

Badanie zdolności do dyspersji, konsystencji oraz podstawowych właściwości mechanicznych betonu ultrawysokowartościowego modyfikowanego wielowarstwowym tlenkiem grafenu

Study on dispersibility, fluidity, and basic mechanical properties of ultra-high performance concrete modified by multilayer graphene oxide

Jun Liu¹, Faith Abudi Bitengo¹, Tan Li^{2*}, Guo Luo¹, Jiaqi Zhou¹, Yijian Zhan³

¹School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, 516 Jungong Road, Yangpu District, Shanghai 200093, China

²College of Civil Engineering, Tongji University, 1239 Siping Road, Yangpu District, Shanghai 200092, China

³Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China

*corresponding author: T. Li, e-mail: litan@tongji.edu.cn

Streszczenie

Za pomocą spektrofotometrii w ultrafiolecie zbadano dyspersję wielowarstwowego tlenku grafenu [MGO] w wodzie dejonizowanej oraz w nasyconej wodzie wapiennej. Przeanalizowano próbki dyspersji MGO powstałej przy różnych mocach ultradźwięków oraz różnych udziałach superplastyfikatora polikarboksyłowego [SP]. Wyniki wskazują, że dyspersja MGO w wodzie dejonizowanej jest lepsza niż w nasyconej wodzie wapiennej. Dyspersja MGO w wodzie dejonizowanej i nasyconej wodzie wapiennej jest najlepsza gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4. Zbadano właściwości reologiczne i mechaniczne betonu ultrawysokowartościowego [UHPC] modyfikowanego MGO. Konsystencję betonu UHPC modyfikowanego MGO można poprawić poprzez obróbkę ultradźwiękową i dodanie SP. Gdy moc ultradźwięków wynosi 400 W, a zawartość MGO 0,02% mas., wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC jest najwyższa.

Słowa kluczowe: wielowarstwowy tlenek grafenu, beton ultrawysokowartościowy, dyspersja, konsystencja, podstawowe właściwości mechaniczne

Summary

The dispersion of multilayer graphene oxide [MGO] in deionized water and saturated lime water was studied by ultraviolet spectrophotometry. The MGO dispersion samples with different ultrasonic power and different dosages of polycarboxylic acid superplasticizer [SP] were studied. The results show that the dispersion of MGO in deionized water is better than that in saturated lime water. When the mass ratio of MGO to SP is 0.4, the dispersion of MGO in deionized water and saturated lime water is the best. The flow properties and compressive and flexural properties of MGO-modified ultra-high performance concrete [UHPC] were studied. The fluidity of MGO-modified UHPC can be improved by ultrasonic treatment and SP incorporation compared with the control samples without ultrasonic treatment and SP incorporation. When the ultrasonic power is 400 W and the MGO content is 0.02 wt.%, the compressive strength and flexural strength of UHPC are the highest.

Keywords: multilayer graphene oxide, ultra-high performance concrete, dispersion, fluidity, basic mechanical properties

1. Wprowadzenie

Beton ultrawysokowartościowy [UHPC] to kompozyt cementowy, o wysokiej wytrzymałości, dużej odporności na pękanie oraz dobrej trwałości. Ma szerokie perspektywy zastosowania w konstrukcjach wieżowców oraz konstrukcjach o dużych rozpiętościach (1). UHPC może składać się z cementu, pyłu krzemionkowego, proszku

1. Introduction

Ultra-high performance concrete [UHPC] is a new cement-based material with high strength, high toughness, and high durability. It has broad application prospects in high-rise structures and long-span structure (1). UHPC is composed of cement, silica fume, quartz powder, microbeads, steel fiber, and so on. The pores of

kwarcowego, mikrosfer, włókien stalowych i innych składników. W UHPC występują głównie mikropory i pory średnie. Wielkość porów wynosi zazwyczaj mniej niż 100 nanometrów. Wielkość porów średnich mieści się zazwyczaj w przedziale od 0,1 do 10 mikronów. Nanomateriały charakteryzują się małą objętością, dużą powierzchnią właściwą oraz wysoką energią powierzchniową. Skład produktów hydratacji cementu w UHPC oraz mikrostrukturę można regulować poprzez dodawanie nanomateriałów. Powyższe zmiany sprawiają, że mikrostruktura UHPC staje się bardziej regularna i gęsta, co dodatkowo poprawia jego właściwości mechaniczne (1–5).

