

Badania właściwości mechanicznych betonu lekkiego zawierającego popiół lotny i kruszywo drobne w postaci kruszonych muszli

Experimental study on the mechanical properties of lightweight aggregate concrete mixed with fly ash and shells

Peng Deng^{1,2}, Yuhua Zhou², Jinlei Wang², Yan Liu^{2*}, Xuening Wang², Cong Tan³

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;

³Shandong Hi-speed Group Co Ltd, Jinan 255000, China

*Corresponding author: Y. Liu, email: skd990583@sdust.edu.cn

Streszczenie

W badaniach wykonano betony lekkie [LWAC] poprzez zastąpienie części cementu popiołem lotnym oraz zastąpienie części piasku rzeczno-muszlami. Wpływ popiołu lotnego i muszli na właściwości mechaniczne betonu weryfikowano za pomocą badań wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na zginanie. Ponadto analizowano mikrostrukturę betonów za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej. Wyniki badań wskazują, że zarówno wytrzymałość na ściskanie, jak i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zmniejszały się wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego, ale spadek wynosił maksymalnie 1,4% i 3,1% względem próbki referencyjnej, gdy współczynnik zastąpienia popiołu lotnego wynosił 5%. Wraz ze wzrostem udziału muszli wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu najpierw wzrastały, a następnie spadały, osiągając maksymalną wartość przy współczynniku zastąpienia 10%. Optymalny udział procentowy popiołu lotnego i muszli dla LWAC wynosiły odpowiednio 5% i 10%. Wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałość na zginanie betonów modyfikowanych przy optymalnym współczynniku podstawienia wyjściowych składników wzrosły odpowiednio o 2,7%, 0,6% i 4,6% w porównaniu z serią referencyjną. Współczynniki korelacji zależności wytrzymałości na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na zginanie wynosiły odpowiednio 0,91 i 0,82. W końcowej części artykułu zaproponowano wzór obliczeniowy pokazujący zależność wytrzymałości na ściskanie od współczynnika podstawienia popiołem lotnym i współczynnika podstawienia muszlami na podstawie wzoru Bolomey'a. Współczynnik korelacji między wartością obliczoną a wartością eksperymentalną wynosił 0,91.

Summary

In this study, lightweight aggregate concrete [LWAC] was prepared by partially replacing cement with fly ash and partially substituting river sand with shell. The effects of fly ash and shell on the mechanical properties of concrete were studied by compressive test, splitting tensile test and flexural test. In addition, the specimens were microscopically analyzed by SEM electron microscopy. The results showed that both the compressive strength and splitting tensile strength decreased gradually with the increase of fly ash replacement ratio, but the maximum reduction was only 1.4% and 3.1% when the fly ash substitution ratio was 5%. With the increase of shell replacement ratio, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete increased first and then decreased, reached their maximum value at a substitution ratio of 10%. The optimum fly ash substitution ratio and shell replacement ratio for LWAC were 5% and 10%, respectively. The compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of the experimental group under the optimum substitution ratio increased by 2.7%, 0.6% and 4.6%, respectively, compared to the control group. The correlation coefficients of compressive strength with split tensile strength and flexural strength were 0.91 and 0.82, respectively. Finally, a compressive strength calculation formula related to fly ash substitution ratio and shell replacement ratio was proposed based on the Bolomey formula, and the correlation coefficient between the calculated value and the experimental value was 0.91.

Keywords: fly ash, seashell waste materials, lightweight aggregate concrete [LWAC], mechanical properties, SEM, calculation model

Słowa kluczowe: popiół lotny, materiały odpadowe z muszli morskich, beton lekki [LWAC], właściwości mechaniczne, skaningowa mikroskopia elektronowa, model obliczeniowy

1. Wprowadzenie

Beton lekki w porównaniu do zwykłego betonu [LWAC] ma stosunkowo wysoką wytrzymałość przy jednoczesnej dobrej izolacyjności termicznej i trwałości (1,2). Cement portlandzki [OPC] jest powszechnie stosowany jako materiał wiążący natomiast naturalny piasek jako kruszywo drobne. Jednak podczas produkcji cementu emitowana jest duża ilość gazów cieplarnianych, a naturalny piasek jest surowcem nieodnawialnym. Dlatego też bardzo ważne jest znalezienie materiałów alternatywnych, które mogą zastąpić te dwa składniki. Literatura donosi, że popiół lotny zawiera więcej metali ciężkich, które mogą powodować zanieczyszczenie gleb i wód, jeśli nie zostaną skutecznie oczyszczone (3). Duża ilość odpadów ze skorupiaków jest wyrzucana na wysypiska śmieci zajmując znaczną część cennych zasobów lądowych lub do wody morskiej powodując zanieczyszczenie wód i powietrza. Dodatkowo produkty ich rozkładu wydzielają również nieprzyjemne zapachy. Dlatego też wykorzystanie popiołu lotnego i muszli w produkcji betonu ma ogromne znaczenie dla zrównoważonego rozwoju, skutecznego wiązania szkodliwych metali ciężkich i poprawy wydajności produkcji betonu. Badania wykazały, że dodanie popiołu lotnego do betonu może poprawić szczelność strefy kontaktowej kruszywo-zaprawa (4,5) i wpłynąć korzystnie na poprawę mrozoodporności LWAC (6). Ponadto jak wykazano w literaturze, dodanie muszli do betonu może poprawić jego szczelność (7-9), odporność na cykle zamrażania i rozmrażania (8,10) i ma pozytywny wpływ na właściwości izolacji cieplnej i akustycznej betonu (11,12). Nadal jednak brakuje jasnego zrozumienia właściwości mechanicznych LWAC z popiołem lotnym i muszlami.

Popiół lotny może być stosowany jako składnik cementu, a także jako materiał do produkcji kruszyw lekkich poprzez zastosowanie procesu spiekania lub z wykorzystaniem procesu wiązania na zimno. Chen i in. pokazali, że gdy popiół lotny jest wprowadzony do betonu w ilości 30% jako zamiana cementu, wytrzymałość na ściskanie LWAC po 7 i 28 dniach była o 19,2% mniejsza w porównaniu do próbek referencyjnych. Niemniej jednak wytrzymałość na ściskanie po 91 i 120 dniach była odpowiednio o 1,0% i 4,8% wyższa niż w serii próbek bez popiołu lotnego (13). Nie oznacza to jednak, że im dłuższy czas dojrzewania, tym wyższa wytrzymałość na ściskanie. Shafigh i in. przedstawili wyniki badań, w których popioły lotne wprowadzono w dużej objętości [50% i 70%]. Badane LWAC miały niższą wytrzymałość na ściskanie we wszystkich badanych terminach w porównaniu z serią referencyjną (14). Ponadto Guo i in. zbadali wpływ zastąpienia części piasku rzeczno-popiołem lotnym na właściwości mechaniczne LWAC (2). Wyniki pokazały, że gdy współczynnik zastąpienia popiołem lotnym wynosił 20%, wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach była odpowiednio o 15,7% i 15,2% niższa niż w próbkach referencyjnych. Gdy współczynnik zastąpienia popiołem lotnym wynosił

1. Introduction

Lightweight aggregate concrete [LWAC] has the advantages of relatively high strength, thermal insulation and good durability compared to ordinary concrete (1,2). Traditionally, ordinary Portland cement [OPC] is generally used as binding material while natural sand as fine aggregate. However, a large amount of greenhouse gases is released during the production of OPC, and natural sand is non-renewable. Therefore, it is of great significance to find alternatives. Studies have shown that fly ash contains more heavy metals, which will cause soil and water pollution if not effectively treated (3). A large amount of shellfish waste is discarded in landfills or seawater, occupying a significant amount of valuable land resources, and its decomposition products also emit foul odors and cause water and air pollution. Therefore, the use of fly ash and shell in the production of concrete is of great significance for saving resources, effectively fixing harmful heavy metals and improving the performance of concrete. Research has found that adding fly ash to concrete can enhance the interfacial bonding performance between aggregate and mortar (4,5), and improve the frost resistance (6) of LWAC. In addition, adding shells to concrete can enhance its impermeability (7-9), improve its freeze-thaw resistance (8,10), and has a positive impact on the heat insulation and sound insulation performance of concrete (11,12). However, there is still a lack of clear understanding of the mechanical properties of LWAC mixed with fly ash and shells.

Fly ash can be used as cementitious materials, and can also be prepared into ceramsite or lightweight aggregate as fine aggregate and coarse aggregate by sintering or cold bonding process. Chen et al. found that when fly ash replaced 30 % of cement, the 7-day and 28-day compressive strength of LWAC were both 19.2 % lower than that of the control group, respectively. Nevertheless, the compressive strength at 91-day and 120-day was 1.0 % and 4.8 % higher than the group without fly ash (13). However, this does not mean that the longer the age, the higher the compressive strength. Shafigh et al. concluded that all high-volume fly ash [50% and 70%] LWAC exhibited lower compressive strengths at all ages compared to the control group (14). In addition, Guo et al. studied the effect of replacing some river sand with fly ash on the mechanical properties of LWAC (2). The results showed that when the fly ash replacement ratio was 20 %, the compressive strength at 7-day and 28-day was 15.7 % and 15.2 % lower than the control group, respectively. When the replacement ratio of fly ash was 30 %, the compressive strength of LWAC at 7-day and 28-day was 8.8 % and 5.4 % higher than the group without fly ash, respectively. Interestingly, Pater et al. observed that when fly ash was used to replace 40 % natural sand and 80 % cement, the compressive strength of LWAC at 90 days increased by 14 % compared to the control group [where fly ash only replaced

30%, wytrzymałość na ściskanie LWAC po 7 i 28 dniach była odpowiednio o 8,8% i 5,4% wyższa w porównaniu do serii bez popiołu lotnego. Co ciekawe, Pater i in. zaobserwowali, że gdy popiół lotny został użyty jako 40% alternatywa dla naturalnego piasku i jako 80% cementu, wytrzymałość na ściskanie LWAC po 90 dniach wzrosła o 14% w porównaniu z grupą kontrolną [gdzie 80% popiołu wprowadzono zamiast cementu] (5). Güneyisi i in. wykonali lekkie kruszywo z popiołu lotnego [LWA] wykorzystując proces wiązania na zimno. W następnej kolejności zbadano wpływ LWA stosowanego jako kruszywo grube w ilości 45% i 60% na właściwości mechaniczne betonu (15). Wyniki pokazały, że właściwości mechaniczne i odporność na pękanie betonu uległy osłabieniu, gdy współczynnik zastąpienia lekkiego kruszywa popiołem lotnym został zwiększony z 45% do 60%. Ponadto stwierdzono, że można wyprodukować beton o wytrzymałości na ściskanie wynoszącej około 40 MPa przy użyciu lekkich kruszyw z popiołu lotnego wiązanych na zimno.

