

Wybrane właściwości betonu samozagęszczalnego modyfikowanego zbrojeniem rozproszonym i granulatem styropianowym

SELECTED PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MODIFIED WITH FIBER REINFORCEMENT AND POLYSTYRENE BEADS

Streszczenie

Mieszanki betonowe z granulatem styropianowym są stosowane od dawna ze względu na ich zmniejszoną gęstość i poprawione właściwości termoizolacyjne. Wadą styropianu jest znaczne obniżenie wytrzymałości betonu. Przedmiotem badań były betony samozagęszczalne, które zaliczane są do betonów nowej generacji. W referacie przedstawiono badania mające na celu sprawdzenie możliwości polepszenia ich cech przy pomocy styropianu. Mieszanka betonowa była modyfikowana różnymi ilościami granulatu. Badania przeprowadzono w trzech wariantach: bez dodatku włókien, z włóknami stalowymi i z włóknami propylenowymi. Aby ocenić samozagęszczalność przeprowadzono test Slump-flow i V-funnel. Wytrzymałość na ściskanie badano na próbkach wielkości 100x100x100 mm. Aby wykonać badania wytrzymałości na zginanie wykonywano belki o wymiarach 350x100x100 mm. Dodatkowo przeprowadzono drugi etap badań, w którym starano się wykonać beton o jak najlepszych właściwościach, korzystając z doświadczeń z pierwszego etapu. Prowadzić do tego miała zmiana ilości włókien polipropylenowych w mieszance. Podczas prac obserwowano występowanie dwóch znanych już wcześniej problemów: wpływu granulatu na powierzchnię mieszanki oraz znaczną utratę wytrzymałości na skutek dodatku styropianu. Zjawiska te ograniczyły ilość granulatu, która mogła zostać dodana do mieszanki. We wnioskach opisano dodatkowo pozytywny wpływ równoczesnego stosowania granulatu oraz włókien.

Abstract

Concrete mixes with granulated polystyrene are used for a long time due to their reduced density and improved thermal insulation. A disadvantage of polystyrene is significantly reduced strength of the concrete. The research was self compacting concretes, which are among the new generation of concretes. The paper presents a study to examine the possibility of improving their characteristics with polystyrene. The concrete mix was modified with different amounts of polystyrene beads. Studies carried out in three variants: without addition of fibers, with steel fibers and with fibers of propylene. To examine self-compacting the test Slump-flow and V-funnel were being performed. Compressive strength was tested on cubes of size 100x100x100 mm. To perform the flexural strength tests, beams with dimensions 350x100x100 mm were made. Additionally, a second stage of the study was conducted, in which concrete with best characteristics was tried to make with experience from the first stage. This would lead to change in the quantity of steel fibers and polypropylene in the concrete mix. During the work two previously known problems has been observed: the flow of beads to the surface of the mixture and a significant loss in strength due to the addition of polystyrene. These phenomenons have reduced the amount of granules, which could be added to the mix. In conclusions, in addition, a positive effect of coincident use of granules and fibers was described.

1. Wprowadzenie

Granulat styropianowy jest dodawany do betonu w celu zmniejszenia jego przewodności cieplnej oraz obniżenia ciężaru własnego konstrukcji. Jest to możliwe dzięki dużej ilości porów powietrznych zamkniętych w ziarnach granulatu podczas jego wytwarzania, kiedy to ziarna polistyrenu zostają podgrzane i zwiększają swoją objętość od 15 do 65 razy. Stąd też inną nazwą styropianu jest polistyren ekspandowany. W zależności od przebiegu procesu spieniania, ziarna granulatu mogą mieć różną gęstość, która nie przekracza jednak 100 kg/m^3 . Jego gęstość nasykowa waha się natomiast pomiędzy 8 a 30 kg/m^3 . Wartości te stawiają granulat styropianowy wśród najlepszych kruszyw. Inną ważną cechą granulatu jest możliwość jego uzyskiwania w drodze recyklingu zużytych opakowań styropianowych, co sprawia, że jest on materiałem ekologicznym nie tylko ze względu na termoizolacyjność. Do jego stosowania skłaniać może również fakt podpisania przez ponad 30 krajów porozumienia w sprawie zwiększenia ponownego wykorzystania styropianu. Pokazuje to, że jego stosowanie wpisuje się w panujące obecnie trendy związane ze zrównoważonym rozwojem i ekologią [1].

Stosowanie granulatu wiąże się jednak z problemami występującymi często również przy wytwarzaniu innych betonów lekkich. Po pierwsze, gęstość objętościowa kruszywa jest mniejsza niż matrycy cementowej, co może być powodem wypływu kruszywa na powierzchnię. Gęstość granulatu sprawia, że zapobiegnięcie jego wypływowi jest czasami szczególnie trudne – dzieje się tak gdy lepkość matrycy cementowej jest zbyt niska. Szczególnie podatne na to zjawisko są mieszanki samozagęszczalne, z założenia charakteryzujące się obniżoną lepkością [2]. Ponadto w tego typu mieszankach stosowanie kruszywa o mniejszej gęstości zmniejsza efekty procesu samozagęszczania ze względu na to, że zachodzi on pod wpływem działania grawitacji [2]. Zaletą granulatu jest fakt, że jego znikoma nasiąkliwość (poniżej 2%) sprawia, że nie wchłania on wody zarobowej z mieszanki betonowej jak wiele innych kruszyw lekkich o dużej porowatości. Absorbacja wody zarobowej zakłóca hydratację cementu i jest przyczyną zwiększenia skurczu autogenicznego [3].