Tlenek grafenu [GO], jako pochodna grafenu (6), posiada na swojej powierzchni i krawędziach dużą liczbę grup funkcyjnych zawierających tlen, takich jak -OH, -COOH i -C=O. Ze względu na jonizację grup -OH i -COOH w wodzie powierzchnia GO w roztworze dyspersyjnym jest naładowana ujemnie. Ze względu na odpychanie między ładunkami ujemnymi, GO może być stabilnie zdyspergowany w wodzie (7). Dzięki dodaniu GO można poprawić właściwości mechaniczne materiałów cementowych (8). Jednak ze względu na obojętność chemiczną i wysoce hydrofobowy charakter warstwy GO łatwo ulega ona oddzieleniu od cementu, co osłabia jej działanie wzmacniające. Zaczyn cementowy ma zazwyczaj silnie zasadowy odczyn. GO ma skłonność do wchodzenia w złożone reakcje z jonami Ca^{2+} zawartymi w zaczynie (9). W związku z tym GO nie może być równomiernie i stabilnie zdyspergowane w zaczynie cementowym. Aby w pełni wykorzystać wzmacniające działanie GO na zaczyn cementowy, szczególnie ważne jest poprawienie dyspersji GO w zaczynie.

W ostatnich latach naukowcy przeprowadzili wiele badań dotyczących zdolności dyspersji GO w roztworze. Li i in. (10) przeprowadzili badania metodą AFM na warstwach GO osadzonych na płytkach krzemowych. Wyniki pokazują, że czas działania ultradźwięków ma duży wpływ na zdolność dyspersji GO w roztworze i istnieje optymalny czas działania ultradźwiękami na dyspersję [OUT]. Duan i in. (11) badali dyspersję GO w roztworze za pomocą spektrofotometrii UV. Wyniki pokazują, że wydłużenie czasu działania ultradźwięków i zwiększenie mocy (12) może skutecznie poprawić dyspersję GO w roztworze. W funkcji zależności czasu działania ultradźwięków na zdolność dyspersji występuje plateau. Gdy czas działania ultradźwięków osiąga plateau, dalsze wydłużanie czasu działania ultradźwięków na zawiesinę ma niewielki wpływ na dyspersję GO. Dalsze zwiększanie częstotliwości ultradźwięków ma znikomy wpływ na stabilność i dystrybucję GO w roztworze.

Biorąc pod uwagę problem łatwego aglomerowania się GO w roztworze alkalicznym, naukowcy przeprowadzili również wiele badań. Liu i in. (13) wykorzystali spektroskopię XPS do ilościowego oznaczenia zawartości tlenu w GO oraz zbadali właściwości dyspersyjne GO w silnie alkalicznym roztworze. Wyniki pokazują, że grupy funkcyjne GO mogą pozostawać stabilne przez krótki czas w silnie zasadowym roztworze zaczynu cementowego. Guo i in. (14) zbadali zdolność dyspersji GO w roztworach $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCl_2 i NaOH . Wyniki wskazują, że głównym czynnikiem powodującym aglomerację GO w zaprawie cementowej w środowisku zasa-

UHPC mainly include micropores and medium pores. Microscopic pore sizes are generally less than 100 nanometers. The medium pore size is generally between 0.1 and 10 microns. Nanomaterials have the characteristics of small volume, large specific surface area, and high surface energy. The composition of cement hydration products in UHPC and the microstructure of cement can be adjusted by adding nanomaterials into UHPC. The above changes make the microstructure of UHPC more regular and dense, thus further improving its mechanical properties (1-5).

Graphene oxide [GO], a derivative of graphen (6), has a large number of oxygen-containing functional groups such as -OH, -COOH, