

Wpływ rodzaju kruszywa lekkiego na właściwości drobnokruszywowych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych

Types of lightweight aggregate and their effect on the properties of fine-aggregate structural-insulating concrete

1. Wprowadzenie

Beton izolacyjno-konstrukcyjny to rodzaj betonu lekkiego charakteryzujący się średnią wytrzymałością na ściskanie nie mniejszą niż 3,0 MPa i współczynnikiem przewodzenia ciepła nieprzekraczającym 0,7 W/m·K (1). W praktyce warunek dotyczący izolacyjności termicznej można sprowadzić do ograniczenia gęstości betonu lekkiego w stanie suchym do około 1800 kg/m³. Zgodnie bowiem z zależnością Valore'a (2) i wytycznymi ACI 122R-02 (3) współczynnik przewodzenia ciepła betonu w stanie suchym [λ] można oszacować na podstawie jego gęstości [D] według wzoru:

$$\lambda = 0,072 \cdot e^{0,00125D} \quad [1]$$

Najbardziej popularnymi kompozytami izolacyjno-konstrukcyjnymi, stosowanymi w budownictwie, są autoklawizowane betony komórkowe [ABK] oraz lekkie betony kruszywowe, o strukturze otwartej [LBK]. Z uwagi na brak konieczności stosowania obróbki termicznej, technologia produkcji tych ostatnich jest zdecydowanie prostsza i tańsza od technologii produkcji betonów komórkowych. Lekkie betony kruszywowe, o właściwościach izolacyjno-konstrukcyjnych, ze względu na małą gęstość stosowanych kruszyw lekkich, mogą być również wytwarzane jako kompozyty o mikrostrukturze zwartej.

Do produkcji lekkich betonów kruszywowych, o właściwościach izolacyjno-konstrukcyjnych najczęściej, stosowane są kruszywa pochodzenia mineralnego, przede wszystkim spiekane łupki i gliny pęczniące na przykład keramzyt oraz spiekane popioły lotne. Betony tego typu z powodzeniem mogą być wykonywane również z kruszyw lekkich posiadających znacznie większą porowatość, na przykład: perlit, granulát polistyrenowy lub szkło ekspandowane (4-6). Lekkie betony drobnokruszywowe stanowią szczególny rodzaj betonów izolacyjno-konstrukcyjnych. Stosowane są zwłaszcza do produkcji wyrobów cienkościennych: płyt i powłok osłonowych, okładzinowych lub termoizolacyjnych, pustaków, elementów dekoracyjnych, w tym renowacyjnych, oraz szeroki asortyment tak zwanej galanterii betonowej (7-11). Drobnokruszywowe betony

1. Introduction

Structural-insulating concrete is a type of lightweight concrete characterised by the mean compressive strength equal to or higher than 3.0 MPa and the thermal conductivity coefficient of up to 0.7 W/m·K (1). In practice, the thermal insulation condition can be accomplished by limiting the dry density of lightweight concrete to about 1800 kg/m³. This is because – according to the Valore's relativity (2) and 122R-02 guideline of ACI (3) – the thermal conductivity coefficient for dry concrete [λ] can be assessed based on its density [D], according to the following formula:

$$\lambda = 0.072 \cdot e^{0.00125D} \quad [1]$$

The most popular structural-insulating composites used in the construction industry are autoclaved aerated concrete [AAC] and lightweight aggregate concrete [LWAC], with an open structure. Due to a lack of necessity to use thermal treatment, the technology applied to produce the latter is decidedly easier and less costly than the technology of aerated concrete production. Because of the low density of lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete, with insulation and structural properties, can also be manufactured as a compact microstructure composite.

The aggregates used to produce lightweight aggregate concrete with insulation and structural properties are most often mineral and usually come in forms such as expanded clay, or sintered fly ash. This type of concrete can be successfully made with lightweight aggregates of much higher porosity, such as: perlite, polystyrene granulate or expanded glass (4-6). Lightweight fine-aggregate concretes constitute a special type of structural-insulating concretes. They are used especially in the production of thin-walled products: curtain, cladding or insulating slabs and layers, cinder blocks, decorative elements, including renovating elements, as well as a rich assortment of outdoor concrete accessories (7-11). Fine-aggregate structural-insulating concrete is also applied in the increasingly popular 3D printing technology (12).

izolacyjno-konstrukcyjne znajdują również zastosowanie w coraz bardziej popularnej technologii druku 3D (12).

Z uwagi na brak wytycznych normowych, dotyczących drobnokruszywowych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, dobór kruszywa lekkiego, będącego najważniejszym składnikiem tych betonów, jak również sam proces ich produkcji i jego kontrola jakości w różnych wytwórniach realizowane są według różnych kryteriów. W niektórych przypadkach stosowana jest norma EN 206 (13), uwzględniająca co prawda lekkie betony kruszywowe, ale nie drobnokruszywowe, wyłącznie o mikrostrukturze zwartej i z kruszywami pochodzenia mineralnego. Częściej zatem w odniesieniu do drobnokruszywowych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych stosuje się normę EN 1520 (14), która uwzględnia drobnokruszywowe betony lekkie, nie wyklucza stosowania kruszyw pochodzenia organicznego, natomiast odnosi się wyłącznie do kompozytów o strukturze otwartej. Z kolei, z uwagi na zastosowanie tego typu betonów do produkcji elementów cienkościennych, w wielu przypadkach badania wytrzymałości wykonuje się metodami opisanymi w EN 196-1 (15). W rezultacie, dostępne w literaturze wyniki badań, prowadzonych na drobnokruszywowych betonach izolacyjno-konstrukcyjnych według różnych metod badawczych oraz na różnych rodzajach próbek, nie mogą być porównywane i stanowić podstawy do oceny przydatności poszczególnych kruszyw lekkich do tego typu betonów. Ocena taka w szczególności jest potrzebna w przypadku nowych rodzajów kruszyw lekkich.

2. Opis przeprowadzonych badań

Celem podjętych badań była ocena przydatności dostępnych na rynku kruszyw lekkich pod kątem ich zastosowania do drobnokruszywowych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, o określonej wytrzymałości i gęstości. W szczególności ważne było porównanie właściwości kompozytów z kruszywami spiekanymi – keramzyt, popiołoporyt, tradycyjnie stosowanymi do celów izolacyjno-konstrukcyjnych, oraz z kruszywami ultralekkimi, rzadko wykorzystywanymi w takich zastosowaniach. W tej ostatniej grupie kruszyw na szczególną uwagę zasługuje szkło ekspandowane, które stosunkowo niedawno pojawiło się na rynku, i dla którego brak badań porównawczych, które umożliwiłyby ocenę jego przydatności do betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, w stosunku do innych drobnych kruszyw lekkich.

Do badań wytypowano następujące kruszywa lekkie:

- (S) granulaty polistyrenowy z recyklingu 0,5/2,0 mm, o gęstości nasypowej 180 kg/m³,
- (P) perlit 0,5/2,0 mm, o gęstości nasypowej 100 kg/m³,
- (G) szkło ekspandowane 0,25/1,00 mm, o gęstości nasypowej 290 kg/m³,
- (K) keramzyt 2/4 mm, o gęstości nasypowej 490 kg/m³,
- (V) popiołoporyt 2/4 mm, o gęstości nasypowej 830 kg/m³.

