

Wpływ uziarnienia kruszywa grubego na właściwości mechaniczne oraz odporność betonu lekkiego kruszywowego z popiołoporytem na zamrażanie i rozmrażanie

Effect of particle size of coarse aggregate on mechanical properties and freeze-thaw resistance of ceramsite concrete

Peng Deng^{1,2}, Xianglong Zhang², Yan Liu^{1,2,*}, Quanlei Wang², Yiming Han², Yunzhong Ni²

¹Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

²College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

*Corresponding author: Y. Liu, e-mail: skd990583@sdust.edu.cn

Streszczenie

Uziarnienie kruszywa grubego, jako niezbędnego składnika betonu lekkiego kruszywowego [CC], w istotnym stopniu wpływa na jego właściwości. W celu zbadania jednoczesnego wpływu uziarnienia popiołoporytu na właściwości mechaniczne oraz odporność na cykle zamrażania i rozmrażania CC zaprojektowano siedem serii betonów zawierających popiołoporyt o różnych wielkościach ziaren, opartych na trzech zakresach uziarnienia kruszywa grubego: 5–6 mm, 10–11 mm oraz 15–16 mm. Wyniki wykazały, że wytrzymałość na ściskanie CC po 28 dniach wzrastała wraz ze zmniejszaniem średniej wielkości ziaren. W przypadku zastosowania popiołoporytu o różnych uziarnieniach wytrzymałość na ściskanie CC wzrastała szybciej we wczesnym i pośrednim okresie dojrzewania. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałość na zginanie CC po 28 dniach wykazywały analogiczną tendencję zmian jak w badaniach wytrzymałości na ściskanie. Zastosowanie popiołoporytu o większym uziarnieniu przyczyniało się jednak do poprawy odporności CC na cykle zamrażania i rozmrażania. Po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania ubytek masy CC zawierającego popiołoporyt o uziarnieniu 5–6 mm wynosił 3,7%, natomiast dla popiołoporytu o uziarnieniu 15–16 mm jedynie 2,1%, co stanowiło wartość najniższą. Jednocześnie względny dynamiczny moduł sprężystości dla pierwszego przypadku osiągnął minimalną wartość 62,8%. Analiza obrazów uzyskanych metodą skaningowej mikroskopii elektronowej wykazała, że po cyklach zamrażania i rozmrażania rysy w zaczynie cementowym oraz w strefie przejściowej [ITZ] CC zawierającego popiołoporyt o mniejszym uziarnieniu były szersze.

Słowa kluczowe: beton z popiołoporytu, uziarnienie, właściwości mechaniczne, odporność na zamrażanie i rozmrażanie, mikrostruktura

Summary

As an indispensable component of ceramsite concrete [CC], the particle size of coarse aggregate affects the performance of concrete to a certain extent. To further investigate the effect of particle size of ceramsite on mechanical properties and freeze-thaw resistance of CC simultaneously, seven series of CC containing ceramsite with various particle sizes were designed based on three different particle sizes of coarse aggregate which were 5~6 mm, 10~11 mm and 15~16 mm respectively. The results showed that the compressive strength of CC at 28 days increased with the decrease in the average particle size. When the ceramsite with different particle sizes was incorporated, the compressive strength of CC increased faster in the early and middle curing stages. The splitting tensile strength and flexural strength of CC at 28 days also exhibited the same change trend as that in the compression test. However, incorporating ceramsite with large particle size could improve the freeze-thaw resistance of CC. After 100 freeze-thaw cycles, the mass loss rate of CC containing ceramsite with a particle size of 5~6 mm was 3.7 %, whereas that of 15~16 mm was only 2.1 % which was the lowest. Meanwhile, the former's relative dynamic elastic modulus [RDEM] was 62.8 %, reaching the minimum value. By comparing the scanning electron microscopy images, the cracks of cement paste and interfacial transition zone [ITZ] of CC containing ceramsite with smaller particle size were wider after freeze-thaw cycles.

Keywords: ceramsite concrete, particle size, mechanical properties, freeze-thaw resistance, microstructure

1. Wprowadzenie

Betony z popiołoporytem [CC, z ang. ceramsite concrete] stanowią grupę betonów lekkich kruszywowych [LWAC, z ang. lightweight aggregate concrete], charakteryzujących się szeregiem istotnych zalet, takich jak mała gęstość, dobra izolacyjność cieplna oraz przyjaznych środowisku (1). Jednak w porównaniu z betonem zwykłym CC często wykazuje obniżoną wytrzymałość mechaniczną z uwagi na większą porowatość (2). Z tego względu betony lekkie kruszywowe są powszechnie stosowane do produkcji pustaków i paneli ściennych (3, 4). W celu szerszego zastosowania CC w budownictwie wysokościowym oraz mostach o dużych rozpiętościach konieczne jest dalsze zwiększenie jego wytrzymałości (5). Liczne wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że właściwości mechaniczne CC zależą od wielu czynników. Jednym z najistotniejszych jest stosunek wody do spoiwa [w/b]. Wu i in. (6) oraz Hong i in. (7) stwierdzili, że zmniejszenie wartości współczynnika w/b prowadzi do wzrostu wytrzymałości na ściskanie LWAC dzięki większej szczelności matrycy cementowej. Istotną rolę w kształtowaniu wytrzymałości LWAC odgrywają również włókna. Jiang i in. (8) oraz Ye i in. (9) wykazali, że zastosowanie włókien powoduje ogólny wzrost wytrzymałości mechanicznej wskutek efektu synergicznego. Ponadto znaczący wpływ na wytrzymałość mechaniczną LWAC mają syntetyczne nanomateriały. Zhang i in. (10) oraz Jiang i in. (11) wykazali odpowiednio, że obecność wielościennych nanorurek węglowych oraz tlenku grafenu poprawia właściwości mechaniczne betonu poprzez korzystną modyfikację jego mikrostruktury. Choć metody te umożliwiają znaczną poprawę wytrzymałości betonu, wiążą się one z pewnymi ograniczeniami, takimi jak stosunkowo wysokie koszty oraz złożony proces technologiczny. W związku z tym poszukuje się bardziej odpowiednich i prostszych metod zwiększania wytrzymałości mechanicznej CC.

Jak wiadomo, w przypadku betonu zwykłego istotny wpływ na wytrzymałość ma również wielkość ziaren kruszywa. Vu i in. (12) zaobserwowali, że zarówno wytrzymałość, jak i moduł Younga wzrastają wraz ze zwiększeniem wielkości kruszywa grubego, co można wyjaśnić fizycznym zazębaniem się ziaren kruszywa. Wyniki badań Uddina i in. (13) wykazały, że przy niższej zawartości cementu wytrzymałość na ściskanie wzrasta wraz ze zwiększeniem maksymalnego wymiaru kruszywa, co związane jest ze zmniejszeniem całkowitej powierzchni strefy przejściowej międzyfazowej. Z kolei Liu i in. (14) stwierdzili, że wraz ze wzrostem maksymalnego wymiaru kruszywa wytrzymałość na ściskanie betonów ultrawysockowartościowych początkowo wzrasta, a następnie maleje, ponieważ zastosowanie grubszego kruszywa zwiększa nośność na ściskanie, ale jednocześnie prowadzi do powstawania większej liczby oraz większych porów. Według Tayeh i wsp. (15), w porównaniu z naturalnym uziarnieniem piasku, drobniejsze frakcje poprawiają wytrzymałość na ściskanie betonu dzięki uzyskaniu bardziej zwartej matrycy zaczynu cementowego. W odniesieniu do LWAC Ma i in. (16) badali wpływ wielkości ziaren na właściwości mechaniczne i wykazali, że beton zawierający kruszywo grube o mniejszym uziarnieniu osiąga wyższą wytrzymałość na ściskanie. Wei i in. (17) stwierdzili natomiast, że wielkość ziaren

1. Introduction

Ceramsite concrete [CC] is a representative of lightweight aggregate concrete [LWAC], which has a variety of obvious advantages such as low density, good thermal insulation and environmental friendliness (1). However, compared to the normal concrete, CC is often produced with reduced mechanical strength due to the presence of voids inside it (2). Therefore, CC is generally used to manufacture the hollow block and wall panels for supporting structures (3, 4). It is necessary to further improve the strength of CC in order to be better applied in high-rise buildings and long-span bridges (5). According to an overwhelming number of experimental results, there are various factors influencing the mechanical properties of CC. The water to binder [w/b] ratio is one of the influential parameters. Wu et al. (6) and Hong et al. (7) stated that the compressive strength of LWAC increased by reducing the w/b ratio due to the higher compactness of the cement matrix. Meanwhile, fiber also plays a significant role in the strength of LWAC. Jiang et al. (8) and Ye et al. (9) reported that the mechanical strength showed an overall increasing trend with the incorporation of fibers because of the synergistic effect. In addition, the effect of synthesized nanomaterials on the mechanical strength of LWAC was also significant. Zhang et al. (10) and Jiang et al. (11) respectively illustrated that the presence of multi-walled carbon nanotubes and graphene oxide enhanced the mechanical performance of concrete by improving the microstructural characteristics. Although these methods can improve the strength of concrete significantly, there are some defects such as the relatively high cost and complex manufacturing process. Thus, a more appropriate and convenient method for enhancing the mechanical strength of CC is needed.

As well known, for normal concrete, the particle size of aggregates also has a significant effect on the strength. Vu et al. (12) observed that both the strength and Young's modulus increased with the increasing size of the coarse aggregate, which can be explained by the physical entanglement of aggregates. Experimental results of Uddin et al. (13) showed that at lower cement content, the compressive strength increased with the increase in maximum aggregate size, as the total surface area of the interfacial transition zone is reduced. However, Liu et al. (14) concluded that with the increase in maximum aggregate size, the compressive strength of ultra-high performance concrete showed a trend of increasing initially and then decreasing, because the introduction of coarser aggregates provides higher compressive capacity, and at the same time it results in more and larger pores. According to Tayeh et al. (15), when compared to natural particle size distribution sand, the finer sand enhanced the compressive strength of concrete due to the denser paste matrix. For LWAC, Ma et al. (16) investigated the influence of particle size on mechanical properties and concluded that the concrete with small-size coarse aggregate had better compressive strength. Wei et al. (17) found that the particle size of lightweight aggregate with different quality had various impacts on the mechanical strength of LWAC. However, the effect of single particle size and the combination of different particle sizes of aggregate on the performance of LWAC is still not clear. Meanwhile,

kruszywa lekkiego o różnej jakości wywiera zróżnicowany wpływ na wytrzymałość mechaniczną LWAC. Nadal jednak nie wyjaśniono w sposób jednoznaczny wpływu pojedynczych frakcji oraz kombinacji różnych uziarnień kruszywa na właściwości LWAC. Ponadto tempo przyrostu wytrzymałości LWAC wymaga bardziej szczegółowej analizy. Z tego względu systematyczna ocena wpływu wielkości ziaren na właściwości mechaniczne CC ma istotne znaczenie poznawcze i praktyczne.

Ogólnie odporność LWAC na cykle zamrażania i rozmrażania jest wyższa niż betonu zwykłego, co wynika z relatywnie dużej porowatości LWAC, umożliwiającej skuteczne ograniczenie naprężeń wywołanych rozszerzaniem się lodu (18). Podobne wnioski przedstawili Lee i in. (19). Zhu i in. (20) potwierdzili, że odporność na zamrażanie i rozmrażanie jest związana z układem porów wewnętrznych LWAC. Analogiczne zależności zaobserwowali również Sobhani i in. (21). Należy podkreślić, że struktura porów zależy od wielkości ziaren kruszywa (22, 23). Można zatem oczekiwać, że wielkość ziaren kruszywa lekkiego będzie w pewnym stopniu wpływać również na odporność LWAC na cykle zamrażania i rozmrażania. Nadal jednak brak jednoznacznego wyjaśnienia wpływu wielkości ziaren kruszywa grubego na odporność LWAC na działanie mrozu.

Uwzględniając powyższe zagadnienia, celem niniejszej pracy było jednoczesne zbadanie wpływu wielkości ziaren popiołoporytu na właściwości mechaniczne oraz odporność CC na cykle zamrażania i rozmrażania. W tym celu przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz zginanie czteropunktowe w celu oceny zachowania wytrzymałościowego materiału. Jednocześnie jako wskaźniki odporności na zamrażanie i rozmrażanie zastosowano ubytek masy oraz względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM z ang. relative dynamic elastic modulus]. Dodatkowo wykonano badania z zastosowaniem skaningowej mikroskopii elektronowej [SEM] w celu analizy mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zmiany właściwości makroskopowych. Przeprowadzone badania pozwalają w pewnym stopniu uzupełnić lukę występującą w literaturze dotyczącą wpływu wielkości ziaren kruszywa grubego na właściwości LWAC, dostarczając jednocześnie podstaw teoretycznych do dalszych badań w tym zakresie.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

Jako materiały wiążące zastosowano cement portlandzki P-O 42,5R o gęstości 3100 kg/m³ i 28-dniowej wytrzymałości na ści-

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I PYŁU KRZEMIONKOWEGO, %.
CHEMICAL COMPOSITIONS OF CEMENT AND SILICA FUME, %.