Jak pokazują dotychczasowe badania, w przypadku lekkich betonów samozagęszczalnych, przy zastosowaniu odpowiedniego rodzaju kruszywa lekkiego, nie jest problemem uzyskanie wytrzymałości na ściskanie większej niż 30 MPa , a niektóre wyniki przekraczają nawet 60 MPa [4], [5], [6]. Jak dotąd podejmowane próby projektowania tego typu betonów z dodatkiem styropianu dowodzą, że możliwe jest wykonywanie mieszanek zawierających do 30% granulatu w swojej objętości bez utraty samozagęszczalności i bez wypływu kruszywa; styropian powodował natomiast zawsze znaczną utratę wytrzymałości, często o ponad 50% [7], [8], [9]. Tak wysoka utrata wytrzymałości jest często przeszkodą w stosowaniu tego typu betonów w elementach konstrukcyjnych. Za takie, według podziału proponowanego przez stowarzyszenie RILEM (fr. Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux) zrzeszające ekspertów i laboratoria badające materiały konstrukcyjne i konstrukcje, uznaje się betony lekkie o wytrzymałości większej niż 15 MPa .

W części badanych betonów stosowano włókna stalowe i polipropylenowe. Stalowe zazwyczaj zwiększają wytrzymałość betonu, chociaż jak pokazują np. badania [10], nie jest to regułą. Włókna te wpływają także na urabialność mieszanki betonowej najczęściej pogarszając ją, jednak jak zaobserwowano we wcześniej wykonywanych badaniach, mogą one także zwiększać średnicę rozplywu mieszanki dzięki dużej masie oraz gładkiej, często płaskiej powierzchni [11]. Włókna polipropylenowe, ze względu na ich moduł sprężystości wynoszący w przybliżeniu 2 MPa , stosuje się przede wszystkim z myślą o przeciwdziałaniu

niu zarysowaniu skurczowemu w początkowym okresie życia betonu. Współpraca betonu i polipropylenu jest możliwa do momentu osiągnięcia przez beton modułu sprężystości włókien. Jak dowodzą badania, obecność polipropylenowych włókien w stwardniałym betonie nie jest jednak bez znaczenia i jego właściwości mechaniczne są poprawione [12], [13]. Dodatkową zaletą tych włókien jest poprawa odporności ogniowej betonu (zjawisko tzw. spallingu) [14]. W przedstawionych badaniach włókna miały spełnić także dodatkową rolę – utrudnić wypływanie granulatu na powierzchnię mieszanki.

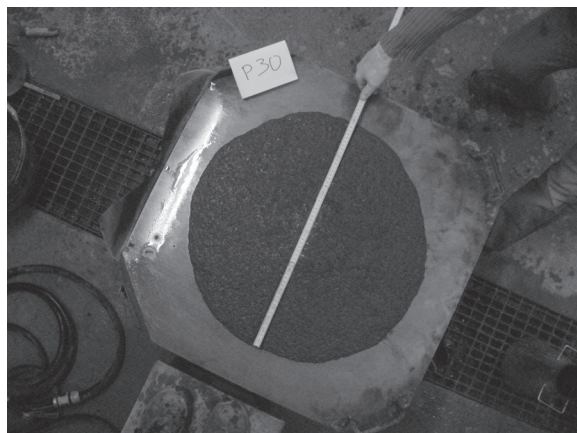
W niniejszym opracowaniu poszukiwana jest odpowiedź na pytanie, jaką ilość granulatu styropianowego można dodać do mieszanki betonowej tak, aby nie utraciła ona samozagęszczalności i nie ulegała segregacji oraz jak granulaty wpływają na wytrzymałość tego betonu.

2. Zakres badań

Badano wpływ zmiany udziału objętościowego granulatu styropianowego w mieszance na właściwości mechaniczne i reologiczne trzech betonów. Przedmiotem badań był jeden beton bez dodatku włókien i dwa kompozyty fibrobetonowe, jeden z dodatkiem włókien stalowych, a drugi polipropylenowych. Składy badanych mieszanek oraz ich właściwości przedstawiono w tabeli 1. Były one punktem wyjścia dla tworzenia mieszanek o różnym udziale objętościowym granulatu. Wyjątkiem jest mieszanka oznaczona symbolem B4, która zawierała stałą ilość granulatu oraz włókien stalowych i w której zmienną była ilość dodanych włókien polipropylenowych. Została ona wykonana dodatkowo, aby sprawdzić, czy dozowanie włókien polipropylenowych będzie zapobiegało segregacji granulatu, który w niej występował. Charakterystykę obu rodzajów włókien przedstawia tabela 2.

Zmiana ilości granulatu lub włókien w mieszance powodowała zmianę składu betonu określanego w przeliczeniu na 1 m^3 , zawsze odbywała się jednak przy zachowaniu proporcji pozostałych składników. Ze uwagi na ograniczoną ilość miejsca w przeliczeniu na 1 m^3 prezentowane są jedynie początkowe składy betonów.

W celu określenia, czy lepkość mieszanki pozwala na określenie jej jako mieszankę jest samozagęszczalną, mierzono średnicę maksymalnego rozplywu Slump-Flow (SF).