W ostatnich latach przeprowadzono wiele badań nad zastosowaniem odpadowych muszli w betonie. Przede wszystkim wykazano, że popiół z muszli może częściowo zastąpić cement. Tayah i in. odkryli, że gdy proszek z muszli został użyty do zastąpienia 5%, 10% i 15% cementu, wytrzymałość na ściskanie LWAC wynosiła odpowiednio 29,73 MPa, 28,49 MPa i 26,38 MPa, podczas gdy seria referencyjna [0%] miała wytrzymałość na ściskanie na poziomie 29,38 MPa. Oznacza to, że uzyskano klasę wytrzymałości 25 MPa we wszystkich trzech przypadkach (16). Ponadto wprowadzenie 5% popiołu z muszli do betonu pozwoliło na otrzymanie tego kompozytu odpornego na korozję siarczanową i alkaliczną. Według Maglad i in., wprowadzenie 15% popiołu z małż zamiast cementu spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na zginanie lekkiego spienionego betonu odpowiednio o 12,4%, 18,0% i 15,9% w porównaniu z serią kontrolną (17). Ponadto, literatura donosi, że odpadowe muszle mogą częściowo zastąpić piasek rzeczny. Bamigboye i in. badali wpływ częściowego zastąpienia piasku rzeczno-muszlami *Senilia senilis* na wytrzymałość betonu na ściskanie (18). Wyniki pokazały, że wytrzymałość na ściskanie spadała wraz ze wzrostem procentowej zawartości muszli po wszystkich czasach dojrzewania [7, 14 i 28 dni], ale mieszanki z 10% i 20% muszli nadal spełniały wymagania dotyczące wytrzymałości dla betonu C20. W badaniu Varhen i in. piasek rzeczny zastąpiono rozdrobnionymi muszlami przegrzebków (19). Wyniki pokazały, że wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach nie zmniejszyła się o więcej niż 10% w porównaniu z próbką kontrolną, gdy współczynnik substytucji cementu wynosił 5%, 20%, 40% i 60%. Muszle mogą również zastępować grube kruszywo w betonie. Wyniki badań Bamihboye i in. wykazały, że wytrzymałość na ściskanie spadała wraz ze wzrostem procentowej zawartości muszli. W tym przypadku grube kruszywo zastąpiono muszlami *Senilia senilis* [0, 10%, 20%, 30%, 40% i 50%]. Mieszanki modyfikowane muszlami w ilości 10% i 20% nadal osiągały wymaganą wytrzymałość na ściskanie dla betonu C20 (20). Melais i in. zbadali wpływ zastąpienia kruszyw naturalnych muszlami morskimi na właściwości betonu jamistego. Wyniki wykazały, że wytrzy-

80 % cement] (5). Furthermore, Güneyisi et al. prepared fly ash lightweight aggregate [LWA] by using cold bonding process, and then investigated the effect of LWA as a partial coarse aggregate [45 % and 60 %] on the mechanical properties of concrete (15). The results showed that the mechanical and fracture properties of concrete were weakened when the replacement ratio of fly ash lightweight aggregate was increased from 45 % to 60 %. In addition, it was found that concrete with a compressive strength of approximately 40 MPa could be produced with the cold bonded lightweight fly ash aggregates.

In recent years, a lot of research has been conducted on the application of shells in concrete. First of all, seashell ash can partly replace cement. Tayah et al. found that when shell powder was used to replace 5 %, 10 %, and 15 % of cement, the compressive strength of LWAC was 29.73 MPa, 28.49 MPa, and 26.38 MPa, respectively, while the control group [0 %] was 29.38 MPa. Obviously, the compressive strength can reach the target strength of 25 MPa at these three substitution ratio (16). In addition, the durability of the concrete in terms of resistance to sulfate and alkaline attack roughly met the standard requirements when shell ash replaced 5 % of the cement. According to Maglad et al., when mussel shell ash replaced 15 % of cement, the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of lightweight foamed concrete increased by 12.4 %, 18.0 % and 15.9 % respectively compared to the control group (17). Secondly, shells can also partly replace river sand. Bamigboye et al. studied the effect of partial replacement of river sand with *Senilia senilis* shells on the compressive strength of concrete (18). The results showed that the compressive strength declined with increasing percentages of seashells at all curing ages [7, 14, and 28 days], but 10 % and 20 % seashell blends still obtained strength requirements for C20 concrete. In the study of Varhen et al., the river sand was replaced by scallop crushed seashell (19). The results indicate that the compressive strength of concrete at 28 days did not decrease by more than 10 % compared to the control group when the shell substitution ratio was 5 %, 20 %, 40 % and 60 %. In addition, shells can also replace coarse aggregates in concrete. Experimental results of Bamihboye et al. showed that the compressive strength declined with increasing percentages of seashells when the coarse aggregates replaced by *Senilia senilis* shells [0, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, and 50 %], but the 10 % and 20 % seashell-modified mixes still achieved the required strength for C20 concrete (20). Melais et al. investigated the effect of replacing natural aggregates with marine shells on the performance of pervious concrete. The results showed that the compressive strength of the concrete mixed with shell aggregate was lower, but the flexural strength and ductility were improved. In addition, drainage concrete with good permeability was obtained from the test (21).

In summary, extensive research has been conducted on the substitution of fly ash and shell for cementitious materials, fine aggregates, and coarse aggregates in concrete, respectively. However, there is still little research on the mechanical properties and their correlation of LWAC mixed with fly ash and shell at the same time. Therefore, this study investigated the effects of fly

małość na ściskanie betonu zmieszanego z kruszywem skorupowym była niższa, ale wytrzymałość na zginanie i ciągliwość uległy poprawie. Ponadto w wyniku badania otrzymano beton drenażowy o dobrej przepuszczalności (21).

Podsumowując, przeprowadzono obszerne badania nad wykorzystaniem popiołów lotnych i odpadowych muszli w kompozytach cementowych. Zastępowano nimi drobne i grube kruszywa w betonie. Jednak nadal niewiele jest badań nad właściwościami mechanicznymi LWAC zawierającymi jednocześnie popiół lotny i muszle. Dlatego w niniejszym artykule zbadano wpływ popiołu lotnego częściowo zastępującego cement [0, 5%, 10%, 15%, 20%] i muszli częściowo zastępujących piasek rzeczny [0, 5%, 10%, 15%, 20%] na właściwości mechaniczne LWAC. Wykonano obserwacje mikrostruktury SEM. Ponadto przeanalizowano korelację między właściwościami mechanicznymi i zaproponowano wzór do obliczania wytrzymałości na ściskanie LWAC w odniesieniu do współczynnika substytucji popiołem lotnym i współczynnika zastąpienia muszlami.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

2.1.1. Spoiwa

W badaniach użyto cementu portlandzkiego PO 42,5 i popiołu lotnego klasy II, [rys. 1a]. Skład chemiczny cementu i popiołu lotnego przedstawiono w tabelicy 1. Właściwości fizyczne cementu przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY [MASOWY] MATERIAŁÓW

CHEMICAL COMPONENTS [BY MASS] OF CEMENTITIOUS MATERIALS [%]

Skład / Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅
Cement / OPC	24.75	7.44	3.81	-	51.30	-	5.15	0.31	6.59
Popiół lotny / Fly ash	55.8	27.1	6.5	2.1	2.89	1.11	2.1	1.5	-

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT

Czas wiązania / Setting time, min		Gęstość / Density, kg/m ³	CS, MPa		FTS, MPa		WCFSC, %	ROS, %
Początek czasu wiązania / Initial setting time	Koniec czasu wiązania / Final setting time		3d	28d	3d	28d		
78	280	3100	24.4	44.3	6.30	9.80	26.3	0.68

Przypis: CS – wytrzymałość na ściskanie; FTS – Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu; WCFSC – wodoządnosc; ROS – pozostałość na sicie [80 μm].

Note: CS-Compressive strength; FTS – Flexural Tensile Strength; WCFSC – Water consumption for standard consistency; ROS – Residue on sieve [80 μm].



Rys. 1. Surowce [a] popiół lotny; [b] kruszywo z muszli; [c] piasek z muszli.

Fig. 1. Raw materials [a] Fly ash; [b] Shale ceramsite; [c] Shell sand.

ash partially replacing cement [0, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %] and shell partially replacing river sand [0, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %] on the mechanical properties of LWAC through experiments and SEM electron microscopy techniques. In addition, the correlation between mechanical properties was analyzed, and a formula for calculating the compressive strength of LWAC related to fly ash substitution ratio and shell replacement ratio was proposed.

2. Experimental program

2.1. Experimental raw materials

2.1.1. Cementitious materials

The cementitious materials used in this experiment were PO 42.5 ordinary Portland cement and Class II fly ash, as shown in Fig. 1[a]. The chemical composition of OPC and fly ash are shown in Table 1. The physical and mechanical performance indicators of cement are shown in Table 2.

2.1.2. Coarse aggregate

The coarse aggregate used in this experiment was shale ceramsite with a particle size of 5 ~ 16 mm, as shown in Fig. 1[b]. The physical performance indicators of shale ceramsite are shown in Table 3.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KERAMZYTU

THE PHYSICAL PROPERTIES OF SHALE CERAMSITE

Kruszywo grube Coarse aggregate	Wymiar ziaren Particle size range, mm	Gęstość nasypowa Bulk density, kg/m ³	Wytrzymałość na miążdzenie Cylinder compressive strength, MPa	Gęstość pozorna Apparent density, kg/m ³	Klasa gęstości Density grade
Keramzyt / Shale ceramsite	5-16	635.5	3.9	705.3	700

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYW DROBNYCH

PHYSICAL PROPERTIES OF FINE AGGREGATE

Typy kruszyw drobnych Types of fine aggregate	Gęstość nasypowa Bulk density, kg/m ³	Gęstość pozorna Apparent density, kg/m ³	Nasiąkliwość Water absorption, %	Moduł miąłkości Fineness modulus, -
Piasek rzeczny / River sand	1550	2720	0.86	2.8
Piasek z muszli / Shell sand	1408	2810	2.04	2.6

2.1.2. *Kruszywo grube*

Kruszywo grube użyte w tym eksperymencie to keramzyt produkowany z łupka, o wielkości granul 5 - 16 mm, jak pokazano na rys. 1[b]. Właściwości fizyczne keramzytu przedstawiono w tablicy 3.

2.1.3. *Kruszywo drobne*

Drobne kruszywo użyte w badaniach to piasek rzeczny i piasek z muszli odpadowych o rozmiarach ziaren od 0,15 do 4,75 mm [70% muszli przegrzebków i 30% muszli ostryg] [rys. 1c]. Właściwości fizyczne przedstawiono w tablicy 4. Analizę sitową ziaren kruszywa przedstawiono na rys. 2.

2.1.4. *Domieszka upłynniająca*

W badaniach wykorzystano domieszkę upłynniająca zawierającą polikarboksylan firmy Tianjin Weihe Technology Development Co., Ltd. Właściwości deklarowane przez producenta są zgodne z odpowiednimi specyfikacjami [tablica 5].

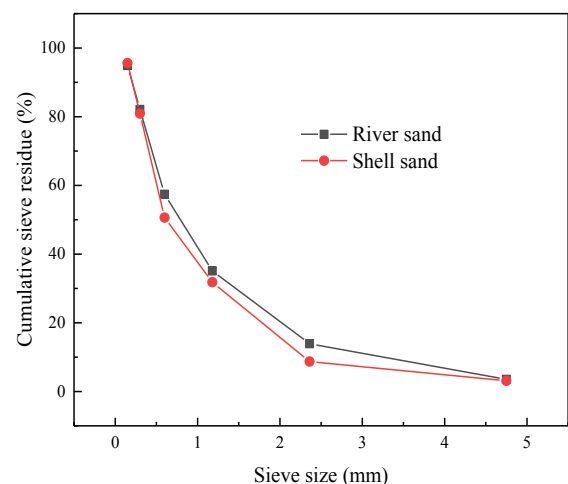
2.1.5. *Woda zarobowa*

W badaniach użyto wody wodociągowej z Kluczowego Laboratorium Zapobiegania Katastrofom i Ograniczania Ich Skutków na Uniwersytecie Naukowo-Technicznym w Szantungu.

2.2. *Przygotowanie próbek*

2.2.1. *Skład betonów referencyjnych*

Skład betonów stanowiących próbki odniesienia został przygotowany zgodnie z chińską normą JGJ/T12-2019 „Norma techniczna dotycząca stosowania lekkiego betonu kruszywowego” i przedstawiony w tablicy 6. W nazwie próbek współczynnik substytucji popiołem lotnym poprzedzony jest literą F, natomiast współczynnik substytucji piaskiem muszlowym został poprzedzony literą B. Na przykład F5-B5 oznacza, że współczynnik substytucji popiołem lotnym wynosił 5%, podczas gdy współczynnik substytucji piaskiem



Rys. 2. Analiza sitowa kruszyw drobnych

Fig. 2. Grading curve of fine aggregate

2.1.3. *Fine aggregate*

The fine aggregates used in this experiment were river sand and shell sand with particle sizes ranging from 0.15 to 4.75mm [70% scallop shell and 30% oyster shell], as shown in Fig. 1[c]. The physical performance indicators are shown in Table 4. The grading curve of fine aggregate is shown in Fig. 2.

2.1.4. *Water reducing agent*

The polycarboxylate high-efficiency water reducer used in this research came from Tianjin Weihe Technology Development Co., Ltd. Its performance indicators are provided by the manufacturer and comply with relevant specifications, as shown in Table 5.

2.1.5. *Mixing water*

The mixing water used in this experiment was tap water from the Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Shandong University of Science and Technology.