	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	Cr	TiO ₂	Cl	MnO	MgO	Na ₂ O
Cement	51.33	7.41	24.78	3.78	5.54	5.12	0.34	0.23	0.30	0.05	0.07	1.02	0.06
Pył krzemionkowy Silica fume	0.3	1.0	95.8	0.9	-	-	-	-	-	-	-	0.7	1.3

the growth rate of strength of LWAC should be more specific. Thus, it is significantly valuable that the effect of particle size on the mechanical properties of CC can be appraised systematically.

Generally, the freeze-thaw resistance of LWAC is better than that of normal concrete, which is attributed to the fact that LWAC contains relatively high porosity which can significantly alleviate the frost-heave stress (18). Similar conclusions were observed by Lee et al. (19). Zhu et al. (20) confirmed that the freeze-thaw resistance was related to the internal pores of LWAC. Sobhani et al. (21) also found the same law. It should be noted that the pore structure was influenced by the particle size of aggregate (22, 23). Therefore, the particle size of lightweight aggregate will logically affect the freeze-thaw resistance of LWAC to a certain extent. However, there still lack of a clear understanding of the effect of the particle size of coarse aggregate on the freeze-thaw resistance of LWAC.

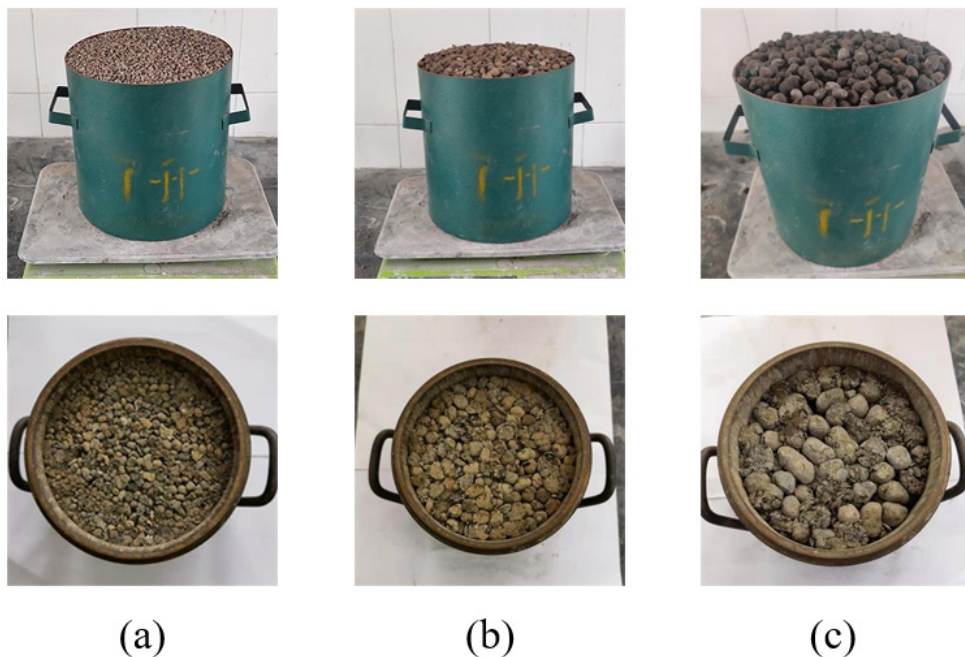
Considering the foregoing issues, the aim of the present study is to investigate the effect of particle size of ceramsite on mechanical properties and freeze-thaw resistance of CC simultaneously. Therefore, the compression test, splitting tensile test and four-point bending test were conducted to evaluate the strength behavior. Meanwhile, the mass loss rate and relative dynamic elastic modulus (RDEM) were utilized as indices which can appraise the freeze-thaw resistance of CC. Additionally, the scanning electron microscopy (SEM) test was also performed to analyze the evolution mechanism of macroscopic performance. Through the above-mentioned tests, this study can fill the gap in the current literature on the effect of particle size of coarse aggregate on the performance of LWAC to a certain extent, providing theoretical support for the relevant research.

2. Experimental

2.1. Materials

P-O 42.5R Portland cement with a density of 3100 kg/m³ and 28-day compressive strength of 44.3 MPa, and silica fume were used as cementitious material, and the detailed chemical compositions are shown in Table 1. The natural river sand used as fine aggregate had a particle size of 0.15 ~ 4.75 mm. The apparent density and bulk density of fine aggregate were 2670 kg/m³ and 1570 kg/m³ respectively, and the mud content was 2.1%. Polycarboxylate superplasticizer with a water-reducing rate of 27%, meeting the requirement of Chinese Standard GB 8076-2008 (24), was adopted to improve the workability of LWAC.

Fly ash ceramsite produced in Shandong Province, China, was used as coarse aggregate. According to the test scheme, three



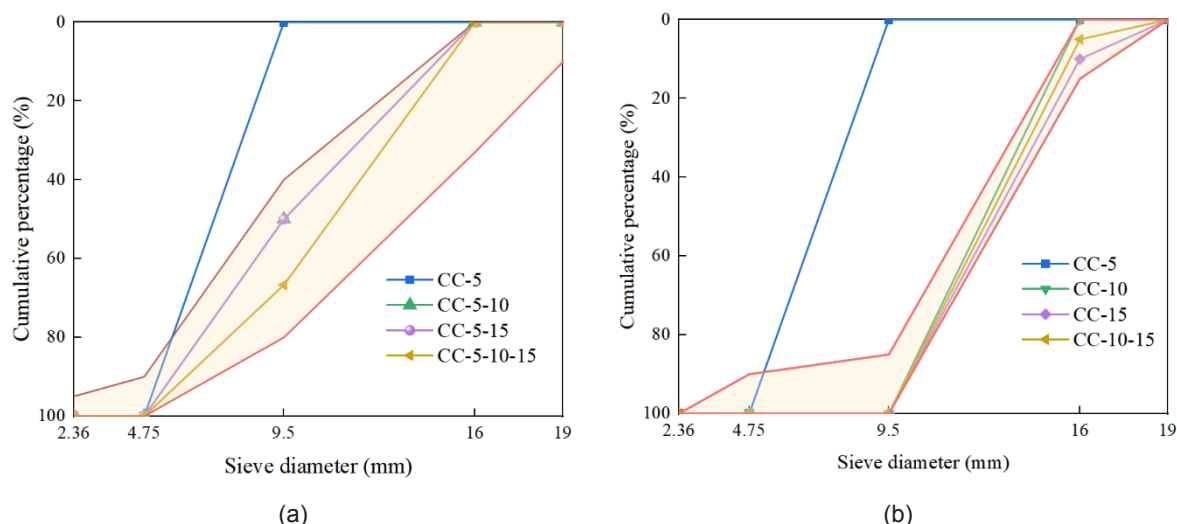
Rys. 1. Badanie gęstości nasypowej oraz wytrzymałości keramzytu na ściskanie w cylindrze dla różnych zakresów uziarnienia: a) 5~6 mm; b) 10~11 mm; c) 15~16 mm.

Fig. 1. Test of bulk density and cylinder compressive strength of ceramsite with different particle sizes: a) 5~6 mm; b) 10~11 mm; c) 15~16 mm.

different particle sizes of coarse aggregate, which were 5~6 mm, 10~11 mm and 15~16 mm respectively, were selected. The detailed data and measurement of physical properties of fly ash ceramsite are shown in Table 2 and Fig. 1.

2.2. Mixture design

In order to systematically investigate the effect of particle size of ceramsite on workability, mechanical properties and freeze-thaw resistance of CC, seven series of CC [including three series of CC containing ceramsite with single particle size and four series of CC containing ceramsite with different particle sizes] were designed. For convenience, an expression based on the particle size of ceramsite is used to visually describe all mixtures. For instance, CC-5-10-15 represents the specimen containing three types of



Rys. 2. Krzywe uziarnienia oraz odpowiadające im grupy dla różnych uziarnień kruszywa grubego: a) grupy o uziarnieniu ciągłym; b) grupy o uziarnieniu nieciągłym.

Fig. 2. Gradation curves and corresponding groupings under different coarse aggregate gradations: a) continuous grading groups; b) discontinuous grading groups.

skanie wynoszącej 44,3 MPa oraz pył krzemionkowy. Skład chemiczny zastosowanych materiałów przedstawiono w tabelicy 1. Jako kruszywo drobne wykorzystano naturalny piasek rzeczny o uziarnieniu 0,15–4,75 mm. Gęstość pozorna oraz gęstość nasypowa kruszywa drobnego wynosiły odpowiednio 2670 kg/m³ i 1570 kg/m³, natomiast zawartość części ilastych wynosiła 2,1%. W celu poprawy urabialności LWAC zastosowano superplastyfikator polikarboksyłanowy

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYWA GRUBEGO.

PHYSICAL PROPERTIES OF COARSE AGGREGATE.

Rozmiar ziaren Particle size, mm	Gęstość pozorna Apparent density, kg/m ³	Odporność na miażdżenie Cylinder compressive strength, MPa	Klasa gęstości Density grade
5~6	790.2	4.1	800
10~11	710.9	3.8	700
15~16	649.4	1.2	600

o zdolności do redukcji ilości wody wynoszącej 27%, spełniający wymagania chińskiej normy GB 8076-2008 (24).

Jako kruszywo grube zastosowano popiołoporyt wyprodukowany w prowincji Shandong w Chinach. Zgodnie z programem badań wybrano trzy zakresy uziarnienia kruszywa grubego: 5–6 mm, 10–11 mm oraz 15–16 mm. Szczegółowe dane oraz wyniki oznaczeń właściwości fizycznych popiołoporytu przedstawiono w tablicy 2 oraz na rys. 1.

2.2. Projektowanie składów

W celu systematycznego zbadania wpływu uziarnienia popiołoporytu na urabialność, właściwości mechaniczne oraz odporność CC na zamrażanie i rozmrażanie zaprojektowano siedem serii CC [w tym trzy serie CC zawierające popiołoporyt o pojedynczym uziarnieniu oraz cztery serie CC zawierające popiołoporyt o różnych zakresach uziarnienia]. Dla uproszczenia zastosowano oznaczenia mieszanek oparte na uziarnieniu popiołoporytu, umożliwiające ich łatwą identyfikację. Przykładowo oznaczenie CC-5-10-15 odnosi się do próbki zawierającej trzy rodzaje popiołoporytu [w stosunku masowym 1:1:1] o uziarnieniu 5–6 mm, 10–11 mm oraz 15–16 mm. Oznaczenia mieszanek oraz ich skład przedstawiono w tablicy 3. Ponadto, zgodnie z chińską normą GB/T 17431.1-2010 (25), mieszanki podzielono na grupy o uziarnieniu ciągłym i nieciągłym. Mieszanki CC-10, CC-15, CC-5-10, CC-5-15, CC-10-15 oraz CC-5-10-15 spełniają wymagania aktualnej normy dotyczące uziarnienia kruszywa grubego. Chociaż uziarnienie kruszywa w mieszance CC-5 przekracza kryteria określone w normie, popiołoporyt o uziarnieniu 5–6 mm może korzystnie wpływać na właściwości mechaniczne CC, co potwierdzają wcześniejsze badania (16). Z tego względu dalsze badania są uzasadnione w celu częściowego uzupełnienia luki występującej w literaturze dotyczącej wpływu uziarnienia kruszywa grubego na właściwości LWAC. Krzywe uziarnienia przedstawiono na rys. 2, gdzie zacieniony obszar na rys. 2a oraz 2b oznacza odpowiednio zakres uziarnienia ciągłego i nieciągłego określony przez normę. Dla wszystkich mieszanek betonowych przyjęto współczynnik w/b równy 0,35 oraz punkt piaskowy wynoszący 40 %.

Tablica 3 / Table 3

OZNACZENIE I SKŁADY MIESZANEK POPIOŁOPORYTOBETONÓW, kg/m³.
MIX ID AND MIXTURE PROPORTIONS OF SEVEN SERIES OF CC, kg/m³.

Mix ID	Spoiwo / Cementitious material		Piasek rzeczny Natural river sand	Woda zarobowa Mixing water	Popiołoporyt / Ceramsite			Plastyfikator Water reducer
	Cement	Pył krzemionkowy Silica fume			5~6 mm	10~11 mm	15~16 mm	
CC-5	420	8	785	150	419	-	-	4.28
CC-10	420	8	785	150	-	419	-	4.28
CC-15	420	8	785	150	-	-	419	4.28
CC-5-10	420	8	785	150	209.50	209.50	-	4.28
CC-5-15	420	8	785	150	209.50	-	209.50	4.28
CC-10-15	420	8	785	150	-	209.50	209.50	4.28
CC-5-10-15	420	8	785	150	139.67	139.67	139.67	4.28

ceramsite [1:1:1 by mass] with a particle size of 5–6 mm, 10–11 mm and 15–16 mm. The mix ID and mixture proportions of seven series of CC are presented in Table 3. In addition, according to the Chinese Standard GB/T 17431.1-2010 (25), the mixtures were divided into continuous and discontinuous grading groups. CC-10, CC-15, CC-5-10, CC-5-15, CC-10-15 and CC-5-10-15 meet the requirement of gradation of coarse aggregate according to the current standard. Although the aggregate gradation of CC-5 exceeds the criteria set by the standard, the ceramsite with a particle size of 5–6 mm may play a positive role in the mechanical properties of CC combined with previous studies (16). Thus, it is necessary to investigate further for the purpose of filling the gap in the current literature on the effect of particle size of coarse aggregate on the performance of LWAC to a certain extent. The gradation curves are shown in Fig. 2, in which the shaded area displayed in Fig. 2a and 2b represents the continuous and discontinuous gradation area set by the standard, respectively. For all concrete mixtures, the w/b ratio was set as 0.35 and the sand ratio was 40 %.