Jako kruszywo referencyjne zastosowano piasek normowy 0/2 mm, o gęstości nasypowej 1800 kg/m³, spełniający wymagania EN 196-1 (15). Wytypowane do badań kruszywa pokazano na rysunku 1.

Due to a lack of normative guidelines concerning fine-aggregate structural-insulating concrete, the selection of a lightweight aggregate – the most important component of this type of concrete – as well as its production process and quality checks at different plants are implemented based on various criteria. In some cases the norm EN 206 (13) is applied, which admittedly accounts for lightweight aggregate concrete – while disregarding fine-aggregate concrete – but only with compact microstructure and with mineral aggregates. This is why it is more common to apply the norm EN 1520 (14) to fine-aggregate structural-insulating concrete, which includes fine-aggregate lightweight concrete, does not exclude the application of organic aggregates, but refers only to open structure composites. On the other hand, when it comes to the use of this type of concrete in the production of thin-walled elements, in many cases strength tests are carried out based on methods described in EN 196-1 (15). As a result, written sources containing the results of tests conducted on fine-aggregate structural-insulating concretes according to various methodologies and with the use of various types of samples, cannot be compared and should not constitute the basis for the evaluation of the suitability of individual lightweight aggregates for this type of concrete. Meanwhile, this evaluation is particularly needed in the case of new types of lightweight aggregates.

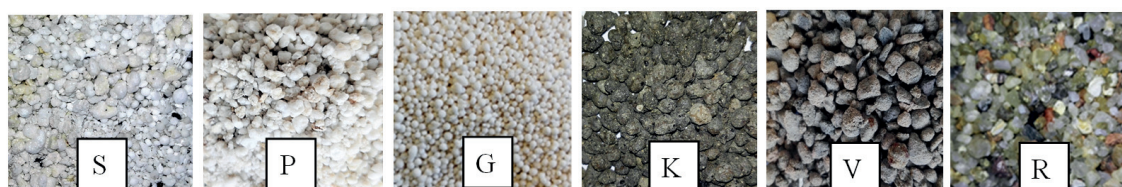
2. Description of performed tests

The goal of this study was to evaluate the usefulness of lightweight aggregates available on the market in terms of their application in fine-aggregate structural-insulating concrete, with a determined strength and density. It was particularly important to compare the properties of composites with sintered aggregates – expanded clay, sintered fly ash – which are traditionally used for insulation and structural purposes, and with ultralightweight aggregates that are rarely used in such applications. In the latter group of aggregates, particular attention should be paid to expanded glass, which has appeared on the market fairly recently, and for which there is a lack of comparative studies that would allow for the evaluation of their suitability for structural-insulating concrete, in relation to other lightweight fine aggregates.

The following lightweight aggregates were selected for the tests:

- (S) recycled polystyrene granulate 0.5/2.0 mm, with the bulk density of 180 kg/m³,
- (P) perlite 0.5/2.0 mm, with the bulk density of 100 kg/m³,
- (G) expanded glass 0.25/1.00 mm, with the bulk density of 290 kg/m³,
- (K) expanded clay 2/4 mm, with the bulk density of 490 kg/m³,
- (V) sintered fly ash 2/4 mm, with the bulk density of 830 kg/m³.

As a reference aggregate standard sand 0/2 mm was selected, with the bulk density of 1800 kg/m³, which meets the requirements of EN 196-1 (15). The aggregates selected for the analysis are shown in Fig. 1.



Rys. 1. Kruszywa wytypowane do wykonania betonów drobnokruszywowych: granulát polistyrenowy (S), perlit (P), szkło ekspandowane (G), keramzyt (K), popiołoporyt (V) oraz piasek naturalny (R)

Fig. 1. Aggregates selected for fine-aggregate concretes: polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)

Kruszywa lekkie, z uwagi na ich znaczną nasiąkliwość, przed zastosowaniem do mieszanki betonowej były wstępnie nawilżane, do wilgotności odpowiadającej ich nasiąkliwości, po 30 minutach nasycenia w wodzie. Z uwagi na budowę zastosowanych kruszyw drobnych oraz rozmiar nieprzekraczający 4 mm, ich nasiąkliwość, określana w przedziale czasowym po 30 minutach do 3 h, praktycznie nie ulegała zmianie. O ile w przypadku szkła ekspandowanego, keramzytu oraz popiołoporytu wilgotność ta wynosiła 15 – 17%, o tyle dla perlitu aż 130%. Granulat polistyrenowy w zasadzie nie absorbował wody.

Z wytypowanymi kruszywami wykonano dwie serie betonów, o zróżnicowanym stosunku wodno/cementowym $w/c = 0,5$ [seria 1] oraz $w/c = 0,8$ [seria 2]. Z uwagi na zastosowaną metodę wstęp-

Due to their substantial water absorption, prior to their application in the concrete mix, the lightweight aggregates were preliminarily saturated to the humidity corresponding to their absorption after 30 minutes of saturation in water. Due to the structure of fine aggregates, selected and that their size does not exceed 4 mm, their water absorption, determined in the period between 30 minutes and 3 hours of saturation did not undergo any practical change. In the case of expanded glass, expanded clay and sintered fly ash the humidity was 15% – 17%, whereas for perlite it was as high as 130%. Polystyrene granulate practically did not absorb water.

The selected aggregates were used in the production of two series of concretes with different water to cement ratios: $w/c = 0.5$ [series 1] and $w/c = 0.8$ [series 2]. In view of the applied method

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY BETONÓW DROBNOKRUSZYWOWYCH

COMPOSITIONS OF FINE-AGGREGATE CONCRETES

Oznaczenie Designation	Składniki / Components		Zawartość składników / Components content, kg/m ³			
	w/c	Rodzaj kruszywa Aggregate type	Cement (c)	Woda (w) Water (w)	Kruszywo suche Dried aggregate	Domieszka spieniąca Foaming admixture
Seria 1/ Series 1						
1S	0,5	Polistyren / Polystyrene	544	272	194	0,0
1P	0,5	Perlit / Perlite	584	292	136	0,0
1G	0,5	Szkło ekspandowane Expanded glass	506	253	270	0,0
1K	0,5	Keramzyt Expanded clay	557	279	404	0,0
1V	0,5	Popiołoporyt Sintered fly ash	562	281	664	0,0
1R	0,5	Piasek naturalny Natural sand	502	251	1536	0,0
Seria 2/ Series 2						
2S	0,8	Polistyren / Polystyrene	303	246	230	0,8
2P	0,8	Perlit / Perlite	267	216	107	0,7
2G	0,8	Szkło ekspand. Expanded glass	245	198	223	0,6
2K	0,8	Keramzyt Expanded clay	279	225	431	0,7
2V	0,8	Popiołoporyt Sintered fly ash	310	251	781	0,8
2R	0,8	Piasek naturalny Natural sand	372	302	1536	0,0

nego nawilżenia kruszyw, przyjęte stosunki w/c odpowiadały efektywnym stosunkom $(w/c)_{\text{eff}}$ według EN 206 (13). Stosunkowo duży współczynnik w/c w serii 2, niestosowany w przypadku betonów konstrukcyjnych, umożliwia uzyskanie wymaganej wytrzymałości dla betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, a zapewnia mniejsze zużycie cementu i mniejszą gęstość kompozytu. Matrycę cementową w wykonywanych betonach stanowił zaczyn z cementu CEM I 32,5 R, do którego dodano wodę wodociągową. W przypadku betonów serii 2, z wyjątkiem betonu referencyjnego na piasku naturalnym (2R), zastosowano domieszkę spieniającą Centripor SK120, której dodatek wyniósł 0,25 % masy cementu. Domieszka ta z jednej strony umożliwiła dodatkowe zmniejszenie gęstości betonu, a z drugiej zapewniała trwałość mieszanek z kruszywami lekkimi, ograniczając ich podatność na segregację. Łącznie wykonano 12 różnych betonów drobnokruszywowych, których składy przedstawiono w tablicy 1.