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE DOMIESZKI UPŁYNNIAJĄCEJ

PHYSICAL PROPERTIES OF WATER REDUCING AGENT

Forma / Form	Wygląd / Appearance	pH value	Gęstość / Density, g/ml	Zmniejszenie ilości wody zarobowej / Water reduction rate, %
Ciecz / Liquid	Blado żółty / Faint yellow	6~8	1.08	30

muszlowym wynosił 5%. Dlatego F0-B0 była próbką odniesienia. Współczynnik wodno-spoiwowy wynosił 0,35, całkowita ilość spoiwa wynosiła 440 kg/m³, ilość wody wynosiła 150 kg/m³, punkt piaskowy wynosił 40%, a masa domieszki redukującej wodę to 4 kg/m³. Stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie betonów próbek odniesienia jest zgodna z klasą wytrzymałości LC30.

2.2.2. Skład betonów badanych

Aby zbadać wpływ częściowego zastąpienia cementu popiołem lotnym i częściowego zastąpienia piasku rzeczno piaskiem muszlowym na właściwości mechaniczne LWAC, udział procentowy popiołu lotnego i piasku muszlowego ustalono odpowiednio na poziomie 0, 5%, 10%, 15% i 20% [stosunek masowy]. Skład mieszanek przedstawiono w tablicy 6.

2.2. Design of mix proportion

2.2.1. Mix proportion design of Benchmark group

The mix proportion design of the benchmark group was carried out in accordance with Chinese standard JGJ/T12-2019 "Technical standard for the application of lightweight aggregate concrete", as shown in Table 6. Among them, the substitution ratio of fly ash was expressed by F, while the replacement ratio of shell sand was showed by B. For example, F5-B5 means that the substitution ratio of fly ash was 5 %, while the replacement ratio of shell sand was 5 %. Therefore, F0-B0 was the benchmark group. In addition, F5 means that the substitution ratio of fly ash was 5 %. The water-binder ratio of each group of specimens was 0.35, the total amount of cementitious material was 440 kg/m³, the water consumption was 150 kg/m³, the sand rate was 40 %, and the amount of water reducing agent was 4 kg/m³. In addition, the compressive strength

Tablica 6 / Table 6

SKŁAD BETONÓW LEKKICH LWAC [kg/m³]MIX PROPORTION OF LWAC IN TEXT GROUP [kg/m³]

Nazwa mieszanki Mix ID	Cement	Popiół lotny / Fly ash	Piasek rzeczny River sand	Piasek muszlowy Shell sand	Keramzyt / Ceramsite
F0-B0	440	0	744	0	456
F0-B5	440	0	706.8	37.2	456
F0-B10	440	0	669.6	74.4	456
F0-B15	440	0	632.4	111.6	456
F0-B20	440	0	595.2	148.8	456
F5-B0	418	22	744	0	456
F5-B5	418	22	706.8	37.2	456
F5-B10	418	22	669.6	74.4	456
F5-B15	418	22	632.4	111.6	456
F5-B20	418	22	595.2	148.8	456
F10-B0	396	44	744	0	456
F10-B5	396	44	706.8	37.2	456
F10-B10	396	44	669.6	74.4	456
F10-B15	396	44	632.4	111.6	456
F10-B20	396	44	595.2	148.8	456
F15-B0	374	66	744	0	456
F15-B5	374	66	706.8	37.2	456
F15-B10	374	66	669.6	74.4	456
F15-B15	374	66	632.4	111.6	456
F15-B20	374	66	595.2	148.8	456
F20-B0	352	88	744	0	456
F20-B5	352	88	706.8	37.2	456
F20-B10	352	88	669.6	74.4	456
F20-B15	352	88	632.4	111.6	456
F20-B20	352	88	595.2	148.8	456

2.2.3. Wymiary próbek

W badaniach wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykorzystano sześciany o wymiarach 100 mm × 100 mm × 100 mm, natomiast test badania wytrzymałości na zginanie wykonano dla próbek o wymiarze 100 mm × 100 mm × 400 mm. Wykonano 9 próbek dla każdej serii, które dojrzewały przez 28 dni. Badania mechaniczne, w tym wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałość na zginanie wykonywano dla 3 próbek.

2.3. Metody

2.3.1. Właściwości mechaniczne

Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałość na zginanie betonów zostały wykonane zgodnie z chińską normą GB/T 50081-2019 „Norma metod badań właściwości fizycznych i mechanicznych betonu”. Ponadto wytrzymałości zmierzono i odpowiednio przeliczono uwzględniając efekt skali, wynikający z niestandardowego wymiaru próbek w tym eksperymencie. Wartości wytrzymałości na ściskanie przemnożono przez współczynnik wynikający ze zmiany wymiaru próbki wynoszący 0,95, natomiast wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na zginanie przemnożono przez 0,85. Szczegóły stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 3[a], [b] i [c].

2.3.2. SEM badanie mikrostruktury

Sześcienne próbki betonów o boku około 8 mm [różnica wysokości między każdą grupą próbek nie była większa niż 2 mm],

of the reference group of blocks was found to be in accordance with the strength class of LC30.

2.2.2. Mix proportion design of test group

In order to investigate the influence law of partially replacing cement with fly ash and partially substituting river sand with shell on the mechanical properties of LWAC, the replacement ratio of fly ash and shells were set to 0, 5 %, 10 %, 15 %, and 20 % [mass ratio], respectively. According to the preliminarily determined parameters and material indicators, the experimental group mix ratio can be obtained, as shown in Table 6.

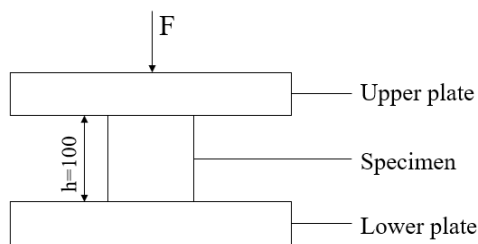
2.2.3. Specimens design

The size of the concrete specimen used in the cube compressive strength and splitting tensile strength tests is 100 mm × 100 mm × 100 mm, while the flexural strength test is 100 mm × 100 mm × 400 mm. The 9 specimens made by each mix proportion were cured for 28 days for subsequent experiments. Three specimens were taken for each of the compression test, splitting tensile test and flexural test.

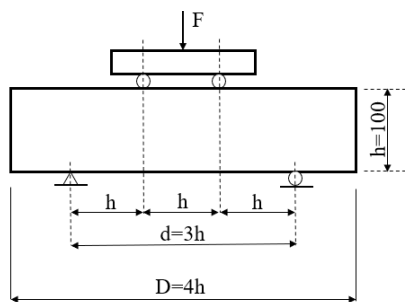
2.3. Experimental methods

2.3.1. Mechanical test

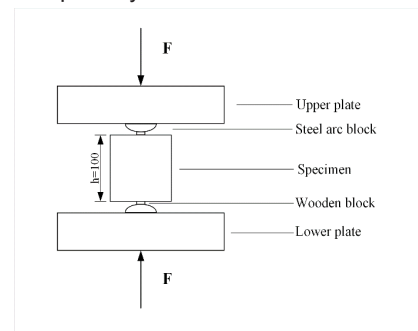
The 28d compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of LWAC in each mix proportion was tested according to the Chinese standard GB/T 50081-2019 “standard for testing methods of physical and mechanical properties of concrete”. In addition, the peak load recorded when the specimen is destroyed needs to be multiplied by the size conversion factor due to the use



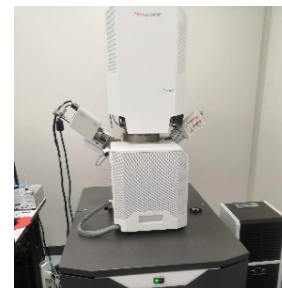
[a]



[c]



[b]



[d]

Rys. 3. Stanowiska badań i schematy układów próbek do badań właściwości mechanicznych; [a] wytrzymałość na ściskanie; [b] wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu; [c] wytrzymałość na zginanie; [d] mikroskop SEM do obserwacji mikrostruktury.

Fig. 3. Mechanical tests: [a] the compressive strength test; [b] the splitting tensile strength test; [c] the flexural strength text; [d] the SEM electron microscopy test.

zostały użyte jako próbki do badania mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Wyglądono dolną stronę próbki, a następnie moczo ją w alkoholu przez 12 godzin, następnie pozostawiono na czystym kawałku szkła w celu wyschnięcia. Mikrostrukturę próbek obserwowano z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego z emisją polową, jak pokazano na rys. 3[d].

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Rys. 4 przedstawia zmienność wytrzymałości na ściskanie przy różnym współczynniku substytucji popiołem lotnym i współczynniku zamiany piaskiem muszlowym. Wartość wytrzymałości na ściskanie była średnią z trzech próbek.

3.1.1. Wpływ popiołu lotnego

Jak pokazano na rys. 4[a], dla serii próbek ze stałą zawartością piasku z muszli wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wytrzymałość na ściskanie znacząco spadała. Spadek wytrzymałości był coraz mniejszy kiedy udział piasku muszlowego wzrastał. Gdy udział popiołu lotnego wzrósł z 0 do 5%, spadek wytrzymałości na ściskanie był niewielki, z maksimum wynoszącym 1,4% [próbka B20]. Gdy współczynnik zastąpienia popiołem lotnym wzrósł do 20%, wytrzymałość na ściskanie nie spadła o więcej niż 10% w odniesieniu do próbki referencyjnej B0. Warto zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie przekroczyła 30 MPa dla wszystkich badanych próbek i dla wszystkich badanych udziałów procentowych popiołów lotnych i muszli.

Wytrzymałość na ściskanie betonów stopniowo maleje wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego, co wynika z różnych czynników. Po pierwsze, ze względu na zmniejszenie zawartości cementu, co powoduje mniejszy stopień hydratacji i zmniejszenie ilości produktów hydratacji: fazy C-S-H i $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Po drugie, zawartość CaO w popiele lotnym jest znacznie niższa niż w cemencie, im wyższa zawartość popiołu lotnego, tym niższa zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w mieszance. Ponieważ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jest substratem w reakcji pucolanowej, ze względu na redukcję cementu w mieszance postęp reakcji pucolanowej może być mniejszy (14). Zmniejszenie zarówno ilości $\text{Ca}(\text{OH})_2$, jak i C-S-H może powodować zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie. Wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego spadek wytrzymałości na ściskanie był coraz większy. Z jednej strony popiół lotny może stanowić wypełniacz porów betonu i mieć pozytywny wpływ na zagęszczenie i wytrzymałość na ściskanie. Z drugiej strony, popiół lotny jest mniej aktywny niż cement i reakcja pucolanowa nie kompensuje efektu rozcieńczenia (14). Dlatego też wraz ze wzrostem wskaźnika zastąpienia cementu popiołem lotnym i spadkiem zawartości cementu, wytrzymałość na ściskanie się zmniejszała.

3.1.2. Wpływ muszli

Z rys. 4[b] wynika, że gdy współczynnik zastąpienia cementu popiołem lotnym jest ten sam, wytrzymałość na ściskanie we

of non-standard specimens in this experiment. Among them, the size conversion coefficient of the compressive test is 0.95, and the splitting tensile test and the flexural test are 0.85. The details of the mechanical experiment were illustrated in Figs. 3[a], [b] and [c].

2.3.2. SEM scanning electron microscope test

The cured and molded test blocks were made into samples with the longest side of about 8 mm [the height difference between each group of small blocks was not more than 2 mm], which were used as the observation objects of SEM electron microscope test. Smoothing the bottom side of the block, and then soaked it in alcohol for 12 hours, next removed it with tweezers and placed it on a clean piece of glass to dry. Finally, the microstructure of the small block was scanned by a field emission scanning electron microscope, as shown in Fig. 3[d].