2.3. Specimen preparation

In this research, 126 cubes with a size of 100 × 100 × 100 mm were cast to measure the compressive strength and splitting tensile strength. And 84 prismatic specimens with a size of 100 × 100 × 400 mm were made to evaluate the flexural strength and freeze-thaw resistance. Meanwhile, all experimental results were determined by the mean values of three identical specimens.

The method of preparing specimens in this paper was on the basis of Chinese National Standard GB/T 50081-2019 (26). The ceramsite was pre-wetted for 24 h before mixing, during which the molds were lubricated with release agent. Ceramsite, natural river sand and cementitious material were added to the mixer in turn and stirred for 2 minutes. After that, water mixed with water reducer was gradually added, and then the mixture was stirred for 3 minutes. Subsequently, the concrete was poured out and the slump of the concrete was measured to evaluate the workability. Finally, the specimens were cured according to the standard curing method. The process of specimen preparation is shown in Fig. 3.



Rys. 3. Proces przygotowania próbek: a) wstępne nawilżanie popiołoporytu; b) pomiar opadu stożka; c) pielęgnacja próbek.

Fig. 3. The process of specimen preparation: a) pre-wetting ceramsite; b) measuring slump; c) curing specimens.

2.3. Przygotowanie próbek

W niniejszych badaniach wykonano 126 próbek sześciennych o wymiarach 100 × 100 × 100 mm w celu oznaczenia wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Ponadto przygotowano 84 próbki pryzmatyczne o wymiarach 100 × 100 × 400 mm do oceny wytrzymałości na zginanie oraz odporności na zamrażanie i rozmrażanie. Wszystkie wyniki eksperymentalne określano jako średnią z trzech identycznych próbek.

Metodyka przygotowania próbek została opracowana na podstawie chińskiej normy krajowej GB/T 50081-2019 (26). Przed mieszaniem popiołoporyt poddawano wstępnemu nawilżaniu przez 24 h, a w tym czasie formy smarowano środkiem antyadhezyjnym. Następnie do mieszarki kolejno wprowadzano popiołoporyt, naturalny piasek rzeczny oraz materiały wiążące i mieszano przez 2 minuty. Po tym etapie stopniowo dodawano wodę zmieszaną z domieszką uplastyczniającą, a następnie mieszankę mieszano przez kolejne 3 minuty. Następnie mieszankę betonową wyładowywano z mieszarki i oznaczano opad stożka w celu oceny urabialności. Ostatecznie próbki dojrzewały zgodnie ze standardową procedurą pielęgnacji. Proces przygotowania próbek przedstawiono na rys. 3.

2.4. Test methods

2.4.1. Mechanical test

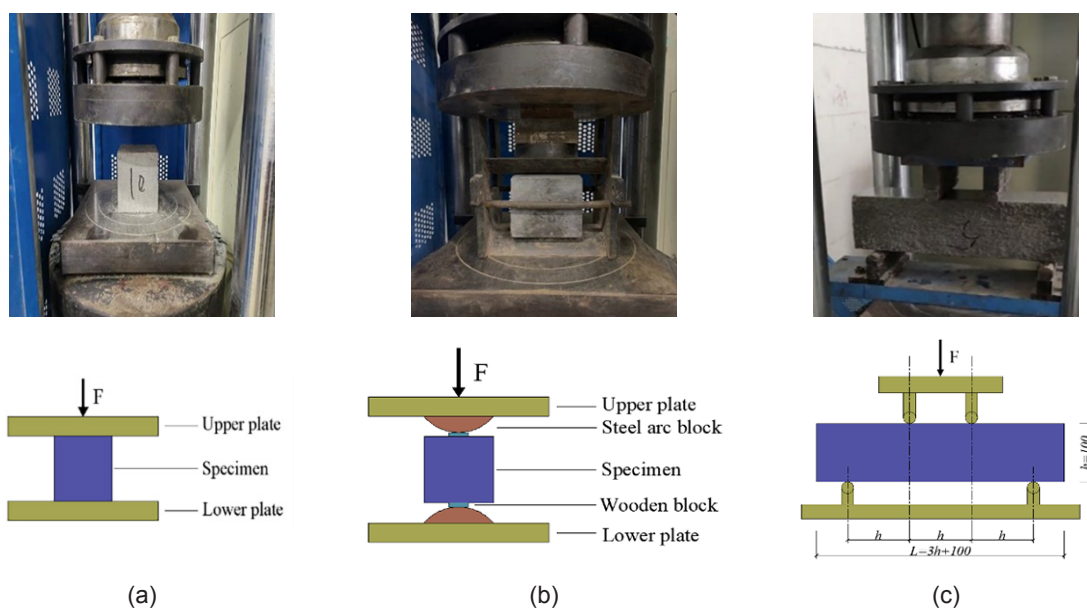
For each concrete mixture, 18 cubes were made to determine the compressive strength and splitting tensile strength of CC at 7, 14 and 28 days, and 9 prismatic specimens were prepared to measure the flexural strength of CC at 7, 14 and 28 days. The test methods of the compression test, splitting tensile test and four-point bending test were based on Chinese National Standard GB/T 50081-2019 (26). Moreover, the test results needed to be multiplied by the size

conversion coefficient of 0.95 or 0.85, because the non-standard specimens were used in this test. The details of the mechanical test are illustrated in Fig. 4.

2.4.2. Freeze and thaw test

For each concrete mixture, 3 prismatic specimens subjected to 0, 25, 50, 75 and 100 freeze-thaw cycles were utilized to research the mass loss rate and RDEM by conducting a rapid freeze-thaw test program, which met the requirement of Chinese National Standard GB/T 50082-2009 (27). Each freeze-thaw cycle lasted for about 4 h with a freezing period of 3 h and a thawing period of one hour chosen. The standard rapid frost machine was employed in this experiment, so the temperature of the frost box ranged from -20°C ± 2°C to +20°C ± 2°C and the central temperature of the specimen ranged from -15°C ± 2°C to +8°C ± 2°C. During the freeze-thaw process, the mass and fundamental frequency of the specimens were tested every 25 freeze-thaw cycles. Moreover, the mass loss rate and RDEM can be obtained using Eqs. (1)-(2), as follows:

$$\Delta W_n = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \cdot 100 \quad (1)$$



Rys. 4. Szczegóły badań właściwości mechanicznych: a) badanie wytrzymałości na ściskanie; b) badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu; c) badanie wytrzymałości na zginanie czteropunktowe.

Fig. 4. The details of mechanical test: a) the compression test; b) the splitting tensile test; c) the four-point bending test.

2.4. Metody badań

2.4.1. Badania właściwości mechanicznych

Dla każdej mieszanki betonowej wykonano 18 próbek sześciennych w celu określenia wytrzymałości CC na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania, a także 9 belek do oznaczenia wytrzymałości CC na zginanie po 7, 14 i 28 dniach. Metody badań wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz zginanie czteropunktowe oparto na chińskiej normie krajowej GB/T 50081-2019 (26). Ponadto uzyskane wyniki badań wymagały przemnożenia przez współczynnik przeliczeniowy równy odpowiednio 0,95 lub 0,85, ponieważ w badaniach zastosowano próbki o niestandardowych wymiarach. Szczegóły badań właściwości mechanicznych przedstawiono na rys. 4.

2.4.2. Badania odporności na zamrażanie i rozmrażanie

Dla każdej mieszanki betonowej wykorzystano po 3 belki poddane 0, 25, 50, 75 oraz 100 cyklom zamrażania i rozmrażania w celu określenia ubytku masy oraz względnego dynamicznego modułu sprężystości [RDEM] w ramach programu szybkiego badania mrozoodporności, zgodnego z wymaganiami chińskiej normy krajowej GB/T 50082-2009 (27). Każdy cykl zamrażania i rozmrażania trwał około 4 h i obejmował 3 h zamrażania oraz 1 h rozmrażania. W badaniach zastosowano standardowe urządzenie do przyspieszonego badania mrozoodporności, dlatego temperatura w komorze chłodniczej zmieniała się w zakresie od $-20\pm 2^\circ\text{C}$ do $+20\pm 2^\circ\text{C}$, natomiast temperatura w środku próbki mieściła się w zakresie od $-15\pm 2^\circ\text{C}$ do $+8\pm 2^\circ\text{C}$. W trakcie procesu zamrażania i rozmrażania co 25 cykli oznaczano masę oraz częstotliwość podstawową próbek. Ponadto ubytek masy oraz względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM] obliczano zgodnie z równaniami (1) oraz (2):

$$\Delta W_n = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$E_{rd}(n) = \frac{f_n^2}{f_0^2} \cdot 100 \quad (2)$$

gdzie:

ΔW_n – ubytek masy próbki betonowej po n cyklach zamrażania i rozmrażania, %,

W_0 – masa próbki betonowej po 0 cyklach zamrażania i rozmrażania, kg,

W_n – masa próbki betonowej po n cyklach zamrażania i rozmrażania, kg,

$E_{rd}(n)$ – względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM] próbki po n cyklach zamrażania i rozmrażania, %,

f_0 – częstotliwość podstawowa próbki po 0 cyklach zamrażania i rozmrażania, Hz,

f_n – częstotliwość podstawowa próbki po n cyklach zamrażania i rozmrażania, Hz.

$$E_{rd}(n) = \frac{f_n^2}{f_0^2} \cdot 100 \quad (2)$$

where:

ΔW_n – the mass loss rate of concrete specimen after n freeze-thaw cycles, %,

W_0 – the mass of concrete specimen after 0 freeze-thaw cycles, kg,

W_n – the mass of concrete specimen after n freeze-thaw cycles, kg,

$E_{rd}(n)$ – RDEM of the specimen after n freeze-thaw cycles, %,

f_0 – the fundamental frequency of the specimen after 0 freeze-thaw cycles, Hz,

f_n – the fundamental frequency of the specimen after n freeze-thaw cycles, Hz.

2.4.3. Microstructure analysis

The freeze-thaw resistance belonging to the macroscopic performance of CC depends on the micro-mechanisms (28). Thus, combined with Thermo Scientific Apreo S SEM, it is necessary to evaluate the microstructure characteristics and investigate the influence of the number of freeze-thaw cycles on the cement paste and interfacial transition zone [ITZ] of CC with different particle sizes of ceramsite. Dry concrete specimens were sampled before the test. The specimens were chopped, and the relatively flat surface of the specimens was selected. Then the sample was soaked in alcohol for 12 h to remove impurities, and then taken out and dried in air for 24 h.

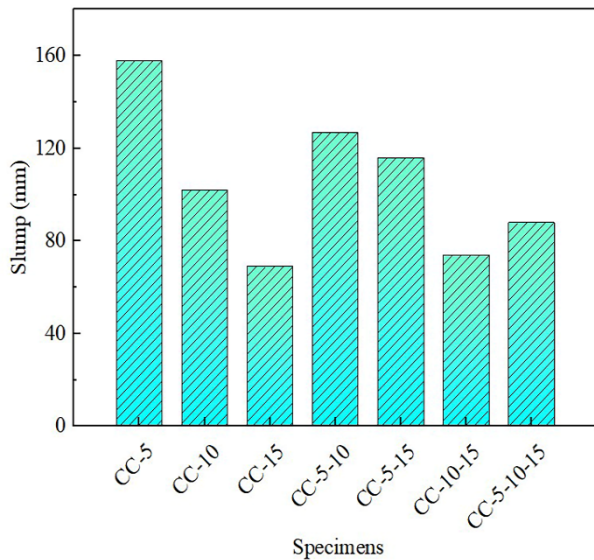
3. Results and discussion

3.1. Workability of CC

The workability characteristics of concrete, which is a significant aspect in evaluating the quality of concrete (29), were measured and shown in Fig. 5. It is clear that the slump of all mixtures was between 60 and 160 mm. The slump of CC-5 reached the maximum value of 158 mm, which exhibited the excellent workability. And the slump of CC-15 and CC-10-15 was relatively low, reaching 69 mm and 74 mm respectively. Meanwhile, it can also be observed that the slump of CC increased with the decrease in the particle size of ceramsite. It was due to the fact that the porosity and water saturation capacity of ceramsite were lower as the particle size decreased (16), which weakened the water absorption capacity of ceramsite from mortar. Therefore, more water was kept in the cementitious material, in which case CC obtained better workability.

3.2. Mechanical properties of CC

The test results of compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of CC at 7, 14 and 28 days, as well as the ratio representing the degree of growth in mechanical strength, are presented in Figs. 6, 7 and 8, respectively. Meanwhile, the ratios are expressed by f_{cudm}/f_{cudn} , f_{tsdm}/f_{tsdn} and f_{fdm}/f_{fdn} , where dm and dn are the different ages.



Rys. 5. Opad stożka badanych mieszanek betonowych.

Fig. 5. The slump of all concrete mixes.