Fot. 1. Pomiar rozplywu Slump-flow




Fot. 2. Aparat pomiarowy V-funnel

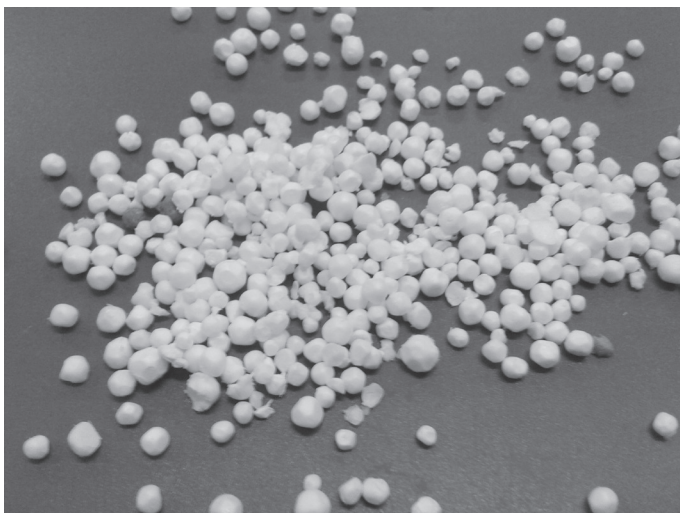
Powinna ona zawierać się pomiędzy 550 a 850 mm. Dodatkowo po 31 minutach od dodania wody do mieszanki, wykonywano badanie V-funnel, służące do oceny lepkości i zdolności wypełniania mieszanki na podstawie czasu samoczynnego wypływu mieszanki z aparatu o kształcie lejka. Czas upływający od dodania wody do badania pozwalał ocenić, czy mieszanka zachowuje stabilność wraz z upływem czasu. Stabilność mieszanki badano ostatecznie na podstawie przelomów próbek. Obserwacje poczynione podczas oceny stabilności znaleźć można w podpunktach opracowania dot. reologii mieszanek oraz w Tabeli 3. W mieszance samozagęszczalnej żaden ze składników nie może ulegać segregacji. Dlatego też nawet jeśli jedynie granulaty ulegały segregacji, uznawano, że mieszanka nie jest samozagęszczalna. Aby określić wpływ granulatu na wytrzymałość betonu wykonywano 3 próbki o wymiarach 100 x 100 x 100 mm przeznaczone do badania wytrzymałości na ściskanie, oraz 2 belki o wymiarach 100 x 100 x 350 mm do badania wytrzymałości na zginanie. Jeśli wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$ wynosiła nie mniej niż 15 MPa, beton określano jako konstrukcyjny.

Tabela 1. Składy mieszanek betonowych

Składnik	Ilość na 1m ³ [kg]			
	B1	B2	B3	B4
Symbol składu betonu	B1	B2	B3	B4
Cement CEM I 42,5 R	500,694	498,985	495,386	495,76
Mikrokrzemionka	39,808	39,575	39,289	39,31
Woda	209,920	209,574	208,062	207,45
SP BASF Gl. SKY 592	17,515	17,464	17,339	17,35
Stabilizator RheoMatrix 100	1,681	1,635	1,623	1,62
Piasek 0–2 mm	773,156	769,985	764,432	765,02
Kruszywo bazaltowe 2–4 mm	483,002	480,918	477,450	477,81
Kruszywo bazaltowe 4–8 mm	483,002	480,918	477,450	477,81
Forta Ferro 19/1.0 kg	-	0,3% obj.	-	-
KE 20/1,7	-	-	1,0% obj.	0,5% obj.
Granulat styropianowy	-	-	-	4% obj.
w/c	0,42	0,42	0,42	0,42
	Wyniki badań			
Max. rozpliw SF [cm]	63	63	70	66
Segregacja	nie	nie	nie	granulat
Wytrz. na śc. $f_{cm,28}$ [MPa]	72,6	73,7	64,1	67,2
Wytrz.na zgin. f_{ct} [MPa]	6,8	6,6	5,9	5,9

Tabela 2. Charakterystyka włókien [15], [16]

Nazwa	Długość [mm]	Kształt	Materiał	Wytrzymałość [N/mm ²]
KE 20/1.7	20±10%		blacha stalowa zimnowalco-wana	770±15%
FORTA FERRO 19/1.0 kg	19	polipropylen – filamenty skręcone w wiązki, kopolimer – fibryle połączone w siateczkę rombów	polipropyleni kopolimer	758



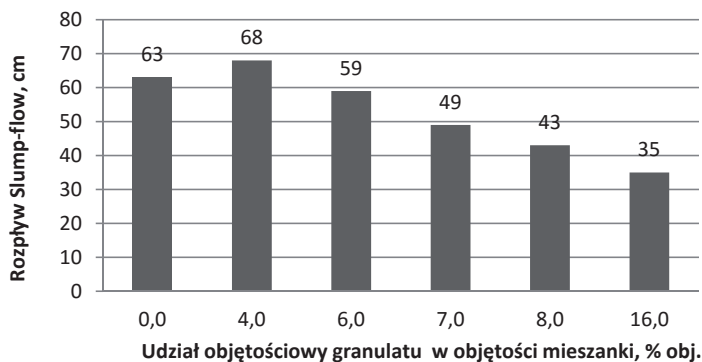
Fot. 3. Zastosowany w badaniach granulaty styropianowy.

3. Wpływ granulatu styropianowego na właściwości betonu nie zawierającego włókien

3.1 Właściwości reologiczne

Beton o składzie B1 nie zawierał włókien. Na rys. 1 i 2 przedstawiono wpływ udziału objętościowego granulatu na wyniki badania Slump-flow oraz V-funnel.

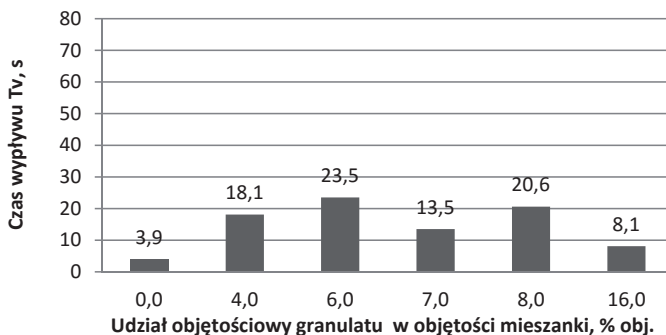
Dodatek granulatu styropianowego za każdym razem powodował utratę samoza-gęszczalności przez beton o składzie B1. Dla mniejszych ilości granulatu (4% i 6% obj. całej mieszanki) jej utrata była skutkiem segregacji mieszanki. Dla objętości 7%, 8% i 16% segregacja podczas badania Slump-flow nie zachodziła, ale mieszanki nie były samoza-gęszczalne ze względu na spadek średnicy rozplwy poniżej 550 mm.



Rys. 1. Rozpływ Slump-flow dla składu mieszanki B1 (bez włókien)

Badanie V-funnel wykazuje pogorszenie urabialności wskutek dodatku granulatu. Mieszanki o jego zawartości 4 i 6%, które już wcześniej ulegały segregacji, podczas badania zachowywały się nietypowo. Początkowo ich przepływ następował bardzo powoli, by w pewnym momencie gwałtownie przyspieszyć. Nawet jeśli te dwa wyniki zostałyby uznane za niemiernodajne, nie można wskazać jednoznacznej tendencji do wzrostu lub spadku lepkości wraz ze zwiększaniem ilości granulatu.