3. Results and discussion

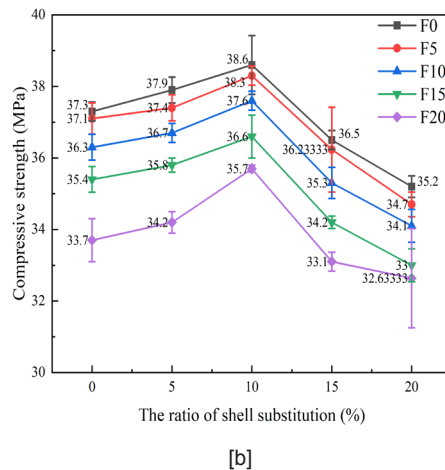
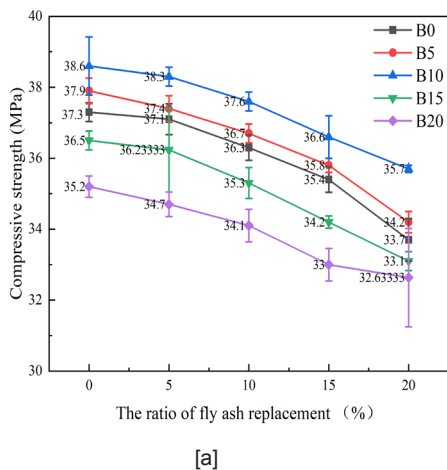
3.1. Compressive strength

Fig. 4 showed the variation of compressive strength with different fly ash substitution ratio and shell replacement ratio. Among them, the compressive strength value was the average of three data.

3.1.1. The impact of fly ash

As shown in Fig. 4[a], when the shell replacement ratio remained constant, the compressive strength of the concrete cube gradually decreased with the increase of fly ash replacement ratio. In addition, when the replacement ratio of fly ash rised from 0 to 5 %, the decrease in compressive strength was very small, with a maximum of only 1.4 % [B20 group]. When the fly ash substitution ratio increased from 0 to 20 %, the compressive strength did not decrease by more than 10%. It is worth noting that the compressive strength exceeded 30 MPa at all fly ash replacement ratio and shell substitution ratio.

The compressive strength of concrete decreases gradually with the increase of fly ash content, for the following two reasons. First of all, due to the decrease of cement content, the hydration reaction is not sufficient, resulting in the decrease of hydration products phase C-S-H and $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Secondly, because the content of CaO in fly ash is much lower than that of cement, the higher the content of fly ash, the lower the content of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the mixture. Whereas $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is one of the necessary conditions for pozzolanic reaction. Due to the reduction of cement in the mixture, there is not enough calcium hydroxide to produce C-S-H through pozzolanic reaction (14). Reduction in both $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and C-S-H quantities decreases the compressive strength. With the increase of fly ash, the fall in compressive strength showed an increasing trend, and the reasons are as follows. On the one hand, fly ash can fill the pores of concrete to a certain extent, increase the compactness, reduce the initial defects of concrete, and have a positive impact on the compressive strength. On the other hand, fly ash was less active than cement and cannot fully occur the volcanic ash effect



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od zawartości [a] popiołu lotnego; [b] muszli.

Fig. 4. The change diagram of compressive strength vs. content of [a] fly ash and [b] shell.

wszystkich seriach najpierw wzrasta, a następnie spada wraz ze wzrostem udziału muszli. Gdy udział procentowy muszli w betonie wynosił 10%, wytrzymałość na ściskanie była najwyższa. Ponadto, w porównaniu z próbką kontrolną, maksymalny wzrost wytrzymałości na ściskanie wyniósł 5,9% [grupa F20-B10]. Gdy współczynnik zastąpienia piasku rzecznej muszlami wzrósł do 20%, wytrzymałość na ściskanie nie spadła o więcej niż 10%. Wytrzymałość na ściskanie była największa dla 10% udziału muszli we wszystkich seriach różniących się udziałem popiołu lotnego. Gdy współczynnik zastąpienia cementu popiołem lotnym wynosi 5%, wytrzymałość na ściskanie LWAC jest tylko o 0,3 MPa niższa od wytrzymałości próbki bez popiołu. Z perspektywy oszczędzania zasobów i zużycia odpadów, najlepszy udział popiołu lotnego to 5%. Można zauważyć, że optymalny współczynnik substytucji popiołem lotnym i współczynnik substytucji muszlami dla LWAC wynosiły odpowiednio 5% i 10%. Powody, dla których wytrzymałość na ściskanie wykazuje tendencję wzrostową, a następnie spadkową wraz ze wzrostem udziału muszli wynikają z różnych czynników. Z jednej strony, łupliwe muszle mogą wypełniać wewnętrzne pory betonu i w pewnym stopniu zagęszczać go (22), co ma pozytywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Jednakże negatywny skutek na wytrzymałość jest wynikiem kilku działań. Po pierwsze, w porównaniu do piasku rzecznej, powierzchnia właściwa muszli była większa, ale bardziej gładka i mniej porowata, co zmniejsza przyczepność do matrycy cementowej i jakość strefy kontaktu muszla-zaczyn (12). Po drugie muszle mają różny kształt i ostrokrawędzisty przełam, co może prowadzić do zjawiska nierównomiernego rozkładu naprężeń (23). Ponadto, w porównaniu do piasku rzecznej, muszle charakteryzują się większą nasiąkliwością, więc mogą adsorbować część wody zarobowej podczas procesu wiązania i twardnienia betonu, a tym samym wpływać na wytrzymałość na ściskanie (24). Wraz ze wzrostem współczynnika substytucji muszlami pozytywny wpływ muszli na wytrzymałość na ściskanie może stopniowo słabnąć.

3.1. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

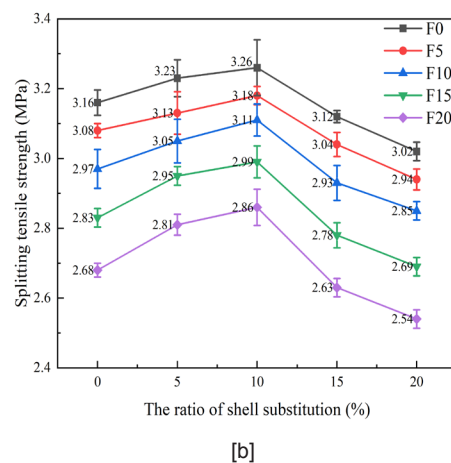
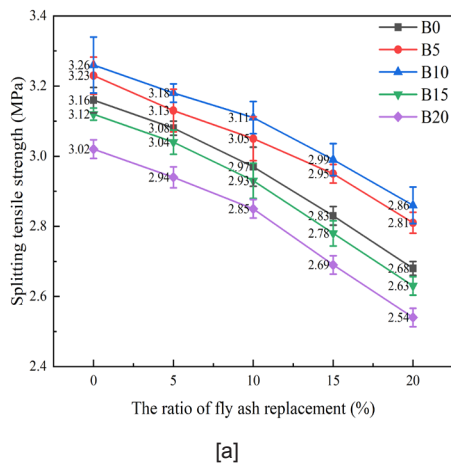
W praktyce beton jest poddawany nie tylko naprężeniom ścisakającym, ale także naprężeniom rozciągającym wynikającym

(14). Therefore, with the rise of fly ash replacement ratio and the drop of cement content, the compressive strength was adversely affected. When the fly ash replacement ratio was small, the positive effect was slightly less than the adverse effect. On the contrary, the positive effect was far less than the adverse effect. Therefore, with the rise of fly ash substitution ratio, the decrease of compressive strength increased gradually.

3.1.2. The influence of shells

It can be seen from Fig. 4[b] that when the replacement ratio of fly ash is constant, the compressive strength rised first and then declined with the increase of shell substitution ratio. Obviously, when the shell substitution ratio was 10 %, the compressive strength was the highest. In addition, compared to the control group, the maximum increase in compressive strength was 5.9 % [F20-B10 group]. When the shell replacement ratio rised from 0 to 20 %, the compressive strength did not decrease by more than 10 %. Moreover, the compressive strength was maximized at 10% shell substitution ratio for all groups of fly ash substitution ratio. When the replacement ratio of fly ash is 5 %, the compressive strength of LWAC is only 0.3 MPa lower than that of 0 %. From the perspective of saving resources and consuming waste, the best replacement ratio of fly ash is 5 %. It can be seen that the optimum fly ash substitution ratio and shell replacement ratio for LWAC were 5 % and 10 %, respectively.

The reasons why the compressive strength shows an increasing and then decreasing trend with the increase of shell replacement ratio are as follows. On the one hand, flaky shells can fill the internal voids of concrete to a certain extent, and make it denser (22), which has a positive impact on compressive strength. The negative effects were mainly in the following three aspects: firstly, compared to river sand, the specific surface area of shells was larger and the surface was smooth, which reduced the bonding performance with cementitious materials, and resulted in more cracks at the connection between shells and cementitious materials (12). Secondly, the shells were angular and different in shape, which may lead to the phenomenon of staggered distribution, and made



Rys. 5. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w zależności od zawartości [a] popiołu lotnego; [b] muszli.

Fig. 5. The change diagram of splitting tensile strength [a]fly ash [b] shell.

z temperatury, skurczu i innych czynników. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu jest ważnym wskaźnikiem opisującym właściwości betonu. Rys. 5 przedstawia zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w funkcji zamiany cementu popiołem lotnym oraz zamiany piasku rzeczno-piaskiem muszlowym. Wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu jest średnią z 3 próbek.

3.1.1. Wpływ popiołu lotnego

Z rys. 5[a] wynika, że dla tej samej zawartości piasku muszlowego, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu stopniowo malała wraz ze wzrostem współczynnika substytucji cementu popiołem lotnym. Gdy udział popiołu lotnego wzrósł z 0 do 5%, redukcja wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu była bardzo niewielka, osiągając spadek wynoszący 3,1% [Grupa B5]. Zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu znacznie wzrosło, gdy udział popiołu lotnego przekroczył 10%. Gdy udział procentowy popiołu lotnego wzrósł z 5% do 10%, spadek wyniósł średnio 3%, porównując próbki z 10% i 15% zamianą, spadek wyniósł średnio 4,5%. Warto zauważyć, że wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu przekracza 2,5 MPa dla wszystkich udziałów popiołu lotnego i muszli. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu stopniowo malała wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego, a różnica spadku wytrzymałości względem próbki referencyjnej wzrastała. Czynniki wpływające na obserwowane zmiany były podobne jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie.

3.1.2. Wpływ muszli

Z rys. 5[b] wynika, że dla serii próbek z tą samą zawartością popiołu lotnego, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu najpierw wzrastała, a następnie malała wraz ze wzrostem współczynnika zastąpienia piasku muszłami. Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zaobserwowano, gdy udział muszli wynosił 10%. Ponadto maksymalny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w porównaniu z próbką odniesienia wyniósł 6,7% [grupa F20-B10]. Co więcej, różnica wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu między próbkami zawierają-

the vibration not dense (23). In addition, compared to river sand, shells have a higher water absorption rate, so they will adsorb some free water during the curing process of concrete, inhibit the hydration and hardening rate of concrete, and thus affect the compressive strength (24). With the increase of shell substitution ratio, the positive impact of shell on the compressive strength may gradually weaken, and the negative impact may gradually increase, which led to such a trend.

3.2. Splitting tensile strength

In practical engineering, concrete is not only subjected to compressive, but also to tensile stresses from temperature, shrinkage and other factors. Splitting tensile strength is an important indicator to reflect the tensile properties of concrete. Fig. 5 showed the variation of splitting tensile strength with different fly ash substitution ratio and shell replacement ratio. Among them, The splitting tensile strength value is the average of the test values of three specimens.

3.2.1. The impact of fly ash

It can be seen from Fig. 5[a] that when the shell substitution ratio was constant, the splitting tensile strength decreased gradually with the increase of fly ash replacement ratio, and its decline showed a trend of gradually rising. In addition, when the replacement ratio of fly ash increased from 0 to 5%, the reduction in the splitting tensile strength was very small, with a maximum of only 3.1% [Group B5]. It was clear that the reduction in splitting tensile strength rised significantly when the fly ash admixture exceeds 10%. When the fly ash substitution ratio increased from 5% to 10%, the decline was 3% on average, while when it raised from 10% to 15%, the decrease was 4.5% on average. It is noteworthy that the splitting tensile strength exceeds 2.5 MPa at all fly ash replacement ratio and shell substitution ratio.