2.4.3. Analiza mikrostruktury

Odporność CC na zamrażanie i rozmrażanie, stanowiąca właściwość makroskopową materiału, zależy od mechanizmów zachodzących w jego mikrostrukturze (28). W związku z tym, z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Thermo Scientific Apreo S SEM, przeprowadzono ocenę cech mikrostrukturalnych oraz analizę wpływu liczby cykli zamrażania i rozmrażania na zaczyn cementowy oraz strefę przejściową kruszywo-zaczyn [ITZ] CC zawierającego popiołoporyt o różnym uziarnieniu.

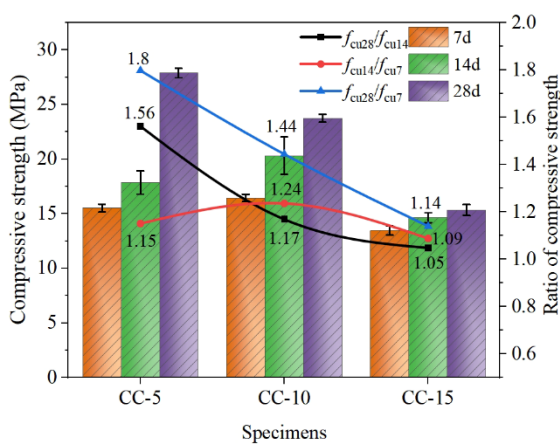
Przed badaniem pobrano próbki wysuszonego betonu. Następnie próbki rozłupywano, wybierając powierzchnie o możliwie największej gładkości. Kolejno próbki zanurzano w alkoholu na 12 h w celu usunięcia zanieczyszczeń, po czym wyjmowano je i suszono na powietrzu przez 24 h.

3.2.1. Compressive strength

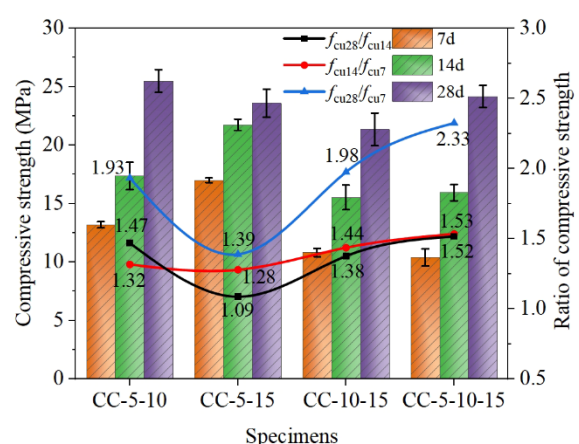
As shown in Fig.6, the compressive strength of CC-5, the aggregate gradation of which exceeds the criteria, at 28 days reached the maximum value of 27.9 MPa among all groups. Although CC-5-15 reached the highest compressive strength in all specimens at 7 and 14 days respectively, the growth rate of compressive strength decreased significantly after 14 days. The compressive strength of CC-15 at 7, 14 and 28 days was relatively low. In addition, the values of f_{cu14}/f_{cu7} of CC containing ceramsite with different particle sizes were higher than that of CC containing ceramsite with single particle size, which demonstrated that the compressive strength of CC increased faster in the early and middle curing stages when the ceramsite with different particle sizes was incorporated.

For CC containing ceramsite with single particle size, it is obvious that the compressive strength of CC at 28 days decreased with the increase in particle size. Moreover, CC-5 exhibited the highest whole growth rate of compressive strength. This phenomenon could be explained by the fact that the smaller the particle size, the larger the bulk density, which led to the decrease in ceramsite volume fraction in CC according to the design that the mass of coarse aggregate in all mixtures was kept constant. Therefore, the volume fraction of cementitious material increased, in which case the compressive strength of CC was improved (30). In addition, the decrease in particle size of ceramsite could obtain higher elastic modulus and suppress the micro-cracks in CC, which enhanced the compressive strength (31). Apart from the above-mentioned aspects, the compressive strength of CC was also affected by the cylinder compressive strength of coarse aggregate (32, 33). In this test, it could be observed that the ceramsite with smaller particle size possessed higher cylinder compressive strength, which increased the compressive strength of CC.

For CC containing ceramsite with different particle sizes, with the decrease in average particle size, the compressive strength of CC at 28 days exhibited an increasing trend. Moreover, the growth rate of compressive strength of CC-5-10, CC-10-15 and CC-5-10-15 showed a relatively high and stable level, except for CC-5-15. And



(a) CC containing ceramsite with single particle size



(b) CC containing ceramsite with different particle sizes

Rys. 6. Wartości bezwzględne i względne wytrzymałości na ściskanie popiołoporytobetonów.

Fig. 6. The value and ratio of compressive strength of CC.

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Urabialność CC

Właściwości robocze mieszanki betonowej, stanowiące istotny aspekt oceny jakości betonu (29), zostały oznaczone i przedstawione na rys. 5. Można zauważyć, że opad stożka dla wszystkich mieszanek mieścił się w zakresie od 60 do 160 mm. Największą wartość opadu stożka, wynoszącą 158 mm, uzyskano dla mieszanki CC-5, co świadczyło o bardzo dobrej urabialności. Natomiast dla mieszanek CC-15 oraz CC-10-15 odnotowano stosunkowo niskie wartości opadu stożka, wynoszące odpowiednio 69 mm i 74 mm. Jednocześnie można zaobserwować, że opad stożka CC wzrastał wraz ze zmniejszaniem uziarnienia popiołoporytu. Wynikało to z faktu, że wraz ze zmniejszeniem wielkości ziaren popiołoporytu malały jego porowatość oraz zdolność do nasycania wodą (16), co ograniczało absorpcję wody z zaprawy przez kruszywo. W konsekwencji większa ilość wody pozostawała w materiale wiążącym, dzięki czemu CC wykazywał lepszą urabialność.

3.2. Właściwości mechaniczne CC

Wyniki badań wytrzymałości CC na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz zginanie po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania, a także wskaźniki określające stopień przyrostu wytrzymałości mechanicznej, przedstawiono odpowiednio na rys. 6, 7 i 8. Wskaźniki te wyrażono zależnościami f_{cudm}/f_{cudn} , f_{isdm}/f_{isdn} oraz f_{fdm}/f_{fdn} , gdzie dm i dn oznaczają różne okresy dojrzewania.

3.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

Jak przedstawiono na rys. 6, mieszanka CC-5, której uziarnienie kruszywa przekracza wymagania normowe, osiągnęła po 28 dniach największą wytrzymałość na ściskanie spośród wszystkich badanych grup, wynoszącą 27,9 MPa. Chociaż mieszanka CC-5-15 uzyskała najwyższą wytrzymałość na ściskanie spośród wszystkich próbek odpowiednio po 7 i 14 dniach dojrzewania, to po 14 dniach zaobserwowano wyraźne zmniejszenie tempa przyrostu jej wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie mieszanki CC-15 po 7, 14 i 28 dniach była stosunkowo niska. Ponadto wartości wskaźnika f_{cu14}/f_{cu7} dla CC zawierającego popiołoporyt o różnych zakresach uziarnienia były wyższe niż w przypadku CC zawierającego popiołoporyt jednej frakcji. Wskazuje to, że zastosowanie popiołoporytu o zróżnicowanym uziarnieniu powodowało szybszy wzrost wytrzymałości na ściskanie CC we wczesnym i pośrednim okresie dojrzewania.

W przypadku CC zawierającego popiołoporyt jednej frakcji wyraźnie stwierdzono, że 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie malała wraz ze wzrostem wielkości ziaren. Ponadto mieszanka CC-5 wykazywała najwyższe całkowite tempo przyrostu wytrzymałości na ściskanie. Zjawisko to można wyjaśnić faktem, że im mniejsze było uziarnienie, tym większa była gęstość nasypowa kruszywa, co — przy założeniu stałej masy kruszywa grubego we wszystkich mieszankach — prowadziło do zmniejszenia udziału objętościowego popiołoporytu w CC. W konsekwencji wzrastał

the whole growth rate of CC-5-10-15 reached the maximum value of 132 %. Therefore, the compressive strength of CC containing ceramsite with different particle sizes in the early curing stage and the later curing stage was quite different. The reason was that compared with CC-5, CC-10 and CC-15, the average particle size of CC containing ceramsite with different particle sizes always ranged from 5 mm to 16 mm. It should be noted that CC with relatively continuous grading possessed great bonding effect (34), which increased the friction between ceramsite and cement paste, and then enhanced the growth rate of compressive strength of CC. In addition to that, compared with CC-15, the compressive strength of CC-10-15 and CC-5-15 increased by 39 % and 54 % respectively. The results demonstrated that ceramsite with larger particle size was partially replaced by the ceramsite with smaller particle size, which caused the improvement of compressive strength of CC.

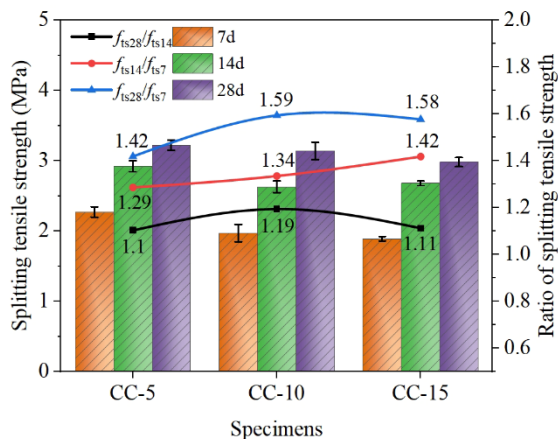
3.2.2. Splitting tensile strength

Fig. 7 exhibits the effect of particle size on the splitting tensile strength of CC. As shown, with the decrease in particle size (or average particle size), the splitting tensile strength of CC at 28 days increased slightly. The reason for this increase is the higher strength of ceramsite with smaller particle size, which led to the fact that the splitting cracks would bypass more coarse aggregates having smaller particle size and the crack propagation paths were more complex (35, 36). This phenomenon could also be explained from another perspective. During the expanding process of splitting cracks, it was difficult for cracks to bypass the ceramsite with large particle size for their characteristics of brittleness and relatively low strength. After the aggregates were broken, voids would be generated inside the concrete. These voids not only no longer bore the tension, but also increased the inhomogeneity of tensile plane and reduced the stress section of the specimen (37), which led to the stress concentration in the concrete and rapid propagation of cracks. Therefore, CC with larger particle size of ceramsite possessed the lower splitting tensile strength.

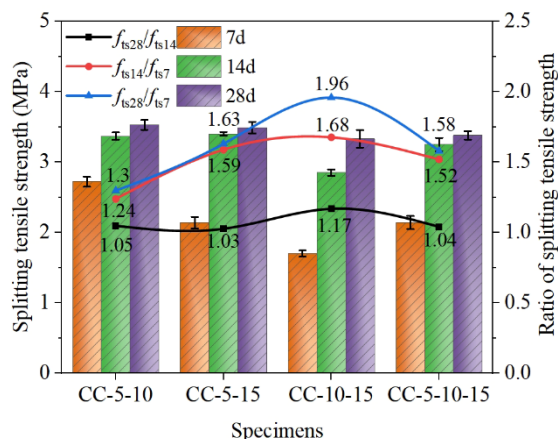
In addition, Fig. 7 shows that the splitting tensile strength of CC-5-10, which meets the requirement of gradation of coarse aggregate, at 28 days reached the maximum value of 3.5 MPa among all groups. And its splitting tensile strength was also relatively high in the early and middle curing stages. However, CC-15 displayed the relatively low strength at 7, 14 and 28 days, which showed the same law as that in the compression test. Therefore, it had a negative effect on the strength of concrete when the particle size of ceramsite was too large. In addition, the growth rate of splitting tensile strength of CC in the early and middle curing stages was higher than that in the later curing stage, which showed the fact that the splitting tensile strength of CC would quickly approach its own maximum value.

3.2.3. Flexural strength

The effect of particle size on the flexural strength of CC is displayed in Fig. 8. It was found that the flexural strength of CC at 28 days increased when the particle size or average particle size



(a) CC containing ceramsite with single particle size



(b) CC containing ceramsite with different particle sizes

Rys. 7. Wartości bezwzględne i względne wytrzymałości na zginanie popiołoporytobetonów.

Fig. 7. The value and ratio of splitting tensile strength of CC.

udział objętościowy materiału wiążącego, co sprzyjało zwiększeniu wytrzymałości na ściskanie CC (30).

Dodatkowo zmniejszenie wielkości ziaren popiołoporytu prowadziło do uzyskania wyższego modułu sprężystości oraz ograniczenia rozwoju mikrorys w CC, co również wpływało korzystnie na wytrzymałość na ściskanie (31). Oprócz wymienionych czynników wytrzymałość na ściskanie CC zależała także od wytrzymałości kruszywa grubego na ściskanie w cylindrze (32, 33). W niniejszych badaniach zaobserwowano, że popiołoporyt o mniejszym uziarnieniu charakteryzował się większą wytrzymałością na ściskanie w cylindrze, co przyczyniało się do zwiększenia wytrzymałości na ściskanie CC.

W przypadku CC zawierającego popiołoporyt o różnych zakresach uziarnienia stwierdzono, że wraz ze zmniejszaniem średniej wielkości ziaren 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie wykazywała tendencję wzrostową. Ponadto tempo przyrostu wytrzymałości na ściskanie mieszanek CC-5-10, CC-10-15 oraz CC-5-10-15 utrzymywało się na stosunkowo wysokim i stabilnym poziomie, z wyjątkiem mieszanki CC-5-15. Największą całkowitą wartość przyrostu wytrzymałości osiągnęła mieszanka CC-5-10-15, dla

decreased. This phenomenon could be explained by the strength of coarse aggregate, which was similar to the effect on splitting tensile strength.