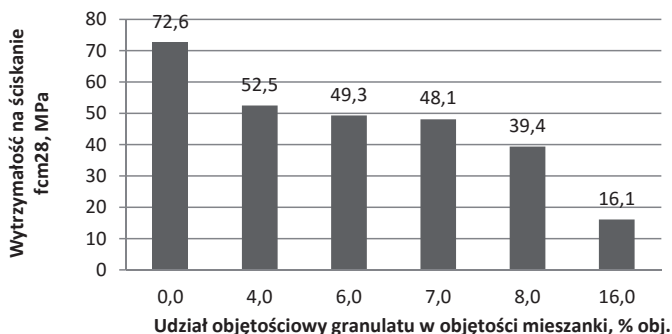
Podczas oceny stabilności mieszanek na podstawie przełomu próbek potwierdzono występowanie segregacji dla próbek o zawartości granulatu równych 4 i 6%. W innych przypadkach segregacji nie stwierdzono.

Rys. 2. Czas t_v , w jakim mieszanka wypływa z aparatu V-funnel dla składu B1 (bez włókien)

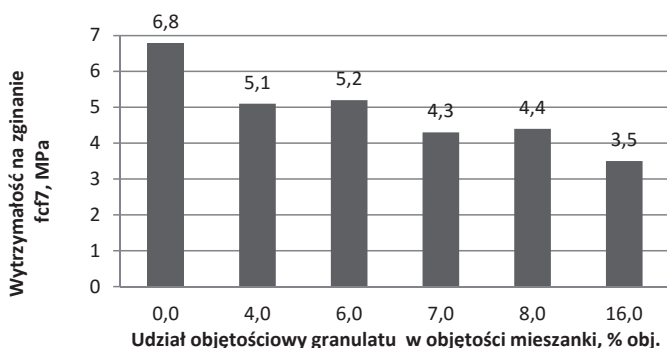
3.2. Właściwości mechaniczne

Dodatek granulatu styropianowego do betonu o składzie B1, nie zawierającego włókien, nie powodował utraty wytrzymałości niepozwalającej klasyfikować go jako konstrukcyjny.

Na rysunku 3 widać spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem udziału objętościowego granulatu styropianowego. Dodatek granulatu w ilości 4%, 6% i 7% obj. powodował spadek wytrzymałości betonu o około 20 MPa, w stosunku do betonu bez granulatu. Dodatek granulatu w ilości 8% i 16% obj. powoduje spadek wytrzymałości co najmniej o połowę.

Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm28} betonu o składzie B1 (bez włókien)

Rysunek 4 przedstawia spadek wytrzymałości na zginanie wskutek zwiększania objętości granulatu. Dodatek granulatu w ilości od 4% do 8% powoduje spadek wytrzymałości na zginanie o nie więcej niż jedną trzecią wartości początkowej. Dodatek szesnastoprocentowy powoduje obniżenie do 3,5 MPa, co stanowi nieco tylko ponad połowę wytrzymałości początkowej.

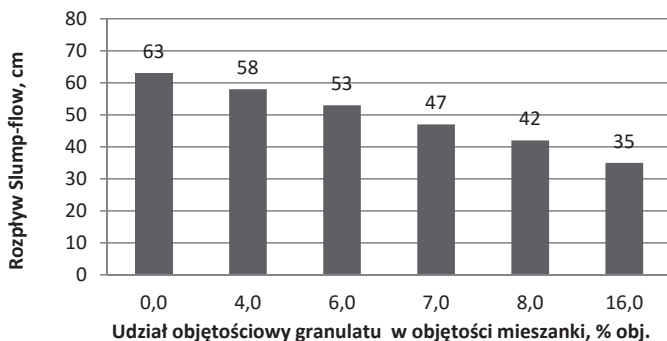
Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie f_{ct7} betonu o składzie B1 (bez włókien)

4. Wpływ granulatu styropianowego na właściwości betonu z włóknami polipropylenowymi Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,3% obj.

4.1. Właściwości reologiczne

Beton o składzie B2 zawierał włókna polipropylenowe Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,3% obj. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wpływ udziału objętościowego granulatu styropianowego w mieszance na wyniki badania Slump-flow oraz V-funnel.

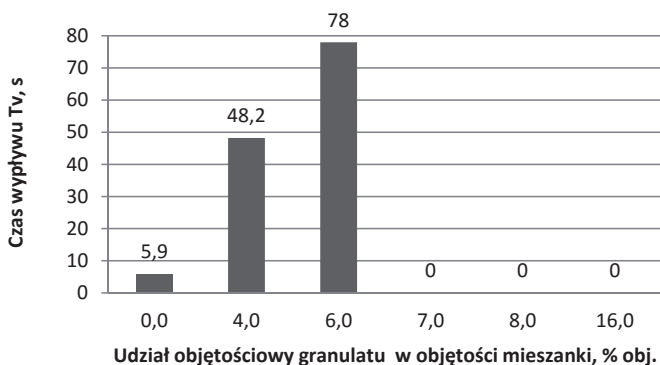
Dodatek granulatu styropianowego jedynie w ilości 4% nie spowodował utraty samozagęszczalności betonu o składzie B2. We wszystkich pozostałych przypadkach została ona utracona w wyniku spadku płynności. Podczas badania Slump-flow nie obserwowano problemów ze stabilnością.



Rys. 5. Rozptyw Slump-flow dla składu mieszanki B2 (z włóknami Forta Ferro19/1.0 kg w ilości 0,3% obj.)

Wzrost ilości granulatu w mieszance zwiększa czas wypływu mierzony podczas badania V-funnel. Dodatek granulatu w ilości 7% i większej utrudnia wypływ na tyle, że badanie jest niemożliwe do przeprowadzenia – następuje blokowanie się mieszanki w aparacie. Podczas badania nie obserwowano segregacji.