The splitting tensile strength gradually declined with the rise of fly ash replacement ratio, and its decreasing amplitude gradually increased. The specific reason for this change was similar to the compressive strength of concrete.

cymi różny udział popiołu była większa w przypadku, kiedy 10% piasku rzeczno zastąpiono piaskiem muszlowym. Maksymalny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wyniósł tylko 2,0%, kiedy udział muszli wzrósł z 5% do 10%, podczas gdy minimalny spadek wyniósł 4,3%, gdy udział muszli wzrósł z 10% do 15%. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu była największa dla 10% zawartości muszli, dla wszystkich serii różniących się zawartością popiołu lotnego. Można zauważyć, że wprowadzenie popiołu lotnego w ilości 5% oraz muszli w ilości 10% dało najbardziej korzystne rezultaty dla wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wykazywała tendencję najpierw wzrostową, a następnie spadkową wraz ze wzrostem udziału piasku z muszli, a powód tych zmian był podobny jak w przypadku analizy dla wyników wytrzymałości betonu na ściskanie.

3.3. Wytrzymałość na zginanie

Rys. 6 przedstawia wytrzymałości na zginanie betonów z różną zawartością popiołu lotnego i piasku z muszli. Wartość wytrzymałości na zginanie była średnią z trzech próbek.

3.3.1. Wpływ popiołu lotnego

Jak pokazano na rys. 6[a], dla serii próbek ze stałą zawartością muszli, wytrzymałość na zginanie najpierw wzrastała, a następnie spadała wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego. Gdy udział popiołu lotnego wynosił 5%, wytrzymałość na zginanie osiągnęła maksymalną wartość. Ponadto wytrzymałość na zginanie była największa dla 10% substytucji piasku rzeczno piaskiem muszlowym dla wszystkich serii różniących się udziałem popiołu lotnego. Zgodnie z otrzymanymi danymi, dodanie 20% popiołu lotnego miało niewielki wpływ na wytrzymałość na zginanie, a maksymalny spadek wynosił 6,4% [grupa F20-B20]. Warto zauważyć, że wytrzymałość na zginanie przekracza 3,9 MPa dla każdego badanego betonu z różnym udziałem popiołu lotnego i muszli.

Gdy współczynnik zamiany cementu popiołem lotnym wynosił 5%, wytrzymałość na zginanie rosła wraz ze wzrostem współczynnika substytucji muszłami. Powodem może być fakt, że rozmiar próbki w badaniu wytrzymałości na zginanie był większy niż w pozostałych

3.2.2. The influence of shells

It can be seen from Fig. 5[b] that when the replacement ratio of fly ash was constant, the splitting tensile strength increased first and then decreased with the rising of shell substitution ratio. Apparently, the highest splitting tensile strength was observed when the shell replacement ratio was 10%. In addition, the maximum increase in splitting tensile strength was 6.7% [F20-B10 group] compared to the control group. Moreover, the decreasing amplitude in splitting tensile strength was greater than the increasing at around 10% replacement ratio. The maximum increase in splitting tensile strength was only 2.0% when shell substitution rose from 5% to 10%, while the minimum decrease was 4.3% when it increased from 10% to 15%. Moreover, the splitting tensile strength was maximized at 10% shell substitution ratio for all groups of fly ash substitution ratio. It can be seen that a fly ash admixture of 5% and a shell substitution ratio of 10% was most favorable for the splitting tensile strength.

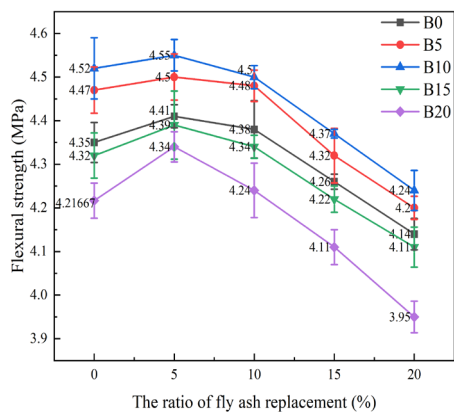
The splitting tensile strength of concrete showed a trend of first increasing and then declining with the increase of shell replacement ratio, and the reason for this change was similar to the compressive strength of concrete.

3.3. Flexural strength

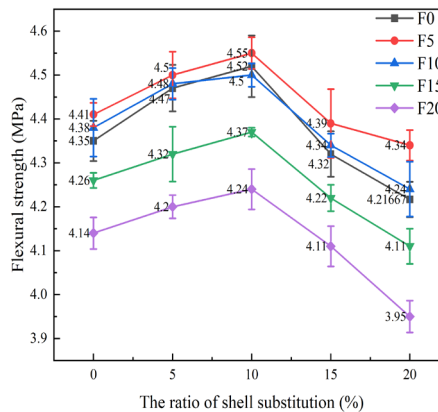
Fig. 6 showed the variation of flexural strength with different fly ash substitution ratio and shell replacement ratio. Among them, the flexural strength value was the average of three data.

3.3.1. The impact of fly ash

As shown in Fig. 6[a], when the shell replacement ratio remained constant, the flexural strength increased first and then declined with the rise of fly ash substitution ratio. When the fly ash replacement ratio was 5%, the flexural strength reached its maximum value. In addition, the flexural strength was maximized at 10% shell substitution for all groups of fly ash substitution ratio. According to data analysis, the addition of 20% fly ash had little effect on the flexural strength, with a maximum decrease of only 6.4% [F20-



[a]



[b]

Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie w zależności od zawartości [a] popiołu lotnego; [b] muszli.

Fig. 6. The change diagram of flexural strength [a]fly ash [b] shell.

badaniach właściwości mechanicznych, co mogło wpłynąć na inny stopień zagęszczenia przy wibracyjnym formowaniu próbek a to mogło spowodować bardziej równomierne rozłożenie ziaren popiołu lotnego w betonie i lepszego wypełnienia pustych przestrzeni wewnątrz betonu. Gdy udział popiołu był większy niż 5%, wytrzymałość na zginanie spadała wraz ze wzrostem współczynnika zastąpienia cementu popiołem lotnym. Może to być spowodowane zmniejszeniem ilości cementu w mieszance, mniejszej ilości wodorotlenku wapnia, oraz fazy C-S-H wynikającej z przebiegu reakcji pucolanowej (14). Redukcja zarówno ilości $\text{Ca}(\text{OH})_2$, jak i C-S-H zmniejsza wytrzymałość na zginanie.

3.3.2. Wpływ muszli

Na rys. 6[b] pokazano, że dla serii próbek ze stałą zawartością popiołu lotnego wytrzymałość na zginanie najpierw wzrastała, a następnie malała wraz ze wzrostem zawartości piasku z muszli. Maksymalna wartość wytrzymałości na zginanie wystąpiła, dla udziału 10%. Ponadto wytrzymałość osiągnęła maksimum przy współczynniku zastąpienia cementu popiołem lotnym wynoszącym 5%. Zgodnie z analizą danych, dodanie 20% muszli miało niewielki wpływ na wytrzymałość na zginanie, przy maksymalnym spadku wynoszącym tylko 4,6% [grupa F20-B20]. Można zauważyć, że współczynnik zastąpienia cementu popiołem lotnym wynoszący 5% i współczynnik zastąpienia piasku rzeczno-muszlaami wynoszący 10% jest najbardziej korzystny z punktu widzenia wytrzymałości na zginanie. Wytrzymałość na zginanie wykazywała tendencję najpierw wzrostu, a następnie spadku wraz ze wzrostem udziału muszli, a powody tych zmian zostały wyjaśnione przy analizie wytrzymałości na ściskanie betonu.

3.4. Mikrostruktura

Przeprowadzono analizę mikrostruktury betonów LWAC zawierających popiół lotny i muszle. Makroskopowe zmiany właściwości betonu zostały wytłumaczone w oparciu o obserwację strefy kontaktu kruszywo-zaczyn.

3.4.1. Analiza strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn

Rys. 7 przedstawia mikroskopowe obrazy betonu serii F5-B15. Na podstawie obrazu można zauważyć, że kształt muszli przypominał płatki, które miały większy wymiar i gładką powierzchnię w porównaniu do ziaren piasku rzeczno-muszlaami. Połączenie między muszlami a strefą zaczynu nie wykazuje dobrej przyczepności względem siebie. Ponadto zanotowano liczne pęknięcia w strefie przejściowej między muszlą a zaczynem oraz piaskiem rzeczno-muszlaami i zaczynem. Jednak charakter tych pęknięć był różny. Strefa kontaktowa między muszlą a zaczynem była szersza, z większą liczbą pęknięć, a duże pęknięcia rozciągały się i propagowały do wnętrza matrycy cementowej, podczas gdy strefa kontaktowa między piaskiem rzeczno-muszlaami a matrycą cementową była węższa, z mniejszą liczbą pęknięć.

Rys. 8 przedstawia mikroskopowe obrazy serii F5-B5. Na rys. 8a można zaobserwować, że muszla była precyzyjnie zlokalizowana w szczelinie między zaprawą a keramzytem, co potwierdziło, że

-B20 group]. It is worth noting that the flexural strength exceeds 3.9 MPa at all fly ash replacement ratio and shell substitution ratio.

When the replacement ratio was less than 5 %, the flexural strength gradually rose with the increase of fly ash substitution ratio. The reason may be that the specimen size in the flexural test was larger than that of the cube specimen, and the vibration process was more sufficient, which made the fly ash particles more evenly distributed in the concrete, better filled the voids inside the concrete, and thus slightly improving the flexural strength. When the replacement ratio was greater than 5 %, the flexural strength gradually dropped with the rise of fly ash substitution ratio. This may be due to the reduction of cement in the mixture, there is not enough calcium hydroxide to produce C-S-H through pozzolanic reaction (14). Reduction in both $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and C-S-H quantities decreases the flexural strength.

3.3.2. The influence of shells

It can be seen from Fig. 6[b] that when the replacement ratio of fly ash was constant, the flexural strength increased first and then declined with the rise of shell substitution ratio. The maximum value of flexural strength occurred when the shell replacement ratio was 10 %. Moreover, the flexural strength was maximized at 5 % fly ash substitution ratio for all groups of the substitution ratio of shells. According to data analysis, the addition of 20 % shells had little effect on the flexural strength, with a maximum decrease of only 4.6 % [F20-B20 group]. It can be seen that a fly ash substitution ratio of 5% and a shell replacement ratio of 10 % are most beneficial for the flexural strength.

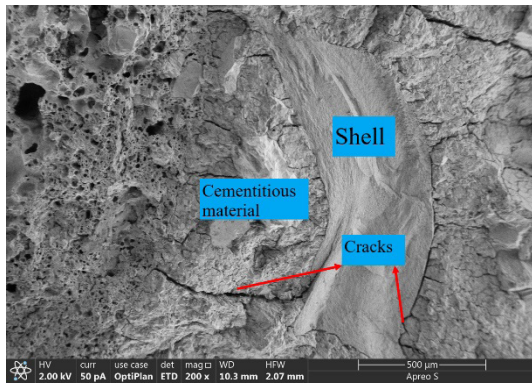
The flexural strength showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of shell replacement ratio, and the reason for this change was similar to the compressive strength of concrete.

3.4. SEM image analysis

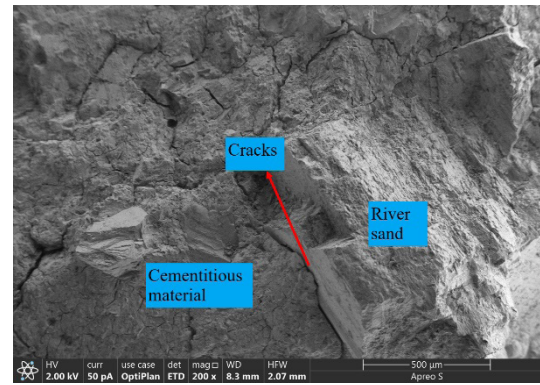
In this section, the micro-analysis of LWAC mixed with fly ash and shell was carried out. The macroscopic laws of concrete strength change was supported by observing the interface transition zone and hydration products.

3.4.1. Analysis of interface transition zone

Fig. 7 showed the microscopic images of group F5-B15. From the image, it can be observed that the shells were mainly in the form of flakes, which had a larger specific surface area and a smooth surface compared to river sand. The connection between the shell and the cementitious material may be unreliable, and there may even be unbonded areas. In addition, there were cracks in the interface transition zone between shell and cementitious material, river sand and cementitious material. However, these two types of cracks were different. The interface between shell and cementitious material was wider, with more cracks, and there were large cracks extending to the cementitious material matrix, while the interface between river sand and cementitious material was narrower, with fewer cracks.