Przy projektowaniu wszystkich mieszanek wstępnie założono stały udział objętościowy kruszywa i zaczynu cementowego, wynoszący odpowiednio około 60% i 40%. Ze względu jednak na różne uziarnienie zastosowanych kruszyw, wykonane betony miały ostatecznie nieznacznie różniącą się zawartość objętościową zaczynu cementowego i kruszywa. Dodatkowo, w przypadku kruszywa perlitowego dochodziło do jego pokruszenia, podczas mieszania składników w mieszarce. W rezultacie uziarnienie tego kruszywa w betonie było drobniejsze od wyjściowego.

Z wykonanych mieszanek betonów drobnokruszywowych zformowano po trzy beleczki, o wymiarach 40 x 40 x 160 mm, przewidziane do badań wytrzymałości na zginanie według EN 196-1 (15). Zgodnie z tą normą badania wytrzymałości na ściskanie prowadzi się na sześciu połówkach beleczek, poddanych wcześniej zginaniu. Z uwagi na niewielkie rozmiary beleczek, oraz zastosowanie betonów drobnokruszywowych do produkcji elementów cienkościennych, badania gęstości i nasiąkliwości przeprowadzono na trzech elementach płytowych o wymiarach 300 x 300 x 30 mm, zgodnie z zasadami odpowiednio EN 12390-7 (16) oraz PN 91/B-06263 (17). Zarówno beleczki jak i elementy płytowe formowano jednowarstwowo, a następnie zagęszczano na stole wibracyjnym. Wszystkie badania stwardniałych betonów prowadzono po 28 dniach dojrzewania w warunkach normowych, odpowiadających wymaganiom EN 196-1 (15).

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań gęstości betonów drobnokruszywowych pokazano na rysunku 2. Średnia gęstość w stanie suchym betonów lekkich serii 1 [$w/c = 0,5$] i serii 2 [$w/c = 0,8$ + domieszka spieniająca] zawierała się odpowiednio w przedziale 830 ÷ 1320 kg/m³ i 520 ÷ 1070 kg/m³. Betony lekkie wykonane na kruszywie polistyrenowym, perlitowym oraz szkła ekspandowanego uzyskały porównywalne, najmniejsze gęstości. Natomiast największą gęstość wśród betonów lekkich miały kompozyty zawierające kruszywo popiołoporytowe. Zastąpienie kruszywa zwykłego w betonie referencyjnym 1R, jego lekkimi odpowiednikami, spowodowało

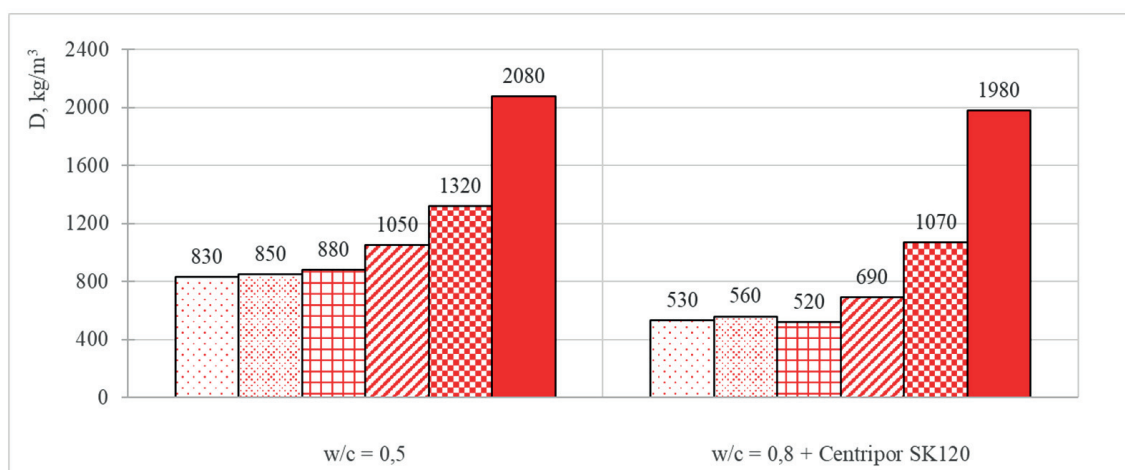
of moistening the aggregates prior to the tests, the adopted w/c ratios corresponded to the effective $(w/c)_{\text{eff}}$ ratio according to EN 206 (13). A relatively high w/c ratio in series 2, which is not used in the production of structural concrete, allows us to obtain the required strength for structural-insulating concrete with less cement and lower composite density. The cement matrix used for the concrete was the paste from CEM I 32.5 R cement, with added, tap water. In the case of series 2 concretes, with the exception of reference concrete based on natural sand (2R), Centripor SK120 foaming agent was used, and equalled 0.25% by mass of cement. On the one hand, this admixture allowed us to further decrease concrete density, and on the other ensured durability of mixtures with lightweight aggregates, limiting their segregation. The total of 12 different fine-aggregate concretes were made during the study, whose compositions are presented in Table 1.

When designing all mixtures, the initial assumption was a stable volume percentage of an aggregate and cement paste, of about 60% and 40% respectively. However, on account of different grain sizes of the applied aggregates, the concretes were ultimately insignificantly different when it comes to the volume percentages of cement paste and the aggregate. Additionally, the perlite aggregate fractured in the course of mixing the components in the mixer. As a result, the grain size of this aggregate in the concrete was finer than the starting size.

The produced mixtures of fine-aggregate concretes were formed into three beams measuring 40 x 40 x 160 mm, used for flexural strength tests according to EN 196-1 (15). According to that standard, compressive strength tests are performed on six halves of beams that were previously subjected to bending. Due to the small dimensions of the beams and the application of fine-aggregate concretes in the production of thin-walled elements, the density and water absorption analyses were conducted on three plate elements measuring 300 x 300 x 30 mm, in line with the rules determined in EN 12390-7 (16) and PN 91/B-06263 (17) respectively. Both the beams and plates were formed into a single layer and then thickened on a vibratory table. All tests of the hardened concretes were conducted after 28 days of maturation in standard conditions corresponding to the requirements of EN 196-1 (15).