Podczas oceny stabilności mieszanek na podstawie przełomu próbek nie zaobserwowano segregacji.

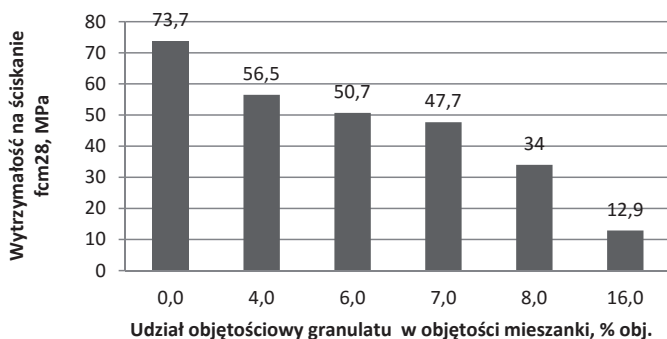


Rys. 6. Czas t_v , w jakim mieszanka wypływa z aparatu V-funnel dla składu B2 (z włóknami Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,3% obj.)

4.2. Właściwości mechaniczne

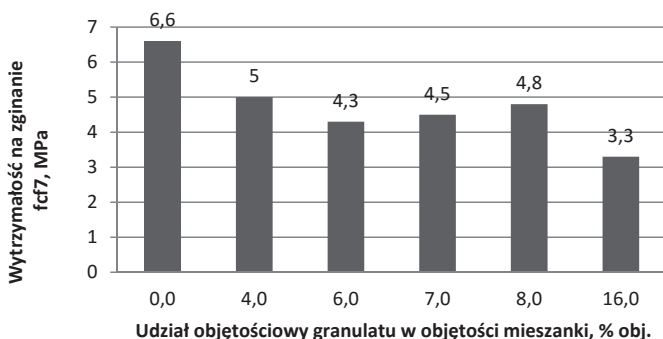
Dodatek granulatu styropianowego do betonu o składzie B2, zawierającego włókna polipropylenowe Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,3% obj., nie powodował utraty wytrzymałości niepozwalającej klasyfikować go jako konstrukcyjny.

Na rysunku 7 widoczna jest tendencja do spadku wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem jego udziału objętościowego. Dodatek granulatu do 7% powoduje spadek nieco większy niż 25 MPa. Wzrost ilości granulatu owocuje spadkiem wytrzymałości o ponad połowę.



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm28} dla betonu o składzie B2 (z włóknami Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,3% obj.)

Rysunek 8 przedstawia spadek wytrzymałości na zginanie wskutek zwiększania ilości granulatu. Dodatek granulatu w ilości od 4% do 8% powoduje spadek wytrzymałości na zginanie o nie więcej niż jedną trzecią wartości początkowej. Dodatek szesnastoprocentowy powoduje obniżenie do 3,3 MPa, co stanowi dokładnie połowę wytrzymałości początkowej.



Rys. 8. Wytrzymałość na zginanie f_{ct7} betonu o składzie B1 (z włóknami Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,3% obj.)

5. Wpływ granulatu styropianowego na właściwości reologiczne betonu z włóknami stalowymi KE 20/1,7 w ilości 1,0% obj.

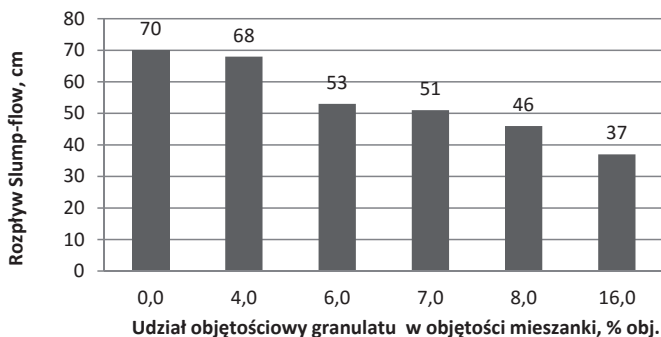
5.1. Właściwości reologiczne

Beton o składzie B3 zawierał włókna stalowe KE 20/1,7 w ilości 1,0% obj. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wpływ udziału objętościowego granulatu styropianowego w mieszance na wyniki badania Slump-flow oraz V-funnel.

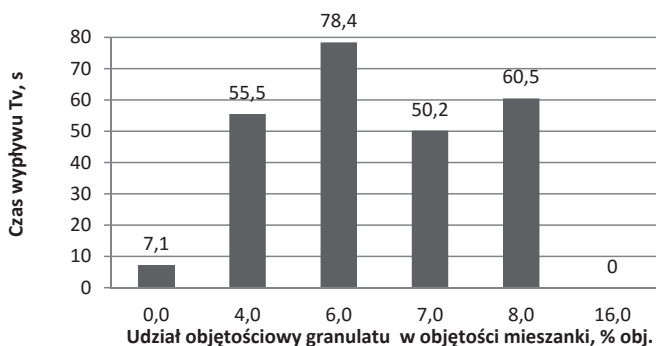
Granulat styropianowy za każdym razem powodował utratę samozagęszczalności. Dla ilości granulatu równej 4% obj. mieszanki, przyczyną była segregacja. W pozostałych przypadkach powodem była zbyt niska płynność.

Wzrost ilości granulatu w mieszance zwiększa czas wypływu mierzony podczas badania V-funnel. Dodatek granulatu w ilości 4, 6, 7 i 8% utrudnia i znacząco wydłuża czas wypływu mieszanki, przy czym nie ma tendencji do zwiększania czasu wypływu wraz ze wzrostem ilości granulatu. Wypływ przebiega ze zmienną prędkością; podczas każdego z badań co najmniej raz niemalże ustaje. Wypływ przebiega ze zmienną prędkością; ma tendencję do chwilowego blokowania się w aparacie.

Podczas oceny stabilności mieszanek na podstawie przełomu próbek potwierdzono segregację obserwowaną podczas badania SF w mieszance o zawartości granulatu 4% i stwierdzono, że nastąpiła ona także dla siedmioprocentowego dodatku granulatu.