[a]



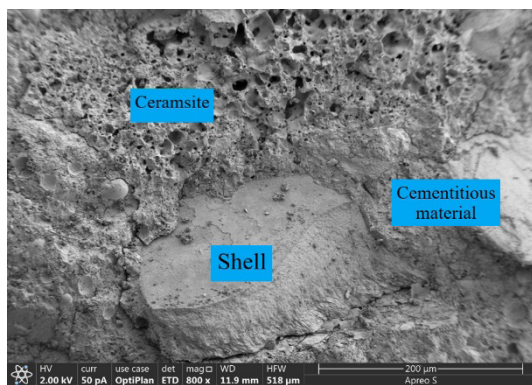
[b]

[a] Pęknięcia w strefie kontaktowej muszla-zaczyn / Cracks in the interface transition zone between shell and cementitious material

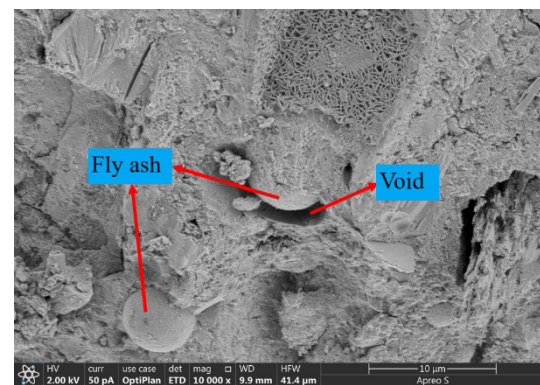
[b] Pęknięcia w strefie kontaktowej piasek-zaczyn / Cracks in the interface transition zone between river sand and cementitious material

Rys. 7. Obrazy mikrostruktury betonu F5-B5.

Fig. 7. Microscopic diagram of F5-B15 group cubic compressive specimens.



[a]



[b]

[a] Pory wypełnione muszlami / Shell filling voids

[b] Pory wypełnione popiołem lotnym / fly ash filling voids

Rys. 8. Obrazy mikrostruktury betonu F5-B5.

Fig. 8. Micrographs of group F5-B5 cubic compressive specimens.

beton mógł stać się bardziej szczelny (2). Jednakże w strefie między muszlami a matrycą cementową występowały liczne pęknięcia. Na rys. 8b można zaobserwować, że niewielka ilość kulistych cząstek popiołu lotnego wypełnia pory wewnątrz betonu i przez to prawdopodobnie zwiększa jego szczelność betonu. Na rys. 7[a] i rys. 8[a] można zauważyć, że muszle mogą pełnić rolę wypełniacza wewnętrznych pustych przestrzeni betonu, ale także wpływają na udział mikropęknięć w matrycy, co może mieć wpływ na wytrzymałość betonu.

3.4.2. Analiza mikrostruktury

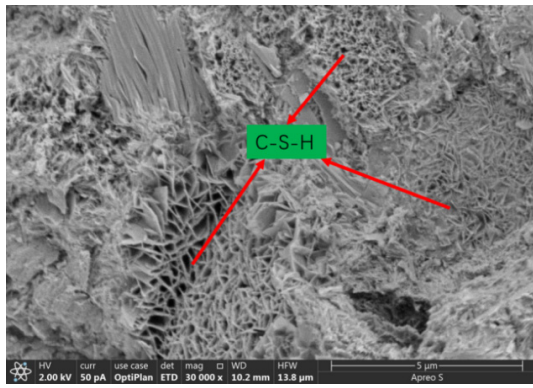
Ponieważ założono, że muszle nie reagują chemicznie ze składnikami betonu, w tej sekcji analizowano jedynie mikroskopowe zmiany w morfologii betonu dla różnych substytucji cementu popiołem lotnym. Rys. 9 do 11 przedstawiają morfologię próbek z serii F0-B5, F10-B5 i F20-B5. Jak pokazano, produkty hydratacji zidentyfikowane w próbce referencyjnej to głównie C-S-H i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (7,17). Udział $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zależy od stopnia rozcieńczenia cementu oraz od reakcji pucolanowej popiołu lotnego, jednakże analiza ilościowa na podstawie SEM jest niemożliwa. W reakcji pucolanowej

Fig. 8 showed the microscopic images of group F5-B5. It can be observed from Figure 8a that the shell was precisely located in the gap between the cementitious material and the ceramsite, which made the concrete more compact to a certain extent (2). However, there were relatively wide cracks between shells and cementitious materials. From Figure 8b, it can be observed that a small amount of spherical fly ash particles can fill the pores inside the concrete and enhance the internal compactness of the concrete.

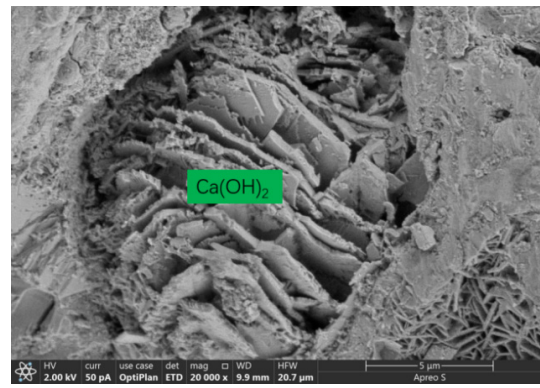
From Fig. 7[a] and Fig. 8[a], it can be seen that the shell not only played the role of filling the internal voids of concrete, but also had a wide crack with the cementitious material. This further confirms the reason why shells affected the strength of concrete as described earlier.

3.4.2. Microstructure analysis

Since the shell did not participate in the internal reaction of concrete, this section only analyzed the microscopic changes in the internal morphology of concrete as the replacement ratio of fly ash gradually increased. Therefore, the cube compressive spe-



[a]

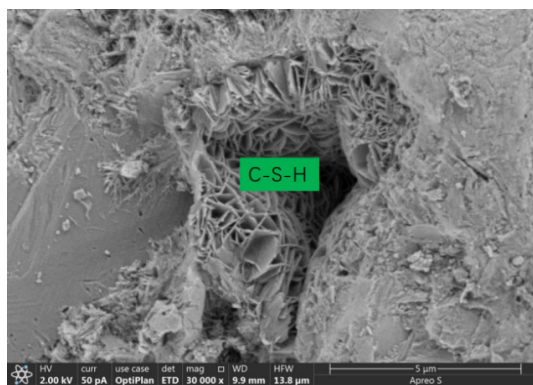


[b]

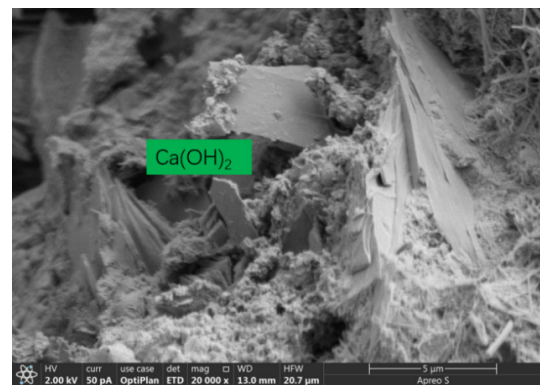
[a] Morfologia C-S-H / The microscopic morphology of C-S-H
 [b] Morfologia Ca(OH)_2 / The microscopic morphology of Ca(OH)_2

Rys. 9. Mikrostruktura betonu F0-B5.

Fig. 9. Microscopic morphology of F0-B5 group cubic compressive specimen.



[a]

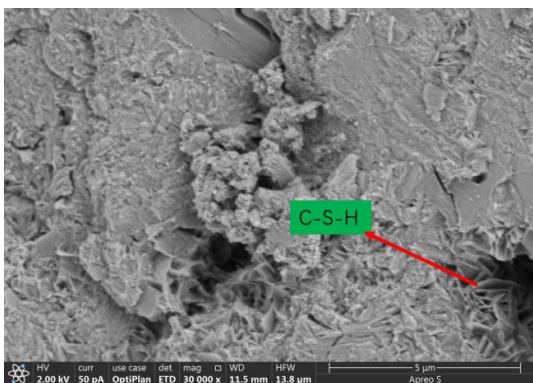


[b]

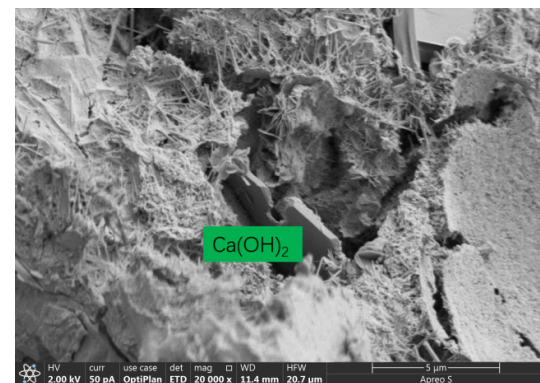
[a] Morfologia C-S-H / The microscopic morphology of C-S-H
 [b] Morfologia Ca(OH)_2 / The microscopic morphology of Ca(OH)_2

Fig. 10. Mikrostruktura betonu F10-B5

Fig. 10. Microscopic morphology of F10-B5 group cubic compressive specimen



[a]



[b]

[a] Morfologia C-S-H / The microscopic morphology of C-S-H [b] Morfologia Ca(OH)_2 / The microscopic morphology of Ca(OH)_2

Rys. 11. Mikrostruktura betonu F20-B5.

Fig. 11. Microscopic morphology of F20-B5 group cubic compressive specimen.

aktywne składniki Al_2O_3 i SiO_2 w popiele lotnym reagują z Ca(OH)_2 powstałym w wyniku hydratacji cementu, tworząc C-S-H i C-A-H. Jest to zgodne z wynikami zaobserwowanymi przez Patela i in. na dyfraktogramie (5). Jednak po 28 dniach dojrzewania nie cały

cimens of F0-B5, F10-B5 and F20-B5 groups were selected for microscopic observation.

Fig. 9 to 11 showed the internal microscopic morphology of the cubic compressive specimens of groups F0-B5, F10-B5 and

popiół lotny ulega reakcji pucolanowej, więc gdy ilość popiołu lotnego wzrosła, udział produktów reakcji pucolanowej nie był wystarczający, aby zrekompensować straty spowodowane zastąpieniem aktywnego cementu mniej aktywnym popiołem lotnym. Dlatego wraz ze wzrostem współczynnika substytucji cementu popiołem lotnym wytrzymałość betonu spada.

3.5. Analiza korelacji właściwości mechanicznych betonów LWAC

3.5.1. Analiza korelacji między wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu

Chińska norma projektowania konstrukcji betonowych [GB50010-2010] podaje odpowiednie wzory opisujące zależność między wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu. Amerykańskie normy: „Building Code Requirements for Structural Concrete [ACI 318-08]” oraz niektórzy naukowcy (25,26) pokazali inne wzory opisujące te relacje, które mają postać funkcji potęgowych, jak pokazano w równaniu [1]. Korzystając z programu Origin do dopasowania danych eksperymentalnych wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na ściskanie, uzyskano współczynniki $a = 0,02827$, $b = 1,29983$ i współczynnik korelacji $R^2 = 0,91$, jak pokazano w równaniu [2]. Krzywa dopasowania między wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu a wytrzymałością na ściskanie została pokazana na rys. 12[a].

$$f_{ts} = a f_{cu}^b \quad [1]$$

gdzie:

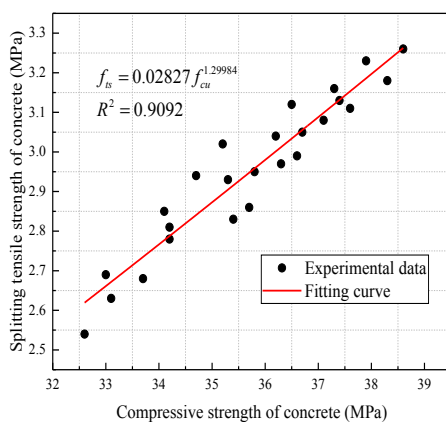
f_{ts} – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa];

f_{cu} – wytrzymałość na ściskanie [MPa];

a i b – stałe.

$$f_{ts} = 0.02827 f_{cu}^{1.29983b}, \quad R^2 = 0.91 \quad [2]$$

gdzie: R^2 – współczynnik korelacji



[a]

Rys. 12. [a] Korelacja zależności wytrzymałości na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, [b] Korelacja zależności wytrzymałości na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie.