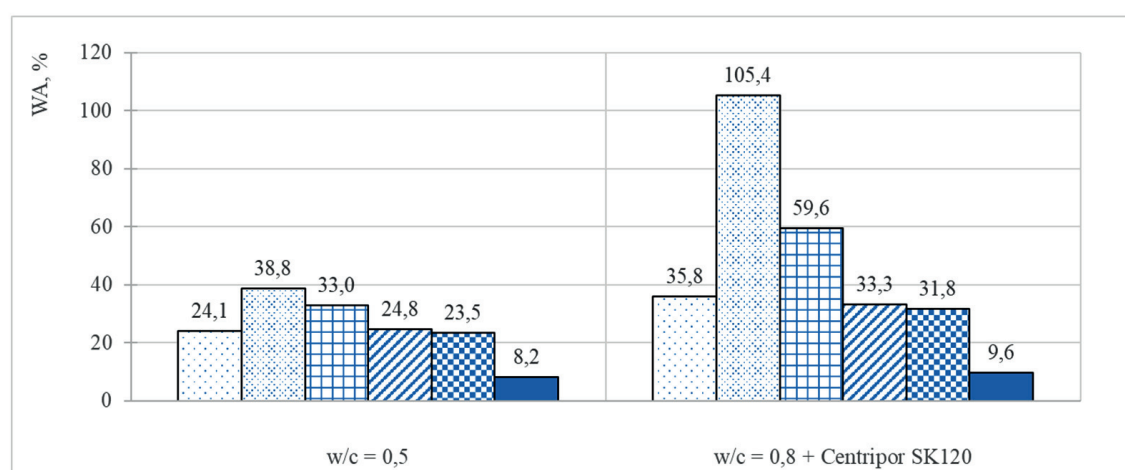
3. Test results and analysis

The density results for fine-aggregate concretes are shown in Fig. 2. The mean dry density of lightweight concretes from series 1 [$w/c = 0.5$] and series 2 [$w/c = 0.8$ + foaming agent] ranged between 830 ÷ 1320 kg/m³ and 520 ÷ 1070 kg/m³ respectively. Lightweight concretes produced with the use of polystyrene, perlite and expanded glass aggregates obtained similar – the lowest – density values. The highest density in all of the lightweight concretes was obtained by composites containing the sintered fly ash aggregate. Substituting the standard aggregate in the reference concrete 1R with its lightweight counterparts resulted in a decrease in the density of lightweight concretes from series 1 by 37% ÷ 60%. Thanks to additionally increasing the porosity of lightweight concretes from



Rys. 2. Średnia gęstość w stanie suchym (D) betonów drobnokruszywowych z: granulatem polistyrenowym (S), perlitem (P), szkłem ekspandowanym (G), keramzytem (K), popiołoporytem (V) oraz piaskiem naturalnym (R)

Fig. 2. Mean oven-dried density of fine-aggregate concretes with: polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)



Rys. 3. Średnia nasiąkliwość (WA) betonów drobnokruszywowych z: granulatem polistyrenowym (S), perlitem (P), szkłem ekspandowanym (G), keramzytem (K), popiołoporytem (V) oraz piaskiem naturalnym (R)

Fig. 3. Mean water absorption (WA) of fine-aggregate concretes with: polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)

zmniejszenie gęstości betonów lekkich serii 1 o 37% ÷ 60%. Dzięki dodatkowemu zwiększeniu porowatości betonów lekkich serii 2, za pomocą domieszki spieniającej, ich gęstość w stosunku do betonu referencyjnego 2R była jeszcze mniejsza, aż o 46% ÷ 74%. Analiza wpływu zastosowanej matrycy na gęstość kompozytów drobnokruszywowych wykazała, że zwiększenie stosunku w/c z 0,5 do 0,8 spowodowało jedynie 5% spadek gęstości betonów referencyjnych – 1R i 2R. Natomiast dodatkowe zastosowanie domieszki spieniającej w betonach serii 2 umożliwiło zmniejszenie ich gęstości z poszczególnymi kruszywami lekkimi średnio o około 30%, w stosunku do ich odpowiedników z serii 1.

O ile sama gęstość kompozytu może być wskaźnikiem jego porowatości, o tyle nie daje informacji na temat struktury porowatości, bardzo ważnej ze względu na właściwości fizyczne materiału. Bardziej miarodajnym wskaźnikiem struktury porowatości betonu

series 2 by the foaming agent, their density in relation to the reference concrete R2 was even lower – by 46% ÷ 74%. The analysis of the effect of the applied matrix on the density of fine-aggregate composites showed that increasing the w/c ratio from 0.5 to 0.8 only resulted in a 5% decrease in the density of both of the reference concretes – 1R and 2R. And the additional application of the foaming agent in concretes from series 2 allowed to increase their average density with certain lightweight aggregates by about 30%, compared to their counterparts from series 1.

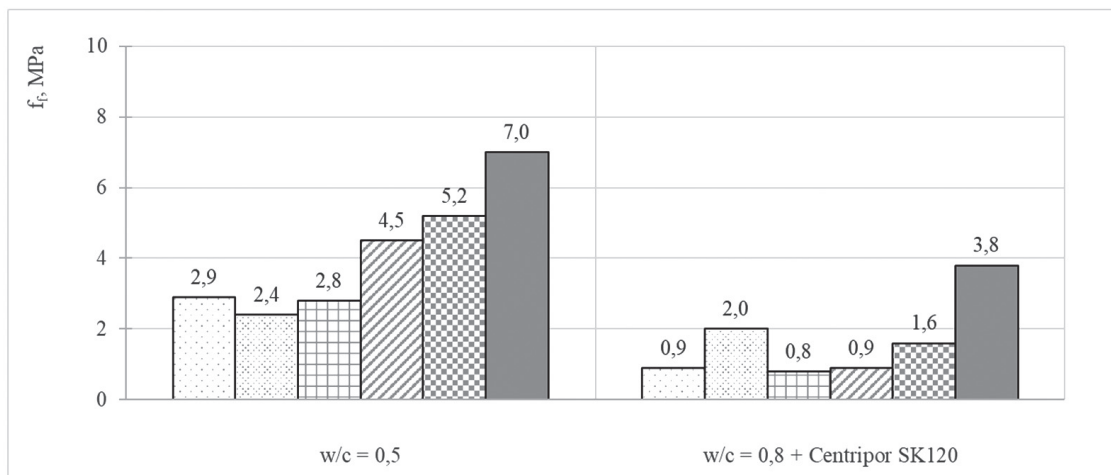
Even though the density of a composite may be an indication of its porosity in and of itself, this does not provide any information about the structure of this porosity, which is very important, due to the physical properties of the material. A more authoritative indication of a concrete porosity structure is its water absorption. The average water absorption results for fine-aggregate concretes