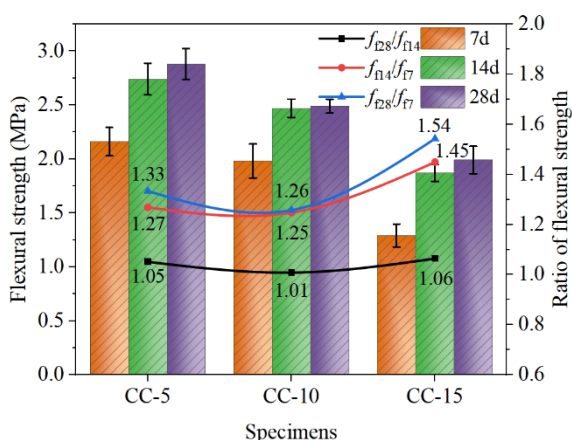
In addition, CC-5, whose aggregate gradation exceeds the criteria, showed the highest flexural strength in all specimens at 7, 14 and 28 days respectively. And the flexural strength of CC-10-15 at 28 days was the lowest, which reflected that the ceramsite with large particle size could cause poor flexural strength. However, there was no significant increase in flexural strength in each group during the whole curing process, compared to compressive strength and splitting tensile strength.

3.3. Freeze-thaw resistance of CC

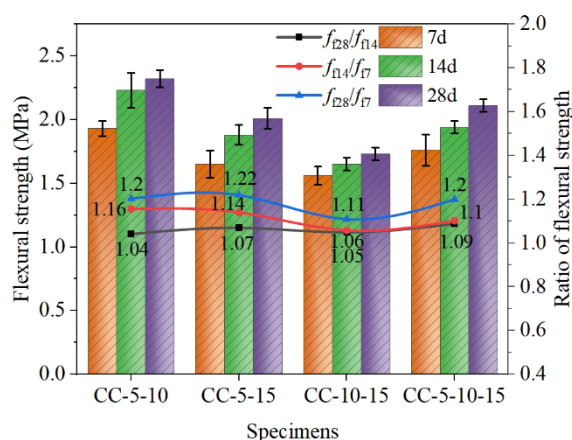
The mass loss rate, RDEM and the loss rate of dynamic elastic modulus which can be obtained using Eq. (3) under different numbers of freeze-thaw cycles are illustrated in Table 4.

$$\Delta E_d(n) = \frac{E_d(0) - E_d(n)}{E_d(0)} \cdot 100 = [1 - E_{rd}(n)] \cdot 100 \quad (3)$$

where:



(a) CC containing ceramsite with single particle size



(b) CC containing ceramsite with different particle sizes

Rys. 8. Wartości oraz wskaźniki wytrzymałości CC na zginanie.

Fig. 8. The value and ratio of flexural strength of CC.

której wyniosła ona 132%. Oznacza to, że wytrzymałość na ściskanie CC zawierającego popiołoporyt o zróżnicowanym uziarnieniu istotnie różniła się pomiędzy wczesnym a późniejszym okresem dojrzewania. Przyczyną tego zjawiska było to, że w przeciwieństwie do mieszanek CC-5, CC-10 i CC-15 średnia wielkość ziaren w CC zawierającym popiołoporyt o różnych zakresach uziarnienia mieściła się zawsze w przedziale od 5 mm do 16 mm. Należy podkreślić, że CC o bardziej ciągłym uziarnieniu charakteryzował się lepszym efektem związania składników (34), co zwiększało tarcie pomiędzy popiołoporytem a zaczynem cementowym, a tym samym sprzyjało wzrostowi wytrzymałości na ściskanie CC. Ponadto, w porównaniu z mieszanką CC-15, wytrzymałość na ściskanie mieszanek CC-10-15 oraz CC-5-15 wzrosła odpowiednio o 39% i 54%. Wyniki te wskazują, że częściowe zastąpienie popiołoporytu o większym uziarnieniu popiołoporytem o mniejszym uziarnieniu prowadziło do poprawy wytrzymałości na ściskanie CC.

3.2.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Na rys. 7 przedstawiono wpływ uziarnienia na wytrzymałość CC na rozciąganie przy rozłupywaniu. Jak pokazano, wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren [lub średniej wielkości ziaren] 28-dniowa wytrzymałość CC na rozciąganie przy rozłupywaniu nieznacznie wzrastała. Przyczyną tego wzrostu była większa wytrzymałość popiołoporytu o mniejszym uziarnieniu, co powodowało, że rysy rozłupujące omijały większą liczbę ziaren kruszywa grubego o małych wymiarach, a ścieżki propagacji pęknięć stawały się bardziej złożone (35, 36).

Zjawisko to można również wyjaśnić z innej perspektywy. Podczas rozwoju rys rozłupujących pęknięciom trudno było omijać popiołoporyt o większym uziarnieniu ze względu na jego kruchość oraz stosunkowo niską wytrzymałość. Po zniszczeniu ziaren kruszywa wewnątrz betonu powstawały pustki. Pustki te nie tylko przestawały przenosić naprężenia rozciągające, lecz również zwiększały niejednorodność płaszczyzny rozciąganej oraz zmniejszały efektywny przekrój przenoszący naprężenia w próbce (37). Prowadziło to do koncentracji naprężeń w betonie oraz szybkiej propagacji rys. W rezultacie CC zawierający popiołoporyt o większym uziarnieniu charakteryzował się niższą wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Ponadto z rys. 7 wynika, że mieszanka CC-5-10, spełniająca wymagania dotyczące uziarnienia kruszywa grubego, osiągnęła po 28 dniach największą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu spośród wszystkich

$\Delta E_d(n)$ – the loss rate of dynamic elastic modulus of CC after n freeze-thaw cycles, %,

$E_d(0)$ – the dynamic elastic modulus of CC after 0 freeze-thaw cycles, MPa,

$E_d(n)$ – the dynamic elastic modulus of CC after n freeze-thaw cycles, MPa.

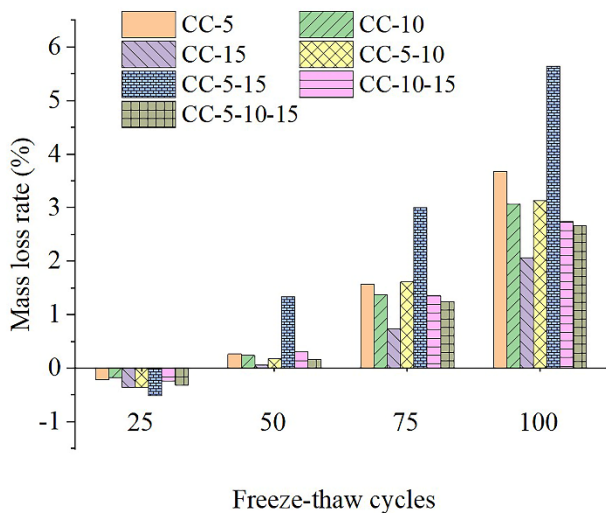
3.3.1. Mass loss rate

The mass loss rate shown in Fig. 9 is one of the leading indices for the evaluation of the freeze-thaw resistance of CC (38). It was obvious that the mass first increased, leading to a negative mass loss rate at the beginning of freeze-thaw cycles. It was attributed to the strong water absorption capacity of ceramsite due to its porosity (39). In addition to that, when the pore water froze, the expansion pressure caused by the volume expansion resulted in the generation of micro-cracks, and even the development of new pores, which led to a further increase in porosity (40). Therefore, this phenomenon strengthened the ability to absorb water molecules into the concrete, increasing the mass. With an increase in the number of freeze-thaw cycles, the mass loss rate displayed an increasing trend. Because relatively high hydrostatic pressure and freezing speed, as well as the propagation of micro-cracks, could cause more serious spalling of mortar on the surface of CC (41). Thus, the weight of the peeling on the surface of CC was more than that of increased water, in which case the overall mass decreased. For instance, the apparent morphology observation of mixture CC-5-10-15 illustrated in Fig. 10 can reflect the above-mentioned

Tablica 4 / Table 4

WZGLĘDNE WSKAŹNIKI MROZODPORNOŚCI POPIOŁOPORYTOBETONÓW, %.
RELATIVE INDICES OF FREEZE-THAW DAMAGE OF CC, %.

Oznaczenie / Code	Wskaźnik / Test project	0	25	50	75	100
CC-5	ΔW_n	0.00	-0.21	0.27	1.57	3.68
	$E_{rd}(n)$	100.0	97.0	89.4	80.2	62.8
	$\Delta E_d(n)$	0.0	3.0	10.6	19.8	37.2
CC-10	ΔW_n	0.00	-0.17	0.24	1.38	3.07
	$E_{rd}(n)$	100.0	97.5	92.8	87.2	75.8
	$\Delta E_d(n)$	0.0	2.5	7.2	12.8	24.2
CC-15	ΔW_n	0.00	-0.35	0.06	0.74	2.07
	$E_{rd}(n)$	100.0	96.5	93.8	83.3	71.9
	$\Delta E_d(n)$	0.0	3.5	6.2	16.7	28.1
CC-5-10	ΔW_n	0.00	-0.36	0.18	1.62	3.14
	$E_{rd}(n)$	100.0	97.2	92.1	85.8	74.3
	$\Delta E_d(n)$	0.0	2.8	7.9	14.2	25.7
CC-5-15	ΔW_n	0.00	-0.51	1.34	3.01	5.64
	$E_{rd}(n)$	100.0	96.3	87.9	81.4	64.2
	$\Delta E_d(n)$	0.0	3.7	12.1	18.6	35.8
CC-10-15	ΔW_n	0.00	-0.24	0.31	1.36	2.74
	$E_{rd}(n)$	100.0	98.4	95.2	88.5	79.3
	$\Delta E_d(n)$	0.0	1.6	4.8	11.5	20.7
CC-5-10-15	ΔW_n	0.00	-0.31	0.17	1.25	2.67
	$E_{rd}(n)$	100.0	98.2	94.5	89.8	76.2
	$\Delta E_d(n)$	0.0	1.8	5.5	10.2	23.8



Rys. 9. Wpływ uziarnienia popiołoporytu na ubytek masy.

Fig. 9. The effect of particle size of ceramsite on mass loss rate.

badanych grup, wynoszącą 3,5 MPa. Jej wytrzymałość była również stosunkowo wysoka we wczesnym i pośrednim okresie dojrzewania. Natomiast mieszanka CC-15 wykazywała relatywnie niską wytrzymałość po 7, 14 i 28 dniach, co odpowiadało zależnościom zaobserwowanym w badaniach wytrzymałości na ściskanie. Oznacza to, że zbyt duże uziarnienie popiołoporytu wpływało niekorzystnie na wytrzymałość betonu. Dodatkowo tempo przyrostu wytrzymałości CC na rozciąganie przy rozłupywaniu we wczesnym i pośrednim okresie dojrzewania było większe niż w późniejszym okresie dojrzewania, co wskazuje, że wytrzymałość CC na rozciąganie przy rozłupywaniu stosunkowo szybko osiągała wartość zbliżoną do maksymalnej.

3.2.3. Wytrzymałość na zginanie

Wpływ uziarnienia na wytrzymałość CC na zginanie przedstawiono na rys. 8. Stwierdzono, że 28-dniowa wytrzymałość CC na zginanie wzrastała wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren [lub średniej wielkości ziaren]. Zjawisko to można wyjaśnić wytrzymałością kruszywa grubego, analogicznie do zależności obserwowanych w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Ponadto mieszanka CC-5, której uziarnienie kruszywa nie spełnia wymagań normowych, wykazywała najwyższą wytrzymałość na zginanie spośród wszystkich badanych próbek odpowiednio po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Natomiast mieszanka CC-10-15

aspect. Compared with the specimen before freeze-thaw cycle, the surface of the specimen after 25 freeze-thaw cycles had little change. After that, the increase in freeze-thaw cycles caused the mortar on the surface to peel off more and more seriously and some aggregates to leak out.

Moreover, the mass loss rate of CC-15 after 100 freeze-thaw cycles which was the lowest was only 2.1 %, whereas that of CC-5 was 3.7 %. Meanwhile, the mass loss rate of CC-10-15 and CC-5-10-15, which were 2.7 %, were also relatively low. This phenomenon could be attributed to the hydration products and pore structure. The ceramsite was porous lightweight aggregate and the porosity was higher with the increase in the particle size of ceramsite, in which case its water saturation capacity became stronger (16). It should be noted that the water stored in the ceramsite with larger particle size could be released to the cement paste more dramatically during the hydration process of the specimen (42), resulting in the stronger continuous release effect. Thus, the degree of hydration reaction of CC containing more ceramsite with large particle size was further promoted and the microstructural compactness of concrete was also improved. Therefore, the freeze-thaw resistance of CC with larger particle size of ceramsite was better. Furthermore, the mass loss rate of CC-5-15 was the highest due to the fact that the particle size of coarse aggregate was significantly different which led to a poor compactness of concrete (17).