F20-B5, respectively. As shown in the figure, hydration products developed in 100% OPC mixture consist typically of the C-S-H and Ca(OH)_2 (7,17). The amount of Ca(OH)_2 depends on the degree of cement dilution and on the pozzolanic reaction of fly ash, but quantitative analysis based on SEM is not possible. In pozzolanic reaction active components as Al_2O_3 and SiO_2 in fly ash reacts with Ca(OH)_2 generated by cement hydration to form C-S-H and C-A-H. This is consistent with the results observed by Patel et al. in the X-ray diffraction pattern (5). However, at 28d, not all fly ash can undergo secondary reactions, so when the amount of fly ash rised, the contribution of secondary reactions was not enough to compensate for the losses caused by replacing cement with fly ash. Therefore, with the increase of fly ash substitution ratio, the strength of concrete gradually decreases.

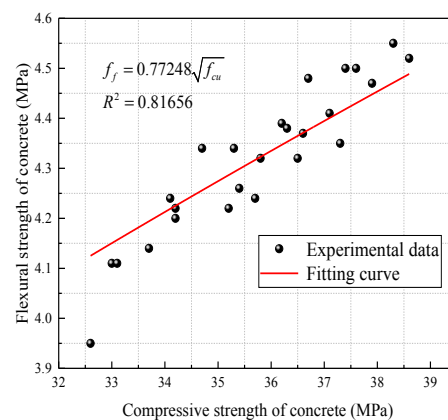
3.5. Correlation analysis of mechanical properties of LWAC

3.5.1. Correlation analysis between compressive strength and splitting tensile strength

The Chinese Code for Design of Concrete Structures [GB50010-2010] provides relevant formulas for the relationship between compressive strength and splitting tensile strength. At the same time, the American Code “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [ACI 318-08]” and some scholars (25, 26) have also provided more applicable relational expressions, which are in the form of power functions, as shown in Eq. [1]. Using Origin to fit the experimental data of splitting tensile strength and compressive strength, $a = 0.02827$, $b = 1.29983$, and a correlation coefficient $R^2=0.91$ were obtained, as shown in Eq. [2]. The fitting curve between the splitting tensile strength and compressive strength was shown in Fig. 12[a].

$$f_{ts} = a f_{cu}^b \quad [1]$$

In the formula: f_{ts} was the splitting tensile strength [MPa]; f_{cu} was the compressive strength [MPa]; a and b were parameters.



[b]

Fig. 12. [a] Fitting curve of compressive strength and splitting tensile strength, [b] Fitting curve of compressive strength and flexural strength.

3.5.2. Analiza korelacji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na zginanie

Istnieje ścisły związek pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na zginanie. Amerykańska norma ACI318-08 podaje odpowiednie równania dla wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie zwykłego betonu. Ponadto Li Xuping podał inne wzory dla zależności wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie betonu z recyklingu na tej podstawie sformułowano równanie [3](27). W tej sekcji skorygowano równania poprzez dopasowanie danych eksperymentalnych. Używając programu Origin do poszukiwania charakteru zależności i dopasowania danych eksperymentalnych wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie, uzyskano współczynniki $a = 0,72248$ i $R^2 = 0,82$, jak pokazano w równaniu [4]. Krzywa dopasowania pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na zginanie została pokazana na rys. 12[b].

$$f_t = a \sqrt{f_{cu}} \quad [3]$$

gdzie:

f_t – wytrzymałość na zginanie [MPa];

f_{cu} – wytrzymałość na ściskanie [MPa];

a – stała.

$$f_t = 0.72248 \sqrt{f_{cu}}, \quad R^2 = 0.81656 \quad [4]$$

gdzie:

R^2 – współczynnik korelacji

3.6. Wzór obliczeniowy opisujący zależność wytrzymałości betonu na ściskanie od udziału popiołu lotnego i muszli w betonie

Brak w dostępnej literaturze publikacji dotyczących opracowania wzoru opisującego zależności wytrzymałości na ściskanie betonu w odniesieniu do udziału masowego popiołu lotnego i muszli w betonie. Autorzy Yang (28) i Hedegaard (29) skupili się na korekcie wzoru Bolomeya, który w rzeczywistości był zależnością liniową między wytrzymałością zwykłego betonu a współczynnikiem wodno-cementowym, jak pokazano w równaniu [5].

$$f_{cu,28} = \alpha_a f_{ce,28} \left(\frac{C}{W} - \alpha_b \right) \quad [5]$$

gdzie:

$f_{cu,28}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie próbek sześciennych betonu po 28 dniach dojrzewania [MPa];

f_{ce} – wytrzymałość na ściskanie cementu po 28 dniach dojrzewania; C/W stosunek spoiwo / woda;

α_a i α_b współczynniki regresji, związane z cementem i kruszywem zastosowanym w betonie.

W związku z tym w tej sekcji zastosowano metodę rozdzielania zmiennych (30) w celu wprowadzenia współczynników substytucji popiołem lotnym i współczynnika substytucji muszlami w celu

$$f_{ts} = 0.02827 f_{cu}^{1.29983b}, \quad R^2 = 0.91 \quad [2]$$

In the formula: R^2 was the correlation coefficient.

3.5.2. Correlation analysis between compressive strength and flexural strength

There was a close relationship between compressive strength and flexural strength. The American Code ACI 318-08 gave the relevant equations for compressive strength and flexural strength of ordinary concrete. Then, Li Xuping provided relevant formulas for the compressive strength and flexural strength of recycled concrete based on this basis, and the formula form was shown in Eq. [3] (27). This section also corrected the parameters by fitting the experimental data in this form. Using Origin to fit the experimental data of compressive strength and flexural strength, $a = 0.72248$ and $R^2 = 0.82$ were obtained, as shown in Eq. [4]. The fitting curve between the compressive strength and flexural strength was shown in Fig. 12[b].

$$f_t = a \sqrt{f_{cu}} \quad [3]$$

In the formula: f_t was the flexural strength [MPa]; f_{cu} was the compressive strength [MPa]; a was parameter.

$$f_t = 0.72248 \sqrt{f_{cu}}, \quad R^2 = 0.81656 \quad [4]$$

In the formula: R^2 was the correlation coefficient.

3.6. Calculation formula for compressive strength of concrete related to fly ash substitution ratio and shell replacement ratio

There are not many studies on the calculation formula for compressive strength of concrete related to fly ash replacement ratio and shell substitution ratio at home and abroad. The research contents of Yang (28) and Hedegaard (29) were based on the correction and improvement of Bolomey's formula, which was actually a linear formula between ordinary concrete and water-cement ratio, as shown in Eq. (5).

$$f_{cu,28} = \alpha_a f_{ce,28} \left(\frac{C}{W} - \alpha_b \right) \quad [5]$$

In the formula: $f_{cu,28}$ was the compressive strength of the concrete cube at 28 days [MPa]; f_{ce} was the measured compressive strength of cement at 28 days; C/W was the ash to water ratio; α_a and α_b were regression coefficients, which were related to the cement and aggregate used.

In view of this, this section used the variable separation method (30) to introduce the fly ash substitution ratio coefficient γ_F and the shell replacement ratio coefficient γ_B to modify Eq. [5]. The revised formula was shown in [6-8].

$$f_{cu,28} = \gamma_F \gamma_B f_{ce} \left(a \frac{C}{W} + b \right) \quad [6]$$

$$\gamma_F = c x_F + d \quad [7]$$

zmodyfikowania równania [5]. Zmieniony wzór przedstawiono we wzorach [6 - 8].

$$f_{cu,28} = \gamma_F \gamma_B f_{ce} \left(a \frac{C}{W} + b \right) \quad [6]$$

$$\gamma_F = cx_F + d \quad [7]$$

$$\gamma_B = cx_B + h \quad [8]$$

Wzór obliczeniowy wytrzymałości na ściskanie betonu w odniesieniu do współczynnika zastąpienia popiołem lotnym i współczynnika zastąpienia muszlami uzyskano poprzez połączenie równań [6] do [8], jak pokazano w równaniu [9].

$$f_{cu,28} = f_{ce} \left(a \frac{C}{W} + b \right) (cx_F + d)(ex_B + h) \quad [9]$$

We wzorze:

x_F – współczynnikiem substytucji popiołem lotnym [%];

x_B – współczynnik substytucji muszlami [%];

f_{ce} – zmierzona wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, z wartością 44,1 MPa w eksperymencie;

C/W – współczynnik spoiwo do wody, który w eksperymencie przyjęto jako 2,857.

Analiza uzyskanych danych wykazała, że zależności między wytrzymałością na ściskanie a współczynnikiem substytucji muszlami nie mają charakteru funkcji liniowej. Dlatego równanie [9] podzielono na dwie sekcje, aby utworzyć model segmentowany, jak pokazano w równaniu [10].

$$f_{cu,28} = \begin{cases} f_{ce} \left(a_1 \frac{C}{W} + b_1 \right) (c_1 x_F + d_1) (e_1 x_B + h_1), & 0 \leq x_B \leq 10 \\ f_{ce} \left(a_2 \frac{C}{W} + b_2 \right) (c_2 x_F + d_2) (e_2 x_B + h_2), & 10 \leq x_B \leq 20 \end{cases} \quad [10]$$

gdzie:

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e_1, e_2, h_1, h_2$ - współczynniki korelacji

Analizę regresji nieliniowej danych eksperymentalnych przeprowadzono przy użyciu programu Origin, a następnie wyprowadzono wzór wytrzymałości betonu na ściskanie w odniesieniu do współczynnika zastąpienia popiołem lotnym i współczynnikiem zastąpienia muszlami, jak pokazano w równaniu [11]. Współczynnik korelacji wynosił 0,91.

$$f_{cu,28} = \begin{cases} f_{ce} \left(0.355 \frac{C}{W} + 0.845 \right) (-0.016 x_F + 3.462) (0.006 x_B + 1.453), & 0 \leq x_B \leq 10 \\ f_{ce} \left(0.341 \frac{C}{W} + 0.768 \right) (-0.012 x_F + 2.496) (-0.012 x_B + 1.803), & 10 \leq x_B \leq 20 \end{cases} \quad [11]$$

Aby dokładniej przeanalizować błąd pomiędzy wartościami eksperymentalnymi i wartościami przewidywanymi ze wzoru, wartości średniego błędu kwadratowego [MSE] obliczono zgodnie z równaniem 12 i naniesiono na wykres zależności wytrzymałości od średniego błędu kwadratowego, jak pokazano na rys. 13.

$$\gamma_B = cx_B + h \quad [8]$$

The calculation formula of concrete compressive strength related to fly ash replacement ratio and shell substitution ratio was obtained by combining equations [6] to [8], as shown in Eq. [9].

$$f_{cu,28} = f_{ce} \left(a \frac{C}{W} + b \right) (cx_F + d)(ex_B + h) \quad [9]$$

In the formula: x_F was the fly ash substitution ratio [%]; x_B was the shell replacement ratio [%]; f_{ce} was the measured compressive strength of cement at 28 days, with a value of 44.1MPa in the experiment; C/W was the ash to water ratio, which was taken as 2.857 in the experiment.

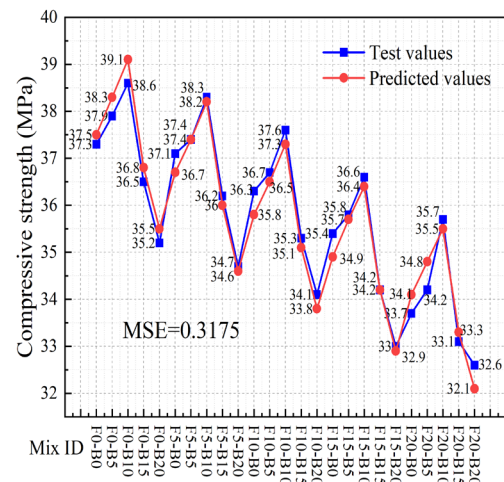
The analysis of the test data showed that the relationship between the compressive strength and the shell substitution ratio cannot be simply regarded as a linear function. Therefore, Eq. [9] was divided into two sections to establish a segmented model, as shown in Eq. [10].

$$f_{cu,28} = \begin{cases} f_{ce} \left(a_1 \frac{C}{W} + b_1 \right) (c_1 x_F + d_1) (e_1 x_B + h_1), & 0 \leq x_B \leq 10 \\ f_{ce} \left(a_2 \frac{C}{W} + b_2 \right) (c_2 x_F + d_2) (e_2 x_B + h_2), & 10 \leq x_B \leq 20 \end{cases} \quad [10]$$

In the formula: $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e_1, e_2, h_1, h_2$ were correction coefficients.