jest natomiast jego nasiąkliwość. Średnie wyniki badań nasiąkliwości betonów drobnokruszywowych przedstawiono na rysunku 3. Z uwagi na duże różnice w strukturze porów zastosowanych kruszyw lekkich nie obserwuje się bezpośredniej zależności pomiędzy gęstością i nasiąkliwością wykonanych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych. Seria 1 betonów lekkich wykazała nasiąkliwość w zakresie 23,5% ÷ 38,5%. Natomiast, w przypadku bardziej porowatych betonów lekkich serii 2, nasiąkliwość wahała się od 31,8% aż do 105,4%. Wartości te były zatem około 3 ÷ 11 razy większe w stosunku do nasiąkliwości, jaką wykazały betony referencyjne. W świetle wymagań normy PN-91/ B-06263 (17), tak duża nasiąkliwość badanych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych eliminuje możliwość ich zastosowania, bez zabezpieczenia w warunkach, w których będą narażone na wpływ czynników atmosferycznych. Szczególną uwagę zwraca największa w obu seriach nasiąkliwość betonów, zawierających kruszywo perlitowe. Ze względu na bardzo dużą nasiąkliwość samego perlitu – $WA_{30\text{ min}} = 130\%$, nieporównywalnie większą od nasiąkliwości innych kruszyw lekkich, nasiąkliwość kompozytów z tym kruszywem również była znacznie większa od pozostałych betonów. W szczególności zastosowanie matrycy cementowej o znacznej porowatości w serii 2 umożliwiło absorpcję dużych ilości wody nie tylko w porach samej matrycy, ale i perlitu, wykazującego znaczne pęcznienie. Z uwagi na takie właściwości kruszywa perlitowego, jego zastosowanie do betonów izolacyjno-konstrukcyjnych eksploatowanych w warunkach podwyższonej wilgotności, należy uznać za niewłaściwe. Betony lekkie z granulatem polistyrenowym, keramzytem i popiołoporytem, pomimo zróżnicowanej nasiąkliwości tych kruszyw – $WA_{30\text{ min}} = 0\% \div 17\%$, wykazały porównywalną, najniższą nasiąkliwość. Stosunkowo duża nasiąkliwość kompozytów ze szkłem ekspandowanym wiąże się prawdopodobnie z nienajlepszą przyczepnością zaczynu do gładkiej powierzchni tego kruszywa.

Wyników badań wytrzymałości, pokazanych na rysunkach 4 i 5, wskazują na różny wpływ składu betonów lekkich serii 1 i 2 na kształtowanie tej właściwości. O ile w przypadku serii 1 zaznacza się wyraźny wpływ rodzaju kruszywa i jego gęstości na wytrzymałość na zginanie i ściskanie, o tyle seria 2 nie wykazuje już tak wyraźnego wpływu tego składnika. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonów lekkich serii 1 wahała się od 7,4 MPa do 31,2 MPa, co stanowi od 14% do 58% wytrzymałości betonu referencyjnego 1R. Wynika stąd, że w przypadku betonów lekkich serii 1 najsłabszym elementem ich struktury jest kruszywo lekkie, o większej porowatości od matrycy cementowej. W związku z tym, zastosowanie kruszywa o większej gęstości korzystnie wpływa na poprawę wytrzymałości materiału. Natomiast w betonach lekkich serii 2 to prawdopodobnie spieniony zaczyn, o znacznie wyższym stosunku w/c, stanowi najbardziej porowaty i najsłabszy element kompozytu. W związku z tym, w porównaniu z serią 1, betony serii 2 osiągnęły wytrzymałość na ściskanie znacznie mniejszą i mniejszy wpływ zastosowanego rodzaju kruszywa lekkiego. Wartości te wahały się od 2,9 MPa do 7,4 MPa, co stanowi od 14% do 32% wytrzymałości betonu referencyjnego 2R. Wyniki badań wytrzymałości betonów z polistyrenem, perlitem oraz szkłem ekspandowanym wykazują, że do betonów izolacyjno-konstrukcyjnych z tego

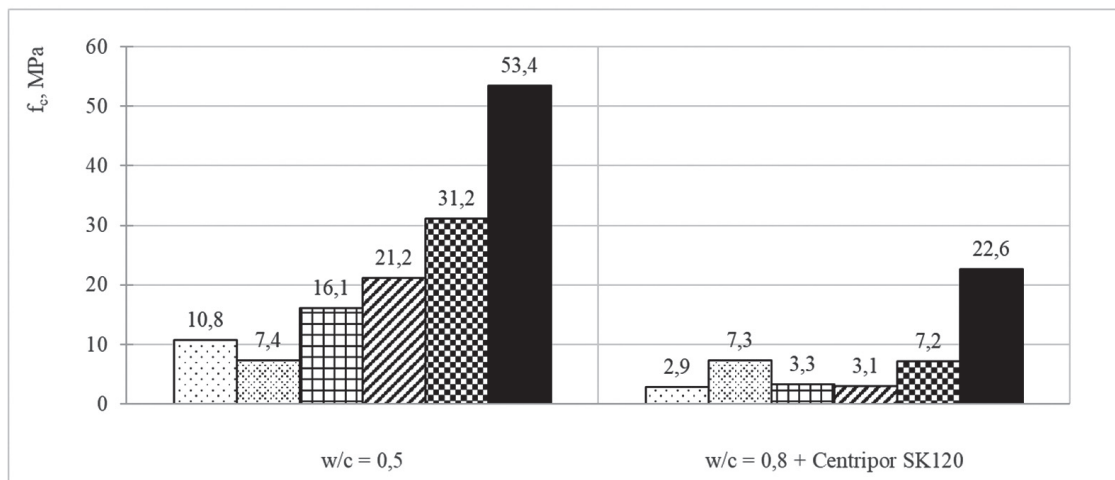
are shown in Fig. 3. On account of considerable differences in the structure of the pores of the applied lightweight aggregates, there is no observable direct dependence of the density and water absorption of the produced structural-insulating concretes. Series 1 of lightweight concretes was characterised by 23.5% ÷ 38.5% absorption. On the other hand, in the case of more porous lightweight concretes from series 2, the absorption ranged between 31.8% and as much as 105.4%. These values were about 3 ÷ 11 times higher compared to the absorption of the reference concretes. In light of the requirements of the standard PN-91/ B-06263 (17), such high absorption of the tested structural-insulating concretes eliminates their unprotected usage in environments where they are exposed to atmospheric conditions. What is most notable is the highest absorption of concretes containing the perlite aggregate in both series. Due to a very high absorption of perlite itself – $WA_{30\text{ min}} = 130\%$, incomparably higher than the absorption of other lightweight aggregates, the absorption of composites containing that aggregate was also substantially higher than the other concretes. Particularly, the application of a cement matrix with high porosity in series 2 allowed absorption of large quantities of water not only in the pores of the matrix itself, but also in perlite, which is characterised by considerable expandability. These properties of the perlite aggregate mean that its application in structural-insulating concretes, used in high humidity conditions should be deemed improper. Despite the differentiated water absorption of polystyrene granulate, expanded clay and sintered fly ash – $WA_{30\text{ min}} = 0\% \div 17\%$ – lightweight concretes with these aggregates showed the lowest – comparable – absorption. The relatively high absorption of composites with expanded glass is probably correlated with the best adhesion of paste to the smooth surface of this aggregate.