Rys. 9. Rozptyw SF dla mieszanki B3 (z włóknami KE 20/1,7 w ilości 1,0% obj.)



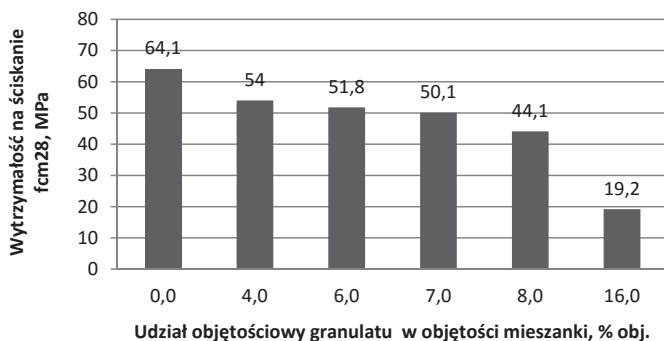
Rys. 10. Czas t_v , w jakim mieszanka wypływa z aparatu V-funnel dla składu B3 (z włóknami KE 20/1,7 w ilości 1,0 obj.)

5.2. Właściwości mechaniczne

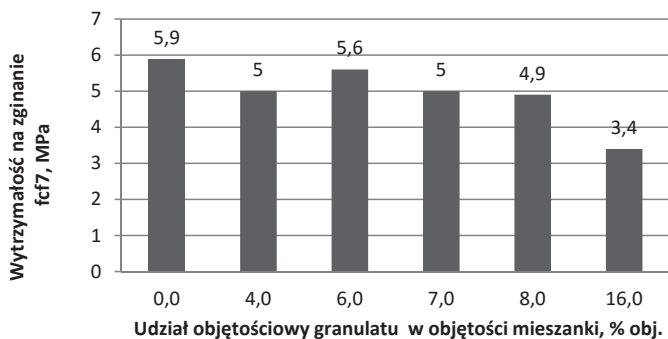
Dodatek granulatu styropianowego do betonu o składzie B3, zawierającego włókna stalowe KE 20/1,7 w ilości 1,0% obj. tylko w przypadku dodatku 16% obj. powodował utratę wytrzymałości niepozwalającą klasyfikować go jako konstrukcyjny.

Na rysunku 11 widoczna jest tendencja do spadku wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem jego udziału objętościowego. Dodatek granulatu w ilości nieprzekraczającej 8% powoduje zmniejszenie wytrzymałości o nie więcej niż 20 MPa. Dodatek w ilości 16% powoduje zmniejszenie początkowej wytrzymałości o ponad 44 MPa.

Rysunek 12 przedstawia spadek wytrzymałości na zginanie wskutek zwiększania objętości granulatu. Dodatek granulatu w ilości od 4% do 8% powoduje spadek wytrzymałości na zginanie o nie więcej niż jedną szóstą wytrzymałości początkowej. Dodatek szesnastoprocentowy powoduje obniżenie wytrzymałości początkowej prawie o połowę.



Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm28} betonu o składzie B3 włóknami KE 20/1,7 w ilości 1,0% obj.)



Rys. 12. Wytrzymałość na zginanie f_{ct7} betonu o składzie B3 (z włóknami KE 20/1,7 w ilości 1,0% obj.)

6. Beton z włóknami stalowymi KE 20/1,7 w ilości 0,5% i stałą ilością granulatu styropianowego równą 4% obj.

6.1. Właściwości reologiczne

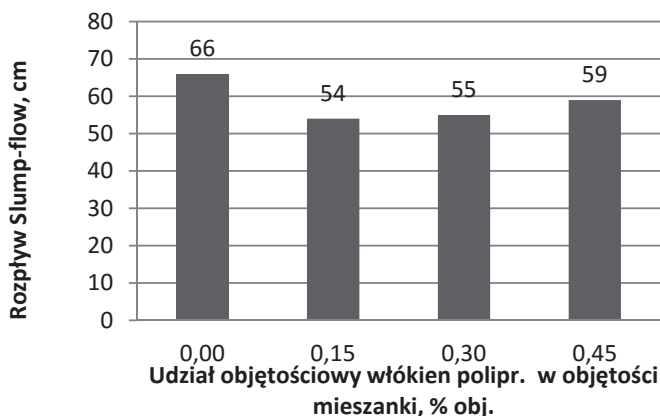
Beton o składzie B4 zawierał włókna stalowe KE 20/1,7 w ilości 0,5% obj. oraz granulatu w ilości 4% obj. mieszanki. W badanej mieszance występowały objawy segregacji w postaci niewielkiej ilości wypływającego na powierzchnię granulatu. Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wpływ udziału objętościowego włókien polipropylenowych Forta Ferro 19/1.0 kg w mieszance na wyniki badania Slump-flow oraz V-funnel.

Dodatek włókien Forta Ferro 19/1.0 kg w ilości 0,15% spowodował utratę samozagęszczalności w wyniku zmniejszenia płynności. Nie zapobiegł także wypływowi

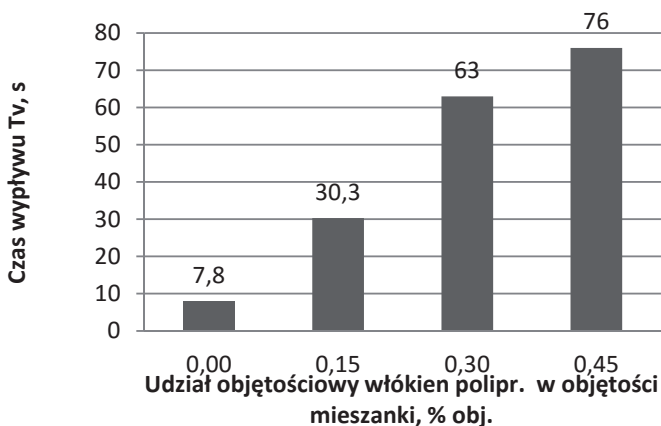
granulatu z mieszanki. Dalsze zwiększanie ilości włókien, do poziomu 0,3% i 0,45% obj. powodowało zwiększanie płynności i zapobiegało wypływowi granulatu.