The nonlinear regression analysis of the test data was carried out by using Origin, and then the calculation formula of concrete compressive strength related to fly ash replacement ratio and shell substitution ratio was derived, as shown in Eq. [11]. The correlation coefficient was 0.91.

$$f_{cu,28} = \begin{cases} f_{ce} \left(0.355 \frac{C}{W} + 0.845 \right) (-0.016 x_F + 3.462) (0.006 x_B + 1.453), & 0 \leq x_B \leq 10 \\ f_{ce} \left(0.341 \frac{C}{W} + 0.768 \right) (-0.012 x_F + 2.496) (-0.012 x_B + 1.803), & 10 \leq x_B \leq 20 \end{cases} \quad [11]$$



Rys. 13. Średni błąd kwadratowy - diagram.

Fig.13. Mean Squared Error analysis diagram.

$$MSE = \left[\frac{1}{n} \sum (f_t - f_p)^2 \right]^{0.5} \quad [12]$$

gdzie:

f_t – wartość badana wytrzymałości (MPa); f_p – wartość przewidywana wytrzymałości (MPa); liczba wynosząca 25.

Im wartość MSE jest bliższa 0, tym wyższy stopień zgodności. Jak widać na rysunku 13, wartość MSE dla równania 11 jest mniejsza. Większa wartość R^2 i mniejsza wartość MSE wskazują na wysoki stopień zgodności między wartościami przewidywanymi i badanymi, co dowodzi dobrego dopasowaniu modelu przewidywania wytrzymałości betonu na ściskanie.

4. Wnioski

W artykule przeprowadzono badania doświadczalne dotyczące właściwości mechanicznych i modelu obliczeniowego dla betonów lekkich LWAC zawierających popiół lotny i muszle. Na ich podstawie sformułowano następujące wnioski.

1. Wraz ze wzrostem dodatku popiołu lotnego w betonie wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu wykazywały tendencję malejącą. Jednak zmniejszenie wytrzymałości nie było znaczne. Gdy udział wynosił 5%, maksymalne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie wyniosło 1,4% [seria F5-B20], podczas gdy spadek wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wyniósł 3,1% [seria F5-B5].
2. Wraz ze wzrostem udziału muszli, wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu wykazywały najpierw tendencję wzrostu, a następnie spadku, osiągając maksymalną wartość przy udziale 10%.
3. Wytrzymałość betonu na zginanie wykazywała najpierw tendencję wzrostu, a następnie spadku wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego, jak również przy zwiększeniu udziału muszli i osiągnęła maksymalną wartość dla betonów z 5% udziałem popiołu lotnego i 10% udziałem muszli.
4. Optymalny udział popiołu lotnego i muszli dla lekkich betonów LWAC wynosił odpowiednio 5% i 10%. W porównaniu z grupą kontrolną [F0-B0] wytrzymałość na ściskanie grupy F5-B10 wzrosła o 2,7%, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wzrosła o 0,6%, a wytrzymałość na zginanie wzrosła o 4,6%.
5. Wytrzymałość na ściskanie wykazywała dobrą korelację z wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałością na zginanie, ze współczynnikami korelacji wynoszącymi odpowiednio 0,91 i 0,82.
6. Wzór obliczeniowy opisujący zależność wytrzymałości na ściskanie betonu w odniesieniu do udziału popiołu lotnego i muszli miał dobre dopasowanie. Współczynnik korelacji wyniósł 0,91.

Konflikty interesów

Autorzy oświadczają, że nie występują żadne konflikty interesów.

To further analyze the error between the experimental values and the predicted values of the formula, the Mean Squared Error [MSE] values were calculated according to Eq. 12 and plotted on the mean squared error graph as shown in Fig. 13.

$$MSE = \left[\frac{1}{n} \sum (f_t - f_p)^2 \right]^{0.5} \quad [12]$$

In the formula, f_t test value (MPa); f_p - predicted value (MPa); takes a value of 25.

The closer the MSE value is to 0, the higher the degree of agreement. As can be seen from Figure 13, the MSE value of Eq. 11 is smaller. The larger R^2 value and the smaller MSE value indicate a high degree of agreement between the predicted and test values, which demonstrating the good applicability of the concrete compressive strength prediction model.

4. Conclusions

This article conducted experimental research on the mechanical properties and calculation model of LWAC mixed with fly ash and shells. The following conclusions were drawn.

1. With the increase of fly ash replacement ratio, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete showed a gradually decreasing trend. However, the reduction was not significant. When the substitution ratio was 5 %, the maximum reduction in compressive strength was only 1.4 % [F5-B20 group] while splitting tensile strength was only 3.1 % [F5-B5 group].
2. With the rise of shell substitution ratio, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete showed a trend of first increasing and then decreasing, and reaching the maximum value at the replacement ratio of 10 %.
3. The flexural strength of concrete showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of both fly ash and shell replacement ratio, and reached its maximum value at a fly ash substitution ratio of 5 % and a shell replacement ratio of 10 %, respectively.
4. The optimum fly ash substitution ratio and shell replacement ratio for LWAC were 5 % and 10 %, respectively. Compared to the control group [F0-B0], the compressive strength of the F5-B10 group increased by 2.7 %, the splitting tensile strength risen by 0.6 %, and the flexural strength increased by 4.6 %.
5. The compressive strength had a good correlation with the splitting tensile strength and flexural strength, with correlation coefficients of 0.91 and 0.82, respectively.
6. The calculation formula for compressive strength of concrete related to fly ash substitution ratio and shell replacement ratio had high accuracy. The correlation coefficient was 0.91.

Competing interests

The authors declare there are no competing interests.

Literatura/ References

1. P. Chen, Z. Shi, S. Cao, P. Liu, X. Rong, L. Wang, Mechanical properties of alkali-activated slag lightweight aggregate concrete. *J. Clean. Prod.* **359**. (2022). <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132136>
2. J. Guo, K. Yuan, J. Xu, Y. Wang, D. Gan, M. He, The Workability and Mechanical Performance of Fly Ash Cenosphere-Desert Sand Ceramsite Concrete: An Experimental Study and Analysis. *Materials* **16**(3), 1298 (2023). <http://doi.org/10.3390/ma16031298>
3. Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi, A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth Sci. Rev.* **141**, 105-121 (2015). <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
4. Y. Gao, J. Long, H. Liu, H. Zhang, Y. Li, Mechanical performance and microstructure of fly ash lightweight aggregate concrete under sulfate attack. *J. Build. Mater.* **17**(3), 389-395 (2014).
5. J. Patel, H. Patil, Y. Patil, G. Vesmawala, Strength and transport properties of concrete with styrene butadiene rubber latex modified lightweight aggregate. *Constr. Build. Mater.* **195**, 459-467 (2019). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.092>
6. X. Wang, X. Shen, Experimental study on strength of lightweight aggregate concrete with different contents of fly ash. *Bull. Chinese Ceram. Soc.* **30**(1), 69-73 (2011). <http://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2011.01.008>
7. B.A. Tayeh, M.W. Hasaniyah, A.M. Zeyad, M.O. Yusuf, Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review. *J. Clean. Prod.* **237**, 117723 (2019). <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117723>
8. E.-I. Yang, M.-Y. Kim, H.-G. Park, S.-T. Yi, Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. *Constr. Build. Mater.* **24**(5), 758-765 (2010). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.032>
9. H. Chen, Y. Zeng, P. Chen, D. Zhong, Z. Lin, Effect and mechanism of oyster shell on permeability of C40 concrete. *Concrete* **2022**(1), 101-105. (2022). <http://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3550.2022.01.023>
10. D. Wang, Q. Zhao, C. Yang, Y. Chi, W. Qi, Z. Teng, Study on frost resistance and vegetation performance of seashell waste pervious concrete in cold area. *Constr. Build. Mater.* **265**, 120758 (2020). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120758>
11. K.H. Mo, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, S.C. Lee, W.I. Goh, C.W. Yuen, Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* **162**, 751-764 (2018). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>
12. U.G. Eziefula, J.C. Ezech, B.I. Eziefula, Properties of seashell aggregate concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* **192**, 287-300 (2018). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096>
13. T.-T. Chen, W.-C. Wang, H.-Y. Wang, Mechanical properties and ultrasonic velocity of lightweight aggregate concrete containing mineral powder materials. *Constr. Build. Mater.* **258**, 119550 (2020). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119550>
14. P. Shafiqh, M.A. Nomeli, U.J. Alengaram, H.B. Mahmud, M.Z. Jumaat, Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash. *J. Clean. Prod.* **135**, 148-157 (2016). <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.082>
15. E. Güneyisi, M. Gesoglu, T. Özturan, S. İpek, Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber. *Constr. Build. Mater.* **84**, 156-168 (2015). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.054>
16. B.A. Tayeh, M.W. Hasaniyah, A.M. Zeyad, M.M. Awad, A. Alaskar, A.M. Mohamed and R. Alyousef, Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement. *J. Build. Eng.* **31**, 101328 (2020). <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101328>
17. A.M. Maglad, M.A. Othuman Mydin, S. Dip Datta, B.A. Tayeh, Assessing the mechanical, durability, thermal and microstructural properties of sea shell ash based lightweight foamed concrete. *Constr. Build. Mater.* **402**, 133018 (2023). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133018>
18. G.O. Bamigboye, U.E. Okechukwu, D.O. Olukanni, D.E. Bassey, U.E. Okorie, J. Adebesein, K.J. Jolayemi, Effective Economic Combination of Waste Seashell and River Sand as Fine Aggregate in Green Concrete. *Sustainability*, **14**(19), 12822 (2022). <http://doi.org/10.3390/su141912822>
19. C. Varhen, S. Carrillo, G. Ruiz, Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Constr. Build. Mater.* **136**, 533-540. (2017). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.067>
20. G.O. Bamigboye, O. Okara, D.E. Bassey, K.J. Jolayemi, D. Ajimalofin, The use of *Senilia senilis* seashells as a substitute for coarse aggregate in eco-friendly concrete. *J. Build. Eng.* **32**, 101811 (2020). <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101811>
21. F.Z. Melais, K. Dorbani, N. Arabi, D. Achoura, The use of marine seashells as aggregates in pervious concretes. *Cem. Wapno Beton* **28**(2) 76-91 (2023). <http://doi.org/10.32047/cwb.2023.28.2.2>
22. A. Hart. Mini-review of waste shell-derived materials' applications. *Waste Manag Res.* **38**(5), 514-527. (2020). <http://doi.org/10.1177/0734242X19897812>
23. E.-I. Yang, S.-T. Yi and Y.-M. Leem, Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties. *Cem. Concr. Res.* **35**(11), 2175-2182 (2005). <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.016>
24. Y. Zhou, G. Wu, X. Zheng, J. Xu, S. Wang, Y. Huang, R. Bi, Research on the influence mechanism of oyster shells used as partial aggregate replacement in concrete. *Concrete* **2021**(1), 73-76 (2021).
25. J. Xiao, Y. Huang, Residual Compressive Strength of Recycled Concrete after High Temperature. *J. Build. Mater.* **2006**(3), 255-259 (2006).
26. Y.K. Zhang, Y.C. Wang, X.L. Wu, Experimental Study on Compressive Strength and Flexural Strength of Combined Aggregate Concrete. *Adv. Mater. Res.* **1065-1069**, 1899-1902 (2014). <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.1899>
27. X. Li. Study on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete (II). *J. Build. Mater.* **2007**(6), 699-704 (2007).
28. Q. Yang, X. Wu, L. Zhang. Two Variable Strength Formula of Fly Ash Concrete. *J. Build. Mater.* **2002**(2), 186-189 (2002).
29. S. E. Hedegaard, T. C. Hansen, Modified water/cement ratio law for compressive strength of fly ash concretes. *Mater. Struct.* **25**, 273-283. (1992).
30. L.F. Yang, R. Cai, B. Yu, Investigation of computational model for surface chloride concentration of concrete in marine atmosphere zone. *Ocean Eng.* **138**, 105-111 (2017). <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.024>