The results of strength tests presented in Figs. 4 and 5 show the different effects of the composition of concretes from series 1 and 2 on this property. Inasmuch as in series 1, the type of aggregate and its density, have a notable effect on flexural and compressive strengths, series 2 does not show such a distinctive effect of that component. The average compressive strength of lightweight concretes in series 1 fluctuates between 7.4 MPa and 31.2 MPa, which constitutes 14% to 58% of the strength of reference concrete 1R. This means that the weakest structural element of lightweight concretes from series 1 is a lightweight aggregate of the porosity higher than that of the cement matrix. Hence, the application of a higher density aggregate has a positive effect on the material strength, whereas in the lightweight concretes from series 2, it is probably foamed cement paste with a much higher w/c ratio, that constitutes the most porous and the weakest component of the composite. Compared to series 1, concretes from series 2 have showed much lower compressive strength and the effect of the applied lightweight aggregate was lower. These values fluctuated between 2.9 MPa and 7.4 MPa, which constitutes 14% to 32% of the strength of reference concrete 2R. The strength test results for concretes with polystyrene, perlite and expanded glass show that applying a cement matrix of higher porosity than the matrix in series 1 to structural-insulating concretes with these types of aggregates, is improper.



Rys. 4. Średnia wytrzymałość na zginanie (f_t) betonów drobnokruszywowych z różnymi kruszywami: granulaty polistyrenowy (S), perlit (P), szkło ekspandowane (G), keramzyt (K), popiołoporyt (V) oraz piasek normowy (R)

Fig. 4. Mean flexural strength (f_t) of fine-aggregate concretes with different aggregates: polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)



Rys. 5. Średnia wytrzymałość na ściskanie (f_c) betonów drobnokruszywowych z różnymi kruszywami: granulaty polistyrenowy (S), perlit (P), szkło ekspandowane (G), keramzyt (K), popiołoporyt (V) oraz piasek naturalny (R)

Fig. 5. Mean compressive strength (f_c) of fine-aggregate concretes with different aggregates: polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)

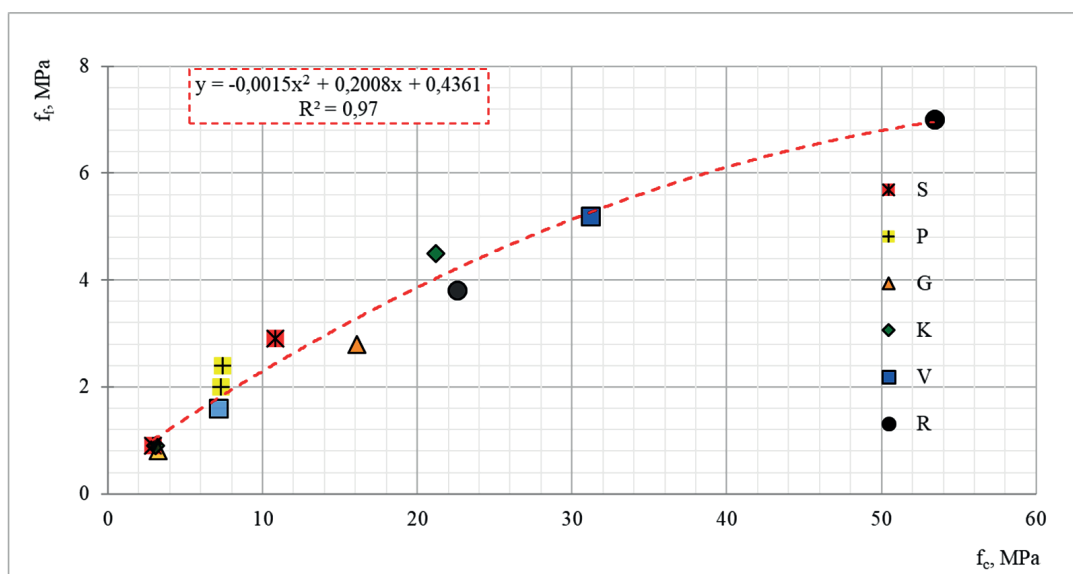
rodzaju kruszywami zastosowanie matrycy cementowej o większej porowatości, niż matrycy serii 1, nie jest właściwe.

Na rysunku 6 przedstawiono zależności wytrzymałości na ściskanie i zginanie betonów drobnokruszywowych. Wytrzymałość na zginanie tych betonów jest proporcjonalna do ich wytrzymałości na ściskanie i stanowi od 13,1% do 32,4% jej wartości. Wpływ zastosowanego rodzaju kruszywa lekkiego oraz matrycy cementowej miał w tym przypadku wtórne znaczenie. Wykazana korelacja obu wielkości potwierdza ogólnie znaną zasadę, że wzrostowi wytrzymałości na ściskanie kompozytów betonowych towarzyszy zmniejszenie stosunku wytrzymałości na zginanie do wytrzymałości na ściskanie.

Zależność wytrzymałości na ściskanie od gęstości betonów lekkich w stanie suchym, którą przedstawiono na rysunku 7, wykazała

Fig. 6 shows the dependencies observed in compressive and flexural strengths of fine-aggregate concretes. The flexural strength of these concretes is proportional to their compressive strength and constitutes 13.1% to 32.4% of its value. The effect of the applied type of lightweight aggregate and cement matrix had a secondary significance in that case. The indicated correlation of both of these values proves the commonly known rule, that an increase in the compressive strength of concrete composites is accompanied by a decrease in the relation of flexural strength to compressive strength.

The dependence of compressive strength on the density of dry lightweight concretes, which is presented in Fig. 7, has shown a significant effect of the composition of composites on changes to that dependence. In the case of series 1, each increase in

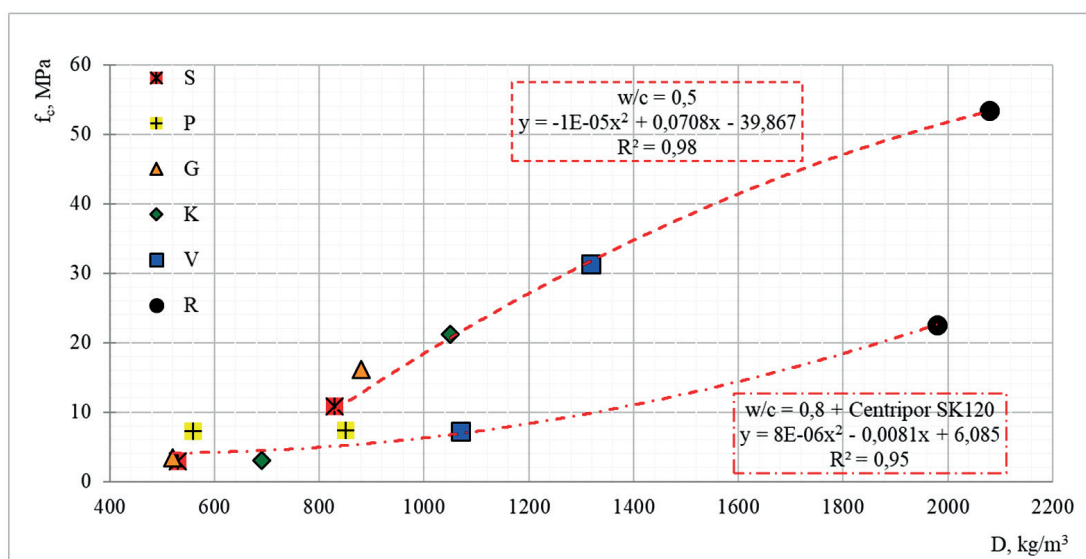


Rys. 6. Zależność średniej wytrzymałości na zginanie (f_f) od średniej wytrzymałości na ściskanie (f_c) betonów drobnokruszywowych z różnymi kruszywami: granulatu polistyrenowy (S), perlitu (P), szkła ekspandowanego (G), keramzytu (K), popiołoporytu (V) oraz piasek normowy (R)