In addition, the regression relationship between the mass loss rate and the number of freeze-thaw cycles is derived by using Eq. (4) and shown in Fig. 11. Furthermore, "TP" and "FC" displayed in Fig. 11 represent the test points and fitting curve, respectively.

$$\Delta W_n = C_1 n^2 + C_2 n + C_3 \quad (4)$$

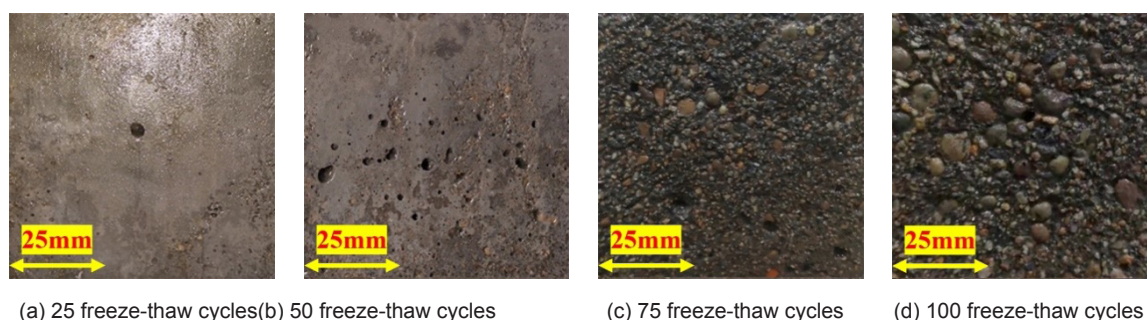
where:

C_1 , C_2 and C_3 – the correlation coefficients,
 n – the number of freeze-thaw cycles.

Meanwhile, the fitting curves exhibited an excellent correlation because R^2 of each fitting curve was more than 0.97, in which case the accuracy of predicted results of mass loss rate after n freeze-thaw cycles could be guaranteed.

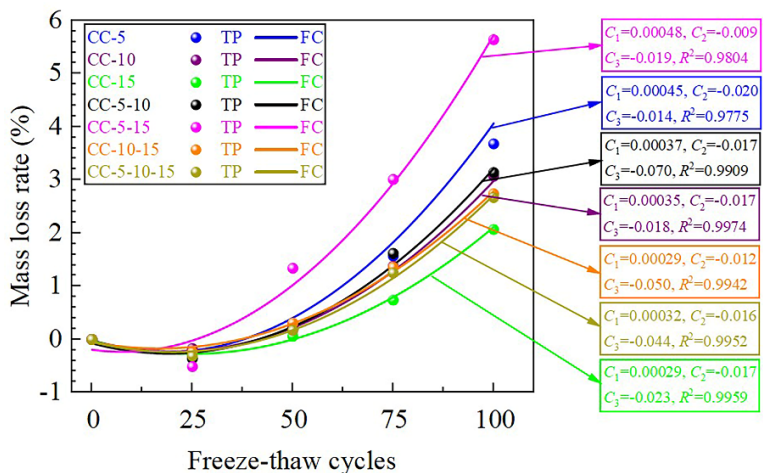
3.3.2. RDEM

The RDEM, which is another key index to estimate the freeze-thaw resistance and indirectly embody the degree of internal compact-



Rys. 10. Obserwacja makroskopowej morfologii mieszanki CC-5-10-15 po różnej liczbie cykli zamrażania i rozmrażania.

Fig. 10. Apparent morphology observation of mixture CC-5-10-15 after different freeze-thaw cycles.



Rys. 11. Zależność pomiędzy ubytkiem masy a liczbą cykli zamrażania i rozmrażania.

Fig. 11. Relation between the mass loss rate and the number of freeze-thaw cycles.

osiągnęła najniższą 28-dniową wytrzymałość na zginanie, co wskazuje, że popiołoporyt o dużym uziarnieniu może niekorzystnie wpływać na wytrzymałość betonu na zginanie.

Jednocześnie, w porównaniu z wytrzymałością na ścisnienie oraz wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu, w trakcie całego okresu dojrzewania nie zaobserwowano wyraźnego wzrostu wytrzymałości na zginanie w żadnej z badanych grup.

3.3. Odporność CC na zamrażanie i rozmrażanie

Ubytek masy, względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM] oraz spadek dynamicznego modułu sprężystości, który można obliczyć zgodnie z równaniem (3), dla różnych liczb cykli zamrażania i rozmrażania przedstawiono w tabelicy 4.

$$\Delta E_d(n) = \frac{E_d(0) - E_d(n)}{E_d(0)} \cdot 100 = [1 - E_{rd}(n)] \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

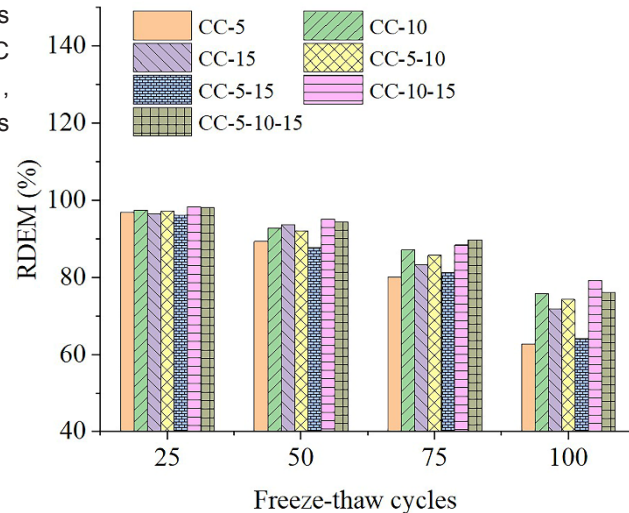
$\Delta E_d(n)$ – spadek dynamicznego modułu sprężystości CC po n cyklach zamrażania i rozmrażania, %,

$E_d(0)$ – dynamiczny moduł sprężystości CC po 0 cyklach zamrażania i rozmrażania, MPa,

$E_d(n)$ – dynamiczny moduł sprężystości CC po n cyklach zamrażania i rozmrażania, MPa.

3.3.1. Ubytek masy

Ubytek masy przedstawiony na rys. 9 stanowi jeden z podstawowych wskaźników oceny odporności CC na zamrażanie i rozmrażanie (38). Zaobserwowano, że na początku cykli zamrażania i rozmrażania masa próbek początkowo wzrastała, co prowadziło do uzyskania ujemnych wartości ubytku masy. Zjawisko to wynikało z dużej zdolności popiołoporytu do absorpcji wody, związanej z jego porowatą mikrostrukturą (39). Ponad-



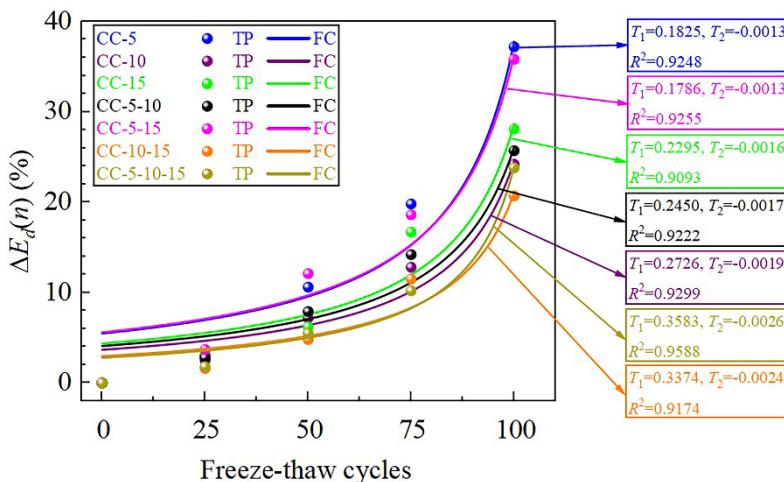
Rys. 12. Wpływ uziarnienia popiołoporytu na względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM].

Fig. 12. The effect of particle size of ceramsite on RDEM.

shown in Fig. 12. It was clear that the RDEM was on a steady downtrend with the increase in freeze-thaw cycles. Moreover, the effect of particle size of ceramsite on the RDEM was also significant. After 100 freeze-thaw cycles, the RDEM of CC-5 which was the lowest was 62.8 %, whereas that of CC-10-15 was 79.3 %. The main reason for this result was similar to that for the effect of particle size of ceramsite on the mass loss rate clarified above. And the CC with larger particle size of ceramsite possessed higher compactness and the microstructure was also strengthened to a certain extent.

Furthermore, the regression relationship between the loss rate of dynamic elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles, which is based on the RDEM, is derived by using Eq. (5) and shown in Fig. 13.

$$\Delta E_d(n) = 1/(T_1 + nT_2) \quad (5)$$



Rys. 13. Zależność pomiędzy spadkiem względnego dynamicznego modułu sprężystości a liczbą cykli zamrażania i rozmrażania.

Fig. 13. Relation between the loss rate of dynamic elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles.

to podczas zamrażania wody znajdującej się w porach ciśnienie ekspansji wywołane zwiększeniem objętości lodu prowadziło do powstawania mikrorys, a nawet rozwoju nowych porów, co powodowało dalszy wzrost porowatości materiału (40). W konsekwencji zjawisko to zwiększało zdolność betonu do absorpcji cząstek wody, powodując wzrost jego masy. Wraz ze wzrostem liczby cykli zamrażania i rozmrażania ubytek masy wykazywał tendencję rosnącą. Wynikało to z faktu, że stosunkowo wysokie ciśnienie hydrostatyczne i szybkość zamrażania, a także propagacja mikrorys prowadziły do coraz intensywniejszego złączania zaprawy z powierzchni CC (41). W rezultacie masa materiału odspojonego z powierzchni CC była większa niż przyrost masy związany z absorpcją wody, co powodowało ogólny spadek masy próbek. Przykładowo obserwacja makroskopowej morfologii mieszanki CC-5-10-15 przedstawiona na rys. 10 potwierdza powyższe zjawiska. W porównaniu z próbką przed rozpoczęciem cykli zamrażania i rozmrażania powierzchnia próbki po 25 cyklach uległa jedynie niewielkim zmianom. Następnie, wraz ze wzrostem liczby cykli, obserwowano coraz intensywniejsze złączanie zaprawy z powierzchni oraz odsłanianie części ziaren kruszywa.

Ponadto ubytek masy mieszanki CC-15 po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania był najniższy i wynosił jedynie 2,1%, podczas gdy dla mieszanki CC-5 osiągnął wartość 3,7%. Jednocześnie stosunkowo niskie wartości ubytku masy uzyskano również dla mieszanek CC-10-15 oraz CC-5-10-15, wynoszące odpowiednio 2,7%. Zjawisko to można wyjaśnić wpływem produktów hydratacji oraz struktury porów.

where:

T_1 and T_2 – the correlation coefficients,

n – the number of freeze-thaw cycles,

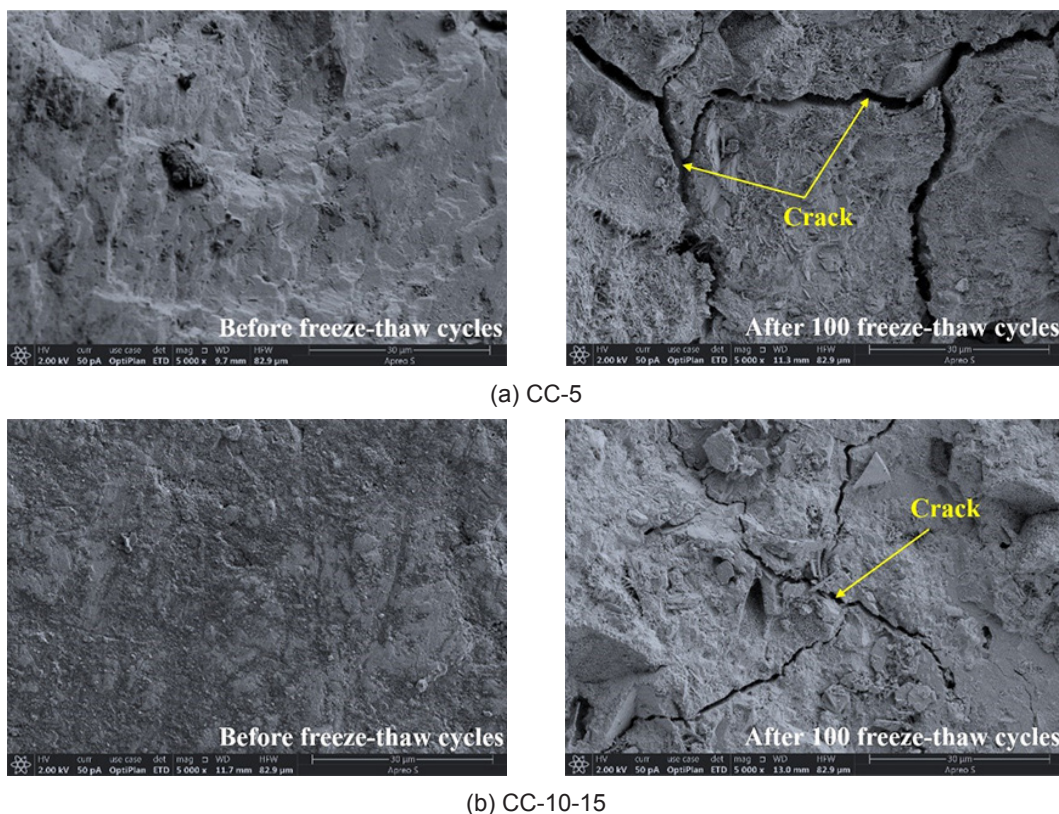
$\Delta E_d(n)$ – the loss rate of dynamic elastic modulus after n freeze-thaw cycles, %.

