach normy amerykańskiej ASTM C1610. Wykonano tubę o średnicy 16 cm i wysokości 60 cm, do której od góry wiano mieszankę betonową. Po 7 dniach tuba została rozcięta, a jej połowy zostały zważone w celu sprawdzenia różnic w masie.

Na fotografii 3 przedstawiono wygląd tuby i przekrój przez próbkę ciężkiego betonu wyjętą z tuby.

Wyniki pomiaru segregacji pokazały niewielką różnicę w wadze próbek, sięgającą 0,2 kg, co można przypisać niedoskonaliej powierzchni górnej próbki. Przekrój próbki nie wykazywał żadnych oznak segregacji. Widoczne jednak były niewielkie pory, co wskazuje na potrzebę wykonania pomiaru ilości powietrza w mieszance, jak również przenikania wody pod ciśnieniem. Brak całkowitego odpowietrzenia się mieszanki jest prawdopodobnie spowodowany jej dużą lepkością.

a)



b)



Fot. 3. a) Tuba segregacyjna i b) przekrój przez próbkę ciężkiego betonu wyjętą z tuby

3.3. Właściwości wytrzymałościowe

Wytrzymałość betonu na ściskanie badano na próbkach 15x15x15cm, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu na próbkach 10x10x40 cm, a wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na połówkach próbek otrzymanych w badaniu zginania. Wszystkie próbki były przechowywane w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza 95% przez 28 dni. Uzyskane średnie wyniki zestawiono w tabeli 8.

Tababela 8. Właściwości mechaniczne zaprojektowanego betonu

Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]
73,00	5,92	10,93

Wyniki wytrzymałości na ściskanie pozwalają sklasyfikować zaprojektowany beton jako beton wysokiej wytrzymałości.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, iż możliwe jest wykonanie samozagęszczalnego betonu ciężkiego. W literaturze światowej znaleziono tylko jedną publikację dotyczącą próby wykonania samozagęszczalnego betonu ciężkiego. W pracy [14] osiągnięto rozryw rzędu 63 cm w czasie 4 sekund. Wyniki wytrzymałości na ściskanie były natomiast zdecydowanie niższe, około 25 MPa.

Przedstawione badanie wskazuje na kilka istotnych problemów związanych z projektowaniem i wykonaniem samozagęszczalnych betonów ciężkich.

Wybrana metoda projektowania zaczyn – zapraw – beton ma wiele wad. Mimo założenia wstępnej ilości wody, zaprawy wymagały korekty składu w czasie mieszania, co ostatecznie wpłynęło na duże różnice między założonym a ostatecznym składem.

Badanie wykazały, że w przypadku zapraw i betonów ciężkich z ciężkim pyłem, ilość superplastyfikatora drastycznie zwiększa się w czasie przejścia między drugim a trzecim etapem projektowania. Ilość superplastyfikatora, praktycznie dwukrotnie przekroczyła ilość zalecaną przez producenta.

Po trzecie, mieszanka samozagęszczalnego betonu ciężkiego charakteryzowała się dużą lepkością. Może to stanowić problem w przypadku elementów gęsto zbrojonych, mimo spełnienia wymogów badania J-Ring. Dodatkowo duża lepkość mieszanki nie sprzyja odpowietrzeniu, co było widoczne w przekroju próbek.

Przeprowadzone badania dają interesujące wyniki, które mogą posłużyć do dalszego rozwijania idei samozagęszczalnych betonów ciężkich.

Literatura

- [1] ACI Committee 304, Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete. ACI 304R-00. American Concrete Institute, 2009.
- [2] A.M. Glinicki, Długotrwała funkcjonalność betonu w konstrukcjach osłonowych elektrowni jądrowych. Instytut Podstawowych Problemów Technicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2015.
- [3] J. Golaszewski, J. Szwabowski. Projektowanie betonu samozagęszczalnego. *Budownictwo Technologiczne Architektura* 2011; 2: 62–69.
- [4] M.A. González-Ortega, S.H.P. Cavalaro, A. Aguado. Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* 2015; 74: 169–175.
- [5] M. Kaszyńska. Beton samozagęszczalny – rozwój technologii i wyniki badań. Konferencja Dni Betonu – Tradycja i nowoczesność, Wisła, 2004.
- [6] M. Kaszyńska. Effect of aggregate mix composition on light-weight self-consolidating concrete, 6-th International RILEM Symposium on SCC and 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, SCC2010 Montreal, 26–29 sept. 2010.
- [7] M. Kaszyńska. Lekkie betony wysokowartościowe samozagęszczalne – badania i ocena możliwości ich wykonywania. *Inżynieria i Budownictwo*, V/2007.
- [8] K.H. Khayat, G.D. Schutter. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. RILEM State-of-the-Art Reports 2014; 14.
- [9] S. Kilincarslana, I. Akkurtb, C. Basyigita. The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering* 2006; 424: 83–86.
- [10] A.M. Neville. Właściwości betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2012.
- [11] H. Okamura. Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials* 1998; 1: 378–383.
- [12] A.S. Ouda. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding, *HBRC Journal* 2015; 11: 328–338.
- [13] S. Özen., C. Sengül., T. Erenoglu, U. Çolak, I.A. Reyhancan, M.A. Tasdemir. Properties of Heavyweight Concrete for Structural and Radiation Shielding Purposes, *Arabian Journal for Science and Engineering* 2016; 41:1573-1584.
- [14] D. Revuelta, A. Barona, D. Navarro. Measurement of properties and of the resistance to segregation in heavyweight, self-compacting barite concrete, *Materiales de Construcción* 2009; 59, s. 31–44.
- [15] K. Saidani, L. Ajam, M. Ben. Barite powder as sand substitution in concrete: effect on some mechanical properties. *Construction and Building Materials* 2015; 95: 287–295.
- [16] E. Yüksel, Y. Berivan. Investigation of some physical and mechanical properties of concrete produced with barite aggregate. *Scientific Research and Essays* 2010; 5: 3826–3833.