Fig. 6. Relationship of mean flexural strength (f_f) from compressive strength (f_c) for fine-aggregate concretes with different aggregates: polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and standard sand (R)

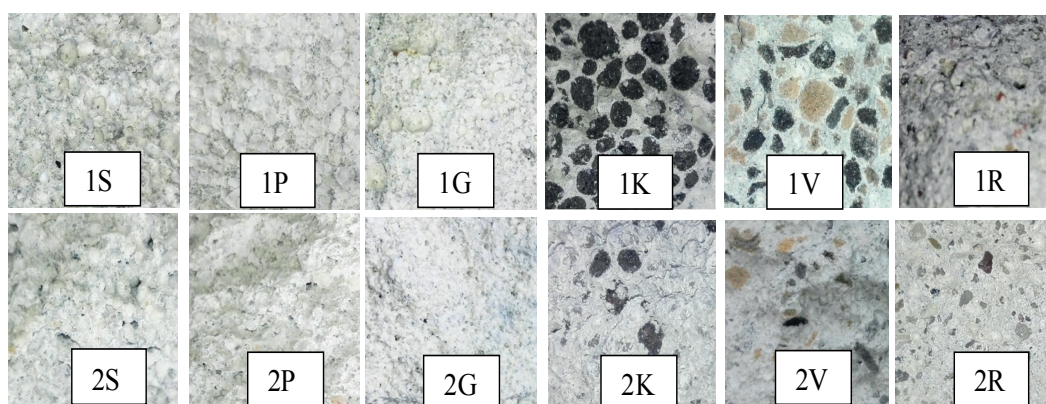
natomiast znaczny wpływ składu kompozytów na jej zmiany. W przypadku serii 1 każdemu wzrostowi gęstości, wynikającemu z zastosowania kruszywa o mniejszej porowatości, odpowiada wyraźny wzrost wytrzymałości. Spośród betonów z kruszywami ultralekkimi o porównywalnej gęstości [1S, 1P, 1G], największą wytrzymałość otrzymano przy zastosowaniu szkła ekspandowanego. Natomiast w przypadku serii 2 wpływ zastosowanego kruszywa lekkiego na zależność wytrzymałości kompozytu od jego gęstości jest praktycznie bez znaczenia, w związku z zastosowaniem bardzo porowatej i słabej matrycy cementowej. W rezultacie, wzrostowi gęstości kompozytów lekkich serii 1 o ponad

density, resulting from the application of a less porous aggregate, corresponds with a notable increase in strength. In concretes with ultralightweight aggregates of comparable density [1S, 1P, 1G], the highest strength was obtained with the application of expanded glass, whereas in the case of series 2, the effect of the applied lightweight aggregate on the dependency of the strength of a composite on its density is practically insignificant, due to the application of a very porous and weak cement matrix. As a result, the increase in the density of the light composites from series 1 by over 500 kg/m³ is responsible for the increase in strength by only about 4 MPa, whereas in the case of series 2, an analogous increase



Rys. 7. Zależność średniej gęstości w stanie suchym (D) i średniej wytrzymałości na ściskanie (f_c) betonów drobnokruszywowych z granulatem polistyrenowym (S), perlitem (P), szkłem ekspandowanym (G), keramzytem (K), popiołoporytem (V) oraz piaskiem naturalnym (R)

Fig. 7. Relationship between mean oven-dried density (D) and compressive strength (f_c) of fine-aggregate concretes with polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)



Rys. 8. Przelamy betonów drobnokruszywowych z matrycą cementową o $w/c = 0,8$ (1) lub $w/c = 0,5$ (2) oraz z granulatem polistyrenowym (S), perlitem (P), szkłem ekspandowanym (G), keramzytem (K), popiołoporytem (V) oraz piaskiem naturalnym (R)

Fig. 8. Fractures of fine-aggregate concretes with cement matrix of $w/c = 0.8$ (1) or $w/c = 0.5$ (2) and with polystyrene granulate (S), perlite (P), expanded glass (G), expanded clay (K), sintered fly ash (V) and natural sand (R)

500 kg/m³, odpowiada zwiększenie wytrzymałości zaledwie o około 4 MPa, podczas gdy w przypadku serii 2, analogiczny przyrost gęstości wiąże się ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie o około 24 MPa. Wykazany brak jednoznacznej zależności tych dwóch najważniejszych właściwości betonów izolacyjno-konstrukcyjnych wykazuje, iż gęstość tych betonów nie może służyć jako wskaźnik ich wytrzymałości. Przykładowo, beton 1K, na słabszym i bardziej porowatym kruszywie keramzytowym, uzyskał prawie trzykrotnie większą wytrzymałość na ściskanie niż beton 2V, o porównywalnej gęstości, wynoszącej około 1060 kg/m³. Był on wykonany na najmocniejszym, najmniej porowatym kruszywie popiołoporytowym, o największej wytrzymałości.

Ocena wizualna przełamów próbek betonów drobnokruszywowych po badaniu wytrzymałości na ściskanie, potwierdza omówione powyżej wnioski dotyczące wpływu rodzaju matrycy i kruszywa na kształtowanie właściwości badanych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych. Na rysunku 8 widoczne są różnice w postaci zniszczenia betonów serii 1 i 2. W przypadku betonów lekkich serii 1 obserwuje się zniszczenie kompozytów poprzez ziarna kruszywa lekkiego. Taka forma zniszczenia wynika z wyższej wytrzymałości matrycy cementowej w stosunku do kruszywa i jej odpowiedniej przyczepności. W serii 2, wykonanej z zaczynu o większym stosunku w/c , a także o dodatkowo większej porowatości w wyniku dodatku odpowiedniej domieszki, uszkodzeniu ulega głównie zaczyn w warstwie stykowej oraz w miejscu występowania porów powietrznych. Pęknięcie poprzez ziarna kruszywa zdarza się tu sporadycznie. Wyjątek stanowią jednak kompozyty zawierające perlit, które nawet w przypadku zastosowania bardzo porowatej matrycy cementowej, pękały poprzez ziarna kruszywa. Prawdopodobnie struktura porowatości tego kruszywa oraz powstawanie rys w jego ziarnach w procesie mieszania, korzystnie wpłynęło na poprawę jednorodności tego kompozytu. W rezultacie beton 2P wykazywał wyższą wytrzymałość niż kompozyty lekkie tej serii, o porównywalnej gęstości.

in density, is correlated with the increase in compressive strength by about 24 MPa. The proven lack of unambiguous dependency between these two most important properties of structural-insulating concretes shows that the density of those concretes cannot serve as an indication of their strength. For example, concrete 1K based on a weaker and more porous expanded clay aggregate, has shown almost three times as much compressive strength as concrete 2V, with the comparable density of about 1060 kg/m³. It was produced of the least porous sintered fly ash aggregate with the highest strength.