Wzrost ilości włókien w mieszance zwiększa czas wypływu V-funnel. Dodatek granulatu w ilości 4% znacząco wydłuża czas wypływu mieszanki, przebiega on jednak ze stałą prędkością i bez blokowania. Dalsze zwiększanie ilości skutkuje zwiększeniem czasu wypływu i blokowaniem się mieszanki.

Ocena stabilności mieszanek na podstawie przełomu próbek potwierdziła segregację obserwowaną podczas badania SF w mieszance o zawartości włókien polipropylenowych 0,15% obj.



Rys. 13. Rozpliw Slump-flow dla mieszanki o składzie B4 (z włóknami KE 20/1,7 w ilości 0,5% obj. i granulatem w ilości 4% obj.)



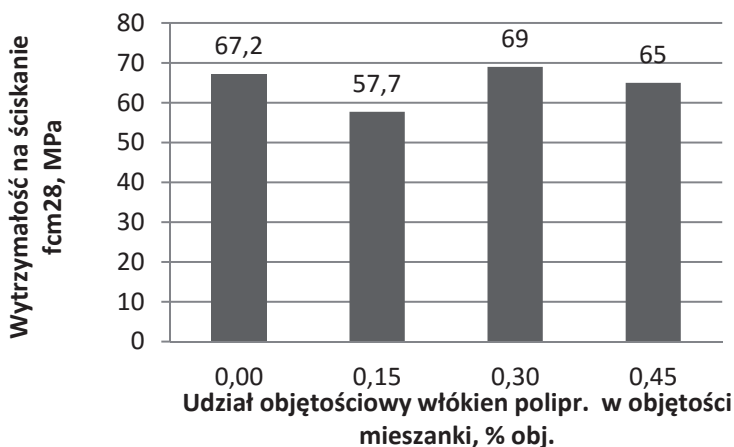
Rys. 14. Czas t_v , w jakim mieszanka wypływa z aparatu V-funnel dla składu B4 (z włóknami KE 20/1,7 w ilości 0,5 obj. i granulatem w ilości 4% obj.)

6.2. Właściwości mechaniczne

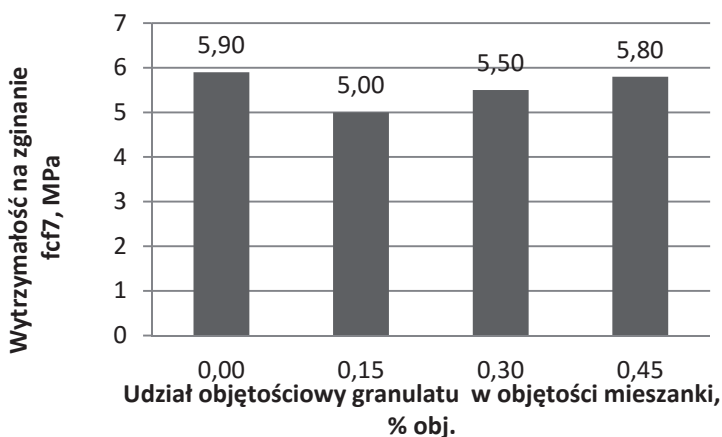
Dodatek granulatu styropianowego do betonu o składzie B4, zawierającego włókna stalowe KE 20/1,7 w ilości 0,5% obj. oraz dodatek granulatu styropianowego w ilości 4% obj. mieszanki nie spowodował utraty wytrzymałości niepozwalającej klasyfikować go jako konstrukcyjny.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przedstawione są na rysunku 15. Dodatek włókien Forta Ferro 19/1.0 kg do betonu o składzie B4 w ilości 0,15% zmniejszył wytrzymałość o 10 MPa. Dalsze zwiększanie ilości włókien spowodowało uzyskanie wytrzymałości zbliżonej do początkowej.

Rysunek 16 Przedstawia obniżenie wytrzymałości na zginanie, które nie przekracza 1 MPa.



Rys. 15. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm28} betonu o składzie B4 (z włóknami w KE 20/1,7 w ilości 0,5% obj. i granulatem w ilości 4% obj.)



Rys. 16. Wytrzymałość na zginanie f_{cf7} betonu o składzie B4 (z włóknami KE 20/1,7 w ilości 0,5% obj. i granulatem w ilości 4% obj.)

7. Gęstość badanych betonów i ocena stabilności mieszane

Materiały mają tym lepsze właściwości termoizolacyjne im mniejsza jest ich gęstość. Jak pokazują badania, stwierdzenie to jest prawdziwe również w przypadku betonu, którego gęstość jest obniżona przez dodanie do niego styropianu [17]. W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów gęstości betonów będących przedmiotem opisanych tutaj badań. Dane w niej zawarte dowodzą, że dodatek styropianu zawsze powodował obniżenie gęstości, a co za tym idzie poprawiał termoizolacyjność betonów. Ich opór cieplny nie został jednak zmierzony – może to być przedmiotem badań w przyszłości. W tabeli 3 przedstawiono także wyniki badania stabilności umieszczając literę „S” obok wyniku pomiaru gęstości jeśli podczas obserwacji przełomu wykonanych próbek obserwowano segregację składników mieszanki.

Tabela 3. Gęstości badanych betonów [kg/m³]

Modyfikacja składu	Symbol składu betonu			
	B1	B2	B3	B4
-	2392	2364	2420	-
Granulat styropianowy 4%	2256/S	2252	2300/S	-
Granulat styropianowy 6%	2168/S	2200	2232	-
Granulat styropianowy 7%	2140	2148	2204/S	-
Granulat styropianowy 8%	2125	2112	2180	-
Granulat styropianowy 16%	1616	1772	1872	-
-	-	-	-	2292/S
Forta Ferro 19/1.0 kg 0,15%	-	-	-	2280/S
Forta Ferro 19/1.0 kg 0,30%	-	-	-	2284
Forta Ferro 19/1.0 kg 0,45%	-	-	-	2292

8. Wnioski

Dodatek granulatu styropianowego często powodował utratę samozagęszczalności mieszanki betonowej. Dla zawartości granulatu wynoszącej od 4 do 6% powodem była zwykle segregacja. Nie występowała ona w przypadku dodawania większych ilości granulatu, jednak mieszanki miały wtedy zbyt małą płynność aby klasyfikować je jako samozagęszczalne.