At the same time, the fact that R^2 of fitting curves ranged from 0.91 to 0.96. Thus, the predicted results of the loss rate of dynamic elastic modulus after n freeze-thaw cycles were relatively reliable.

4. Microstructure

According to the Section 3.3, the gap of freeze-thaw resistance between CC-5 and CC-10-15 was relatively high. Therefore, in order to obtain a comprehensive understanding of the effect of particle size on freeze-thaw resistance, it is necessary to compare the change of cement paste and ITZ of CC-5 with that of CC-10-15 after different freeze-thaw cycles.

The SEM images of cement paste of CC-5 and CC-10-15 after 0 and 100 freeze-thaw cycles are shown in Fig. 14. By comparing the Fig. 14a and b, it could be found that few micro-cracks existed in the cement paste of CC-5 and CC-10-15 before freeze-thaw cycles. After 100 freeze-thaw cycles, they both showed long and penetrating cracks in the cement paste. However, the cracks of CC-5 were wider than that of CC-10-15, resulting in a looser microstructure of the former. Thus, this is also one of the reasons



Rys. 14. Obrazy mikrostruktury zaczynu cementowego.

Fig. 14. SEM images of cement paste.

Popiołoporyt stanowi porowate kruszywo lekkie, a jego porowatość wzrasta wraz ze zwiększaniem wielkości ziaren, co powoduje zwiększenie zdolności do nasycania wodą (16). Należy podkreślić, że woda zgromadzona w popiołoporycie o większym uziarnieniu może być intensywniej uwalniana do zaczynu cementowego podczas procesu hydratacji próbki (42), prowadząc do silniejszego efektu ciągłego oddawania wody. W rezultacie stopień hydratacji CC zawierającego większy udział popiołoporytu o dużym uziarnieniu ulegał dalszemu zwiększeniu, a zwartość mikrostruktury betonu poprawiała się. Dlatego CC zawierający popiołoporyt o większym uziarnieniu wykazywał lepszą odporność na zamrażanie i rozmrażanie.

Ponadto mieszanka CC-5-15 charakteryzowała się największym ubytkiem masy, co wynikało z dużych różnic w wielkości ziaren kruszywa grubego, prowadzących do pogorszenia szczelności struktury betonu (17).

Dodatkowo zależność regresyjną pomiędzy ubytkiem masy a liczbą cykli zamrażania i rozmrażania wyznaczono za pomocą równania (4) i przedstawiono na rys. 11. Oznaczenia „TP” oraz „FC” przedstawione na rys. 11 odnoszą się odpowiednio do punktów pomiarowych oraz krzywej aproksymacyjnej.

$$\Delta W_n = C_1 n^2 + C_2 n + C_3 \quad (4)$$

gdzie:

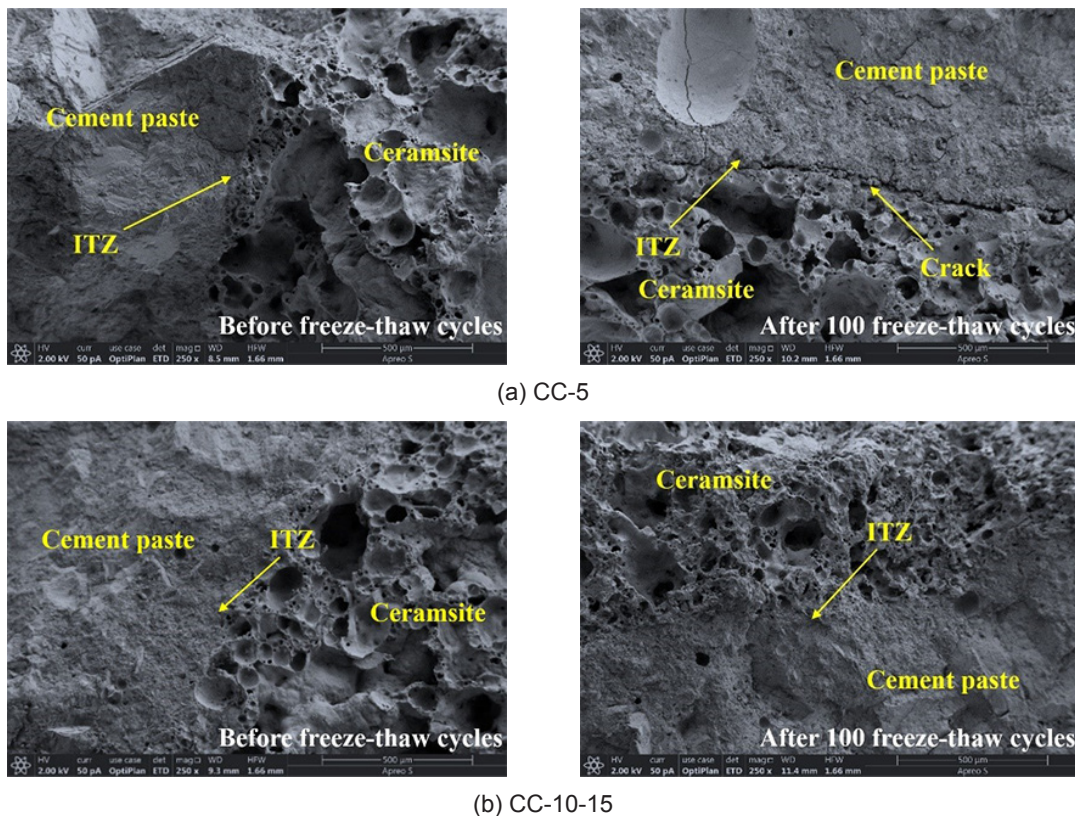
C_1 , C_2 i C_3 – współczynniki regresji,

n – liczba cykli zamrażania i rozmrażania.

why the freeze-thaw resistance of CC-5 is weaker than that of CC-10-15 after 100 freeze-thaw cycles.

The SEM images of ITZ of CC-5 and CC-10-15 after 0 and 100 freeze-thaw cycles have been depicted in Fig. 15. It could be noticed that the microstructures of ITZ of CC-5 and CC-10-15 before freeze-thaw cycles were similar, and few cracks occurred in ITZ, exhibiting the excellent compactness. After 100 freeze-thaw cycles, there was no significant change in ITZ for CC-10-15, indicating that the dense microstructure of ITZ of CC-10-15 was almost unaffected by the rapid change of temperature under freeze-thaw cycles. Nevertheless, for CC-5, the long and throughout cracks appeared in ITZ. Therefore, the microstructural properties of ITZ of CC-10-15 were better than that of CC-5. Furthermore, the above-mentioned aspect can be used to explain the difference of freeze-thaw resistance.

The generation of cracks in ITZ can be analyzed deeply based on the hydrostatic pressure theory proposed by Powers (44). The porous ceramsite can contain a considerable amount of liquid (45). Thus, at the beginning of the freeze-thaw cycles, the pressure caused by water migration, which is mainly concentrated inside the ceramsite, is low in ITZ. As the number of freeze-thaw cycles increases, the water saturation degree of ceramsite becomes higher. At this time, the liquid in ceramsite gradually migrates to the interface between ceramsite and cement past, generating high pressure in ITZ and causing cracks.



Rys. 15. Obrazy mikrostruktury strefy kontaktowej zaczynu-kruszywo.

Fig. 15. SEM images of ITZ.

Jednocześnie krzywe aproksymacyjne wykazywały bardzo wysoką zgodność z wynikami badań, ponieważ współczynnik determinacji R^2 dla każdej z nich przekraczał 0,97, co zapewniało wysoką dokładność prognozowania ubytku masy po n cyklach zamrażania i rozmrażania.

3.3.2. Względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM]

Względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM], stanowiący kolejny istotny wskaźnik oceny odporności CC na zamrażanie i rozmrażanie oraz pośrednio odzwierciedlający stopień szczelności jego mikrostruktury (43), przedstawiono na rys. 12. Wyraźnie zaobserwowano, że wraz ze wzrostem liczby cykli zamrażania i rozmrażania wartości RDEM systematycznie malały. Ponadto wpływ uziarnienia popiołoporytu na RDEM był również istotny. Po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania najniższą wartość RDEM uzyskano dla mieszanki CC-5 i wynosiła ona 62,8%, natomiast dla mieszanki CC-10-15 wartość ta osiągnęła 79,3%. Główna przyczyna tego zjawiska była analogiczna do mechanizmu wpływu uziarnienia popiołoporytu na ubytek masy, omówionego wcześniej. CC zawierający popiołoporyt o większym uziarnieniu charakteryzował się większą szczelnością, a jego mikrostruktura była również w pewnym stopniu bardziej wzmocniona.

Ponadto zależność regresyjną pomiędzy spadkiem dynamicznego modułu sprężystości a liczbą cykli zamrażania i rozmrażania, wyznaczoną na podstawie wartości RDEM, obliczono za pomocą równania (5) i przedstawiono na rys. 13.

$$\Delta E_d(n) = 1/(T_1 + nT_2) \quad (5)$$

gdzie:

T_1 i T_2 – współczynniki regresji,

n – liczba cykli zamrażania i rozmrażania,

$\Delta E_d(n)$ – spadek dynamicznego modułu sprężystości po n cyklach zamrażania i rozmrażania, %.

Jednocześnie współczynnik determinacji R^2 dla krzywych aproksymacyjnych mieścił się w zakresie od 0,91 do 0,96. Oznacza to, że prognozowane wartości spadku dynamicznego modułu sprężystości po n cyklach zamrażania i rozmrażania były stosunkowo wiarygodne.

4. Mikrostruktura

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w punkcie 3.3 różnice w odporności na zamrażanie i rozmrażanie pomiędzy mieszankami CC-5 i CC-10-15 były stosunkowo duże. W związku z tym, w celu uzyskania pełniejszego zrozumienia wpływu uziarnienia na odporność na zamrażanie i rozmrażanie, konieczne było porównanie zmian zachodzących w zaczynie cementowym oraz strefie przejściowej międzyfazowej [ITZ] mieszanek CC-5 i CC-10-15 po różnej liczbie cykli zamrażania i rozmrażania.

Obrazy SEM zaczynu cementowego mieszanek CC-5 i CC-10-15 po 0 oraz 100 cyklach zamrażania i rozmrażania przedstawiono na

5. Conclusions

Based on the test results and investigation, the following conclusions can be drawn.

1. The compressive strength of CC at 28 days exhibited an increasing trend with the decrease in the particle size (or average particle size), owing to the higher bulk density and cylinder compressive strength of ceramsite. And the compressive strength of CC-5 at 28 days reached the maximum value of 27.9 MPa among all groups, whereas that of CC-15 at 7, 14 and 28 days were relatively low. In addition, the compressive strength of CC increased faster in the early and middle curing stages when the ceramsite with different particle sizes was incorporated.
2. With the decrease in the particle size (or average particle size), the flexural strength of CC at 28 days increased, which showed the same law as that in the compression test. Interestingly, the decrease in the particle size made a slight contribution to the enhancement of splitting tensile strength. Moreover, the growth rate of splitting tensile strength of CC in the early and middle curing stages was higher than that in the later curing stage.
3. The mass loss rate of CC-15 after 100 freeze-thaw cycles which was the lowest was only 2.1 %, whereas that of CC-5 was 3.7 %. Meanwhile, the similar trend could also be obtained by analyzing the effect of particle size on RDEM. The RDEM of CC-5 reached the minimum value of 62.8 % among all groups. Therefore, the freeze-thaw resistance of CC containing more ceramsite with large particle size was better due to the hydration products and pore structure.
4. By comparing the SEM images, the microstructures of cement paste and ITZ of CC-5 and CC-10-15 before freeze-thaw cycles were similar. After 100 freeze-thaw cycles, the cracks of cement paste and ITZ of CC-5 were wider than that of CC-10-15, resulting in a looser microstructure and worse freeze-thaw resistance of the former.

Literatura / References

1. L. Fan, Z. Zhang, Y. Yu, P. Li, T. Cosgrove, Effect of elevated curing temperature on ceramsite concrete performance. *Constr. Build. Mater.* **153**, 423-429 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.050>
2. H. Zhou, A.L. Brooks, Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres. *Constr. Build. Mater.* **198**, 512-526 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.074>
3. J. Xie, J. Zhao, J. Wang, P. Huang, J. Liu, Investigation of the high-temperature resistance of sludge ceramsite concrete with recycled fine aggregates and GGBS and its application in hollow blocks. *J. Build. Eng.* **34**, 101954 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101954>
4. H. Zhu, Z. Fu, Y. Wang, N. Zhang, Study on splitting tensile strength of interface between the full lightweight ceramsite concrete and ordinary concrete. *Case. Stud. Constr. Mater.* **18**, e01829 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01829>
5. J. Gong, W. Zeng, W. Zhang, Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete. *Constr. Build. Mater.* **159**, 155-163 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.064>

rys. 14. Porównanie rys. 14a i b wykazało, że przed rozpoczęciem cykli zamrażania i rozmrażania w zaczynie cementowym zarówno CC-5, jak i CC-10-15 występowało niewiele mikrorys. Po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania w obu przypadkach zaobserwowano długie i przechodzące przez mikrostrukturę rysy w zaczynie cementowym. Jednak rysy w mieszance CC-5 były szersze niż w CC-10-15, co prowadziło do powstania bardziej rozluźnionej mikrostruktury matrycy w pierwszym przypadku. Stanowi to jedną z przyczyn niższej odporności mieszanki CC-5 na zamrażanie i rozmrażanie w porównaniu z CC-10-15 po 100 cyklach.