The visual evaluation of fractures in fine-aggregate concrete samples, after compressive strength test, confirms the above conclusions concerning the effect of the matrix and aggregate on the properties of the analysed structural-insulating concretes. Fig. 8 shows differences in the damage to concretes from series 1 and 2. In the case of light concretes from series 1, the destruction of composites through lightweight aggregate grains was appeared. This form of destruction results from a higher strength of the cement matrix in relation to the aggregate, and its proper adhesion. In series 2, made from the cement paste with a higher w/c ratio, and with higher porosity, resulting from adding a proper admixture, the damage mainly occurred in the paste in the contact layer and air pores. Fractures through aggregate grains occur sporadically in this case. However, there is an exception in the form of composites containing perlite, which – even with the application of a very porous cement matrix – fractured through aggregate grains. It is probable that the structure of the aggregate porosity and the occurrence of scratches in its grains in the mixing process had a positive effect on the uniformity of this composite. As a result, concrete 2P showed higher strength than light composites in this series, with comparable density.

4. Summary

The results of the tests prove that the assortment of lightweight aggregates available on the market creates the possibility to shape the properties of fine-aggregate structural-insulating concretes to

4. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wykazują, że dostępny na rynku asortyment kruszywa lekkich stwarza możliwości kształtowania właściwości drobnokruszywowych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, w bardzo szerokim zakresie. Badane kompozyty lekkie miały gęstość w stanie suchym w zakresie od 520 kg/m³ do 1320 kg/m³ oraz wytrzymałość na ściskanie w zakresie od 2,9 MPa do 31,2 MPa.

Zastąpienie drobnego kruszywa zwykłego kruszywami porowatymi umożliwiło obniżenie gęstości betonów wykonanych z matrycy cementowej o w/c = 0,5 aż o 37 ÷ 60%. Przy zastosowaniu zaczynu o większym w/c = 0,8 oraz dodatkowo domieszki spieniającej zmniejszenie gęstości betonów lekkich wyniosła aż 46% ÷ 74%. Zastosowanie kruszyw lekkich, zamiast ich nieporowatych odpowiedników, wpłynęło również na wyraźne zmniejszenie wytrzymałości, o 42%, aż do 86%. W przypadku badanych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych nie stwierdzono natomiast bezpośredniej zależności wytrzymałości na ściskanie od ich gęstości. Rodzaj kruszywa lekkiego, mający duży wpływ na gęstość kompozytu, wywierał bowiem wyraźny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, jedynie w przypadku betonów wykonanych z zaczynu o wytrzymałości wyższej niż zastosowane kruszywo. W związku z powyższym produkcję drobnokruszywowych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, wykonywanych na matrycach cementowych o znacznej porowatości i kruszywach lekkich o większej gęstości ziaren, takich jak popiołoporyt czy keramzyt, należy uznać za mało efektywną. W takich przypadkach uzyskuje się bowiem kompozyty o stosunkowo znacznej gęstości, która nie wiąże się jednak ze znaczną poprawą ich wytrzymałości. Natomiast takie matryce wraz z kruszywami ultralekkimi mogą być z powodzeniem stosowane do produkcji betonów izolacyjno-konstrukcyjnych, dla których najważniejszym kryterium przy projektowaniu jest mała gęstość kompozytów. Spośród badanych kruszyw ultralekkich szkło ekspandowane zapewnia najkorzystniejsze powiązanie wytrzymałości z gęstością betonów izolacyjno-konstrukcyjnych.

Duża nasiąkliwość badanych betonów izolacyjno-konstrukcyjnych wskazuje na brak możliwości ich stosowania bez zabezpieczenia, w przypadku narażenia na oddziaływanie czynników atmosferycznych. W przypadku kompozytów z kruszywem perlitowym niewskazane jest ich zastosowanie nawet w warunkach podwyższonej wilgotności.

Literatura / References

1. W. Roszak, F. Kubiczek, *Betony z kruszyw lekkich*, Arkady, Warszawa 1989.
2. R. Valore, *Concrete International*, 2, p.40 (1980).
3. ACI 122R-02. *Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems*.
4. S. Chandra, L. Berntsson, *Lightweight aggregate concrete*, Noyes Publications, New York 2003.

a large extent. The dry density of the analysed composites ranged from 520 kg/m³ to 1320 kg/m³ and their compressive strength fluctuated between 2.9 MPa and 31.2 MPa.

Substitution standard fine aggregate with porous aggregates allowed to decrease the density of concretes, made from a cement matrix with w/c = 0.5 by as much as 37% ÷ 60%. With the application of the paste with a higher w/c = 0.8 and the addition of a foaming agent, the decrease in the density of the lightweight concretes was as high as 46% ÷ 74%. Using lightweight aggregates, instead of their non-porous counterparts, also resulted in a notable decrease in strength, by 42%, up to 86%. In the case of structural-insulating concretes, no direct dependence of compressive strength of their density was noted. The type of the lightweight aggregate, which has a significant effect on the density of the composite, exerted great influence on compressive strength only in the case of concretes produced with paste whose strength was higher than the applied aggregate. As a result, the production of fine-aggregate structural-insulating concretes with the use of cement matrices of high porosity and lightweight aggregates with higher grain density, such as sintered fly ash or expanded clay, should be deemed as insufficiently effective. This is because in such cases only composites with relatively significant density were produced, which is not correlated with substantial improvement in their strength. On the other hand, such matrices along with ultralightweight aggregates, may be successfully used to produce structural-insulating concretes, for which the most important design criterion is low density of composites. Out of all of the tested ultralightweight aggregates, expanded glass ensures the most favourable dependency between strength and density of structural-insulating concrete.

The high water absorption of the tested concretes shows a lack of possibility to apply them without protection in environments where they are exposed to atmospheric conditions. It is recommended that composites with a perlite aggregate cannot be applied even in higher humidity environments.

5. J. Clarke, Structural lightweight aggregate concrete, Chapman & Hall, London 1993.
6. L. Domagała, K. Kurzyniec, Energy efficient, sustainable building materials and products / ed. by Izabela Hager, Cracow University of Technology Press, s. 303, Cracow 2017.
7. A. J. Brooks, M. Meijs, Cladding in Buildings, Taylor & Francis, Abingdon 2008.
8. T. Henriksen, S. Lo, U. Knaack, Advances in Civil Engineering Materials, 4, p.115 (2015).
9. S. Feirabend, A. Emami, E. Riedel, Bautechnik, 91 (2014).
10. T. Henriksen, S. Lo, U. Knaack, Journal of Building Engineering, 4, p.189, (2015).
11. L. Domagała, E. Bizoń-Żabińska, K. Kurzyniec, MATEC Web of Conferences 262 (2019).
12. <https://www.poraver.com> (2019-04-01)
13. EN 206. Concrete: Specification, performance, production and conformity.
14. EN 1520 Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement.
15. EN 196-1 Methods of testing cement. Determination of strength.
16. EN 12390-7 Testing hardened concrete. Density of hardened concrete.
17. PN-91/ B-06263. Beton lekki kruszywowy.