Włókna polipropylenowe zapobiegają segregacji, a stalowe ograniczają zmniejszenie wytrzymałości betonu powodowane obecnością granulatu styropianowego. Stosowanie odpowiednich ilości obu rodzajów włókien w jednej mieszance pozwala na użycie granulatu w ilości 4% bez obniżenia wytrzymałości i bez znacznego zmniejszenia średnicy rozplywu mierzonej podczas badania Slump-flow.

Wszystkie mieszanki zawierające zarówno włókna, jak i granulaty posiadały znacząco wydłużony czas wypływu z aparatu V-funnel. Nakazuje to zachować ostrożność w ich stosowaniu pomimo prawidłowych wyników uzyskanych metodą Slump-flow. Rozbież-

ności w ocenie płynności mogą być spowodowane przeprowadzeniem badania V-funnel z opóźnieniem oraz tendencją do blokowania się badanych mieszanek w wąskim otworze aparatu V-funnel.

Dodatek granulatu na ogół nie powodował zmniejszenia wytrzymałości dyskwalifikującego beton jako materiał konstrukcyjny, obniżenie wytrzymałości często było jednak znaczne. Zwiększanie ilości granulatu w mieszance zawsze wiąże się ze spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Z tego względu zaleca się ostrożność w stosowaniu granulatu, w szczególności w ilości przekraczającej 7% objętości mieszanki. Spadek wytrzymałości w badanych mieszankach był wtedy zawsze większy od 45 i 75%, odpowiednio dla zawartości granulatu równych 8 i 16%. Wyjątkiem był beton zawierający jedynie włókna stalowe, w którym spadki wytrzymałości nie przekroczyły (analogicznie) 35 i 70%

Zwiększanie ilości granulatu w mieszance prawie zawsze wiąże się ze spadkiem wytrzymałości na zginanie. Stosowanie granulatu w ilości przekraczającej 8% objętości mieszanki może powodować spadki wytrzymałości większe od 40%.

Reasumując, betony bez włókien i z włóknami stalowymi po dodaniu styropianu zawsze traciły samozagęszczalność. Betony z włóknami polipropylenowymi charakteryzowały się stabilnością i przy mniejszych ilościach granulatu nie traciły samozagęszczalności. Najkorzystniejsze właściwości mechaniczne miały natomiast betony zawierające oprócz styropianu jedynie włókna stalowe. Obniżenie wytrzymałości wskutek zwiększania ilości styropianu było w nich najmniejsze. W naturalny sposób skłoniło to do utworzenia mieszanek zawierających oprócz granulatu oba rodzaje włókien, co dało pożądany efekt. Wyniki badań gęstości sugerują jednak, że aby w znaczący sposób poprawić termoizolacyjność należy stosować dodatek styropianu powyżej 8%, gdyż tylko te z utworzonych betonów można klasyfikować jako lekkie.

Literatura

- [1] Ferrandiz-Mas V., Bond T., Garcia-Alcocel E., Cheeseman C. R.: Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper. *Construction and Building Materials*, nr 61, pp. 285–292, 2014.
- [2] Kaszyńska M.: Lekkie betony samozagęszczalne - ocena wpływu kompozycji kruszywa na właściwości. X Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2008.
- [3] Kaszyńska M.: Lekkie betony samozagęszczalne do konstrukcji mostowych. *Nowoczesne budownictwo inżynierskie*, nr marzec-kwiecień, pp. 68–72, 2009.
- [4] Bogas A., Gomes A., Pereira M. F. C.: Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol.35, 2012, p. 1013–1022.
- [5] Kwasny, J., Sonebi, M., Taylor, S., Bai, Y., Owens, K., Doherty W.: Influence of the Type of Coarse Lightweight Aggregate on Properties of Semilightweight Self-Consolidating Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 24, 2012, p. 1474–1483.
- [6] Yang S., Yue X., Liu X., Tong Y.: Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, Vol. 84, 2015, p. 444–453.
- [7] Manolia Abed Al. - Wahab Ali: The Possibility of Produce Self Compacted Polystyrene Concrete. *Journal of Engineering and Development*, Vol. 16, 2012, p. 127–141.
- [8] Madandoust R., Ranjbar M. M., Mousavi S. Y.: An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 2011, p. 3721–3731.
- [9] Madandoust R., Ranjbar M. M., Mousavi S. Y., Hashemi S. J.: Evaluation of the fluidity and mechanical properties of light-weight self-compacting concrete containing expanded polystyrene (EPS). 3rd International Conference on Concrete & Development, Tehran, 2009.
- [10] Szwabowski J., Miera P.: Wpływ włókien stalowych na wybrane właściwości betonu samozagęszczalnego. XIII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2011.
- [11] Gieroi D.: Wpływ udziału objętościowego włókien stalowych na właściwości mechaniczne wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych, *Projekt Inżynierski*, s. 4–14.

- [12] Jing jun Li et. al.: Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, nr 118, pp. 27–35, 2016.
- [13] Vahid Afroughsabet, Togay Ozbakkaloglu: Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, nr 94, pp. 73-82, 2015.
- [14] Zych T.: Współczesny fibrobeton – możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych. *Architektura Czasopismo Tech.*, zes. 18, 2010, s. 378–379.
- [15] Strona producenta włókien FORTA FERRO: <http://www.astra-polska.com>
- [16] Strona producenta włókien KrampeHarex: <http://www.krampeharex.com>
- [17] Park S. G., Chisholm D. H.: Polystyrene Aggregate Concrete. BRANZ Study Report, nr 85, 1999