Obrazy SEM strefy kontaktowej zaczyn-kruszywo [ITZ] mieszanek CC-5 i CC-10-15 po 0 oraz 100 cyklach zamrażania i rozmrażania przedstawiono na rys. 15. Można zauważyć, że przed rozpoczęciem cykli zamrażania i rozmrażania mikrostruktura ITZ obu mieszanek była zbliżona, a w strefie przejściowej występowało niewiele rys, co świadczyło o dużej szczelności matrycy. Po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania w ITZ mieszanki CC-10-15 nie zaobserwowano istotnych zmian, co wskazuje, że zwarta mikrostruktura tej strefy była praktycznie niewrażliwa na gwałtowne zmiany temperatury podczas cykli zamrażania i rozmrażania. Natomiast w przypadku mieszanki CC-5 w ITZ pojawiły się długie rysy przechodzące przez całą strefę. Oznacza to, że właściwości mikrostrukturalne ITZ mieszanki CC-10-15 były lepsze niż w przypadku CC-5. Powyższe zjawiska mogą również wyjaśniać różnice w odporności obu mieszanek na zamrażanie i rozmrażanie.

Powstawanie rys w strefie przejściowej międzyfazowej można szczegółowo wyjaśnić na podstawie teorii ciśnienia hydrostatycznego zaproponowanej przez Powersa (44). Porowaty popiołoporyt może zawierać znaczną ilość cieczy (45). W związku z tym na początkowym etapie cykli zamrażania i rozmrażania ciśnienie wywołane migracją wody, skoncentrowane głównie wewnątrz popiołoporytu, jest niewielkie w obrębie ITZ. Wraz ze wzrostem liczby cykli stopień nasycenia popiołoporytu wodą zwiększa się. Wówczas ciecz zgromadzona w popiołoporycie stopniowo migruje do strefy kontaktowej pomiędzy popiołoporytem a zaczynem cementowym, generując wysokie ciśnienie w ITZ i powodując powstawanie rys.

5. Wnioski

Na podstawie wyników badań i przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski.

1. Wytrzymałość betonu popiołoporytowego [CC] na ściskanie po 28 dniach wykazywała tendencję wzrostową wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren [lub średniej wielkości ziaren], co wynikało z większej gęstości nasypowej oraz większej wytrzymałości popiołoporytu na ściskanie w cylindrze. Największą 28-dniową wytrzymałość na ściskanie spośród wszystkich badanych grup uzyskano dla mieszanki CC-5 i wynosiła ona 27,9 MPa, natomiast mieszanka CC-15 wykazywała stosunkowo niską wytrzymałość po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Ponadto zastosowanie popiołoporytu o zróżnicowanym uziarnieniu powodowało szybszy wzrost wytrzymałości CC

6. T. Wu, X. Yang, H. Wei, X. Liu, Mechanical properties and microstructure of lightweight aggregate concrete with and without fibers. *Constr. Build. Mater.* **199**, 526-539 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.037>
7. S.H. Hong, J.S. Choi, T.F. Yuan, Y.S. Yoon, A review on concrete creep characteristics and its evaluation on high-strength lightweight concrete. *J. Mater. Res. Technol.* **22**, 230-251 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.125>
8. P. Jiang, Z. Zhang, H. Wang, J. Huang, X. Luo, F. Xu, Experimental research on mechanical and impact properties of lightweight aggregate fiber shotcrete. *Constr. Build. Mater.* **333**, 127402 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127402>
9. Y. Ye, J. Liu, Z. Zhang, Z. Wang, Q. Peng, Experimental study of high-strength steel fiber lightweight aggregate concrete on mechanical properties and toughness index. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2020**, 1-10 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/5915034>
10. Y. Zhang, X. Sun, Influence of multi-walled carbon nanotubes on the multi-scale performance of internally cured concrete containing pre-wetted lightweight aggregate. *J. Build. Eng.* **58**, 104986 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2022.104986>
11. J. Jiang, J. Qin, H. Chu, Improving mechanical properties and microstructure of ultra-high-performance lightweight concrete via graphene oxide. *J. Build. Eng.* **80**, 108038 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.108038>
12. X.H. Vu, L. Daudeville, Y. Malecot, Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. *Constr. Build. Mater.* **25**, 3941-3949 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.026>
13. M.T. Uddin, A.H. Mahmood, M.R.I. Kamal, S.M. Yashin, Z.U.A. Zihan, Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* **134**, 713-726 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.164>
14. K. Liu, T. Yin, D. Fan, J. Wang, R. Yu, Multiple effects of particle size distribution modulus (q) and maximum aggregate size (D_{max}) on the characteristics of Ultra-High Performance concrete (UHPC): Experiments and modeling. *Cem. Concr. Compos.* **133**, 104709 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104709>
15. B.A. Tayeh, M.H. Akeed, S. Qaidi, B.H.A. Bakar, Influence of sand grain size distribution and supplementary cementitious materials on the compressive strength of ultrahigh-performance concrete. *Case. Stud. Constr. Mater.* **17**, e01495 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01495>
16. Q. Ma, Y. Shi, D. Ma, K. Huang, X. Yang, Effect of sludge ceramsite particle grade on static and dynamic mechanical properties of alkali-activated slag lightweight concrete at early age. *J. Build. Eng.* **69**, 106330 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.106330>
17. H. Wei, Y. Liu, T. Wu, X. Liu, Effect of aggregate size on strength characteristics of high strength lightweight concrete. *Materials* **13**, 1314 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13061314>
18. K.S. Youm, J. Moon, J.Y. Cho, J.J. Kim, Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Constr. Build. Mater.* **114**, 517-527 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.165>
19. M.J. Lee, M.G. Lee, J.Y. Chen, M. Tia, Strength and freeze-thaw testing of lightweight aggregate concretes. *Adv. Mater. Res.* **723**, 507-514 (2013). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.507>
20. C. Zhu, J. Niu, J. Li, C. Wan, J. Peng, Effect of aggregate saturation degree on the freeze-thaw resistance of high performance polypropylene fiber lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **145**, 367-375 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.039>
21. J. Sobhani, S. Komijani, M. Shekarchi, F. Ghazban, Durability of concrete mixtures containing Iranian electric arc furnace slag (EAFS) aggregates and lightweight expanded clay aggregates (LECA). *Constr. Build. Mater.* **400**, 132597 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132597>
22. R. Cepuritis, B.J. Wigum, E.J. Garboczi, E. Mørtzell, S. Jacobsen, Filler from crushed aggregate for concrete: Pore structure, specific surface, particle shape and size distribution. *Cem. Concr. Compos.* **54**, 2-16 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.010>
23. M.S. Meddah, S. Zitouni, S. Belâabes, Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Constr. Build. Mater.* **24**, 505-512 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009>

- na ściskanie we wczesnym i pośrednim okresie dojrzewania.
2. Wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren [lub średniej wielkości ziaren] rosła również 28-dniowa wytrzymałość CC na zginanie, co odpowiadało zależnościom zaobserwowanym w badaniach wytrzymałości na ściskanie. Interesująco, zmniejszenie wielkości ziaren jedynie nieznacznie wpływało na poprawę wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Ponadto tempo przyrostu wytrzymałości CC na rozciąganie przy rozłupywaniu we wczesnym i pośrednim okresie dojrzewania było większe niż w późniejszym okresie dojrzewania.
 3. Najniższy ubytek masy po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania uzyskano dla mieszanki CC-15 i wynosił on jedynie 2,1 %, podczas gdy dla mieszanki CC-5 osiągnął wartość 3,7%. Analogiczną tendencję zaobserwowano również podczas analizy wpływu uziarnienia na względny dynamiczny moduł sprężystości [RDEM]. Najniższą wartość RDEM spośród wszystkich badanych grup osiągnęła mieszanka CC-5, dla której wynosiła ona 62,8 %. Oznacza to, że CC zawierający większy udział popiołoporytu o dużym uziarnieniu wykazywał lepszą odporność na zamrażanie i rozmrażanie, co było związane z produktami hydratacji oraz strukturą porów.
 4. Porównanie obrazów SEM wykazało, że przed rozpoczęciem cykli zamrażania i rozmrażania mikrostruktura zaczynu cementowego oraz ITZ mieszanek CC-5 i CC-10-15 była podobna. Po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania rysy występujące w zaczynie cementowym oraz ITZ mieszanki CC-5 były szersze niż w przypadku CC-10-15, co prowadziło do powstania bardziej rozluźnionej mikrostruktury oraz gorszej odporności pierwszej z mieszanek na zamrażanie i rozmrażanie.
24. GB 8076-2008 (2008) Concrete admixtures. Standard Press of China, Beijing
 25. GB/T 17431.1-2010 (2010) Lightweight aggregates and its test methods-Part 1: Lightweight aggregates. Standard Press of China, Beijing
 26. GB/T 50081-2019 (2019) Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties. China Architecture & Building Press, Beijing
 27. GB/T 50082-2009 (2009) Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete. China Architecture & Building Press, Beijing
 28. L. Hai, P. Wriggers, Y. Huang, H. Zhang, S. Xu, Dynamic fracture investigation of concrete by a rate-dependent explicit phase field model integrating viscoelasticity and micro-viscosity. *Comput. Method Appl. Mech. Eng.* **418**, 116540 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116540>
 29. S. Dutta, N. Singh, A brief review on workability characteristics of iron slag concrete. *Mater. Today: Proc.* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.042>
 30. D. Yavuz, Ş. Yazıcı, Experimental study of aggregate size and gradation on pervious concretes' mechanic, hydraulic, and surface properties. *Struct. Concr.* **24**, 5451-5464 (2023). <https://doi.org/10.1002/suco.202200234>
 31. M. Elices, C.G. Rocco, Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. *Eng. Fract. Mech.* **75**, 3839-3851 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.02.011>
 32. H. Zhao, Z. Wu, A. Liu, L. Zhang, Numerical insights into the effect of ITZ and aggregate strength on concrete properties. *Theor. Appl. Fract. Mech.* **120**, 103415 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103415>
 33. O.A. Düzgün, R. Gül, A.C. Aydin, Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Mater. Lett.* **59**, 3357-3363 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.071>
 34. Y. Chen, Y. Zhang, Y. Zhang, B. Pang, W. Zhang, C. Liu, Z. Liu, D. Wang, G. Sun, Influence of gradation on extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* **403**, 133135 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133135>
 35. L. Jin, W. Yu, X. Du, W. Yang, Meso-scale simulations of size effect on concrete dynamic splitting tensile strength: Influence of aggregate content and maximum aggregate size. *Eng. Fract. Mech.* **230**, 106979 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106979>
 36. P. Chen, Z. Shi, S. Cao, P. Liu, X. Rong, L. Wang, Mechanical properties of alkali-activated slag lightweight aggregate concrete. *J. Cleaner Prod.* **359**, 132136 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132136>
 37. Y. Jia, H. Li, X. He, P. Li, Z. Wang, Effect of biochar from municipal solid waste on mechanical and freeze-thaw properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* **368**, 130374 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130374>
 38. S. Chen, R. Liu, H. Xiao, W. Wang, Insight of key parameters in freeze-thaw damage on the performance of cement-based materials: A comparative study with rapid-freeze method. *Cold Reg. Sci. Technol.* **206**, 103748 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103748>
 39. W. Dong, X. Shen, H. Xue, J. He, Y. Liu, Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of Aeolian sand lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **123**, 792-799 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.052>
 40. Y. Wang, M. Xie, J. Zhang, Mechanical properties and damage model of modified recycled concrete under freeze-thaw cycles. *J. Build. Eng.* **78**, 107680 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107680>
 41. Y. Zeng, X. Zhou, A. Tang, Shear performance of fibers-reinforced lightweight aggregate concrete produced with industrial waste ceramsite-Lytag after freeze-thaw action. *J. Cleaner Prod.* **328**, 129626 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129626>
 42. Y. Zhang, X. Sun, Synergistic effects of nano-silica and fly ash on the mechanical properties and durability of internal-cured concrete incorporating artificial shale ceramsite. *J. Build. Eng.* **66**, 105905 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105905>
 43. M. Liu, J. Lu, B. Lou, Research on Kaiser effect of acoustic emission in concrete subjected to bending after freeze-thaw. *J. Build. Eng.* **78**, 107713 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107713>
 44. T.C. Powers, A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Journal Proceedings* **41**, 245-272 (1945). <https://doi.org/10.14359/8684>
 45. N. Hu, Y. Lv, B. Luo, Y. Ye, F. Fu, J. Jia, Z. Ou, J. Li, Preparation and performance of porous ceramsite for Ag⁺ removal in sewage treatment with total phosphorus tailings. *J. Cleaner Prod.* **413**, 137515 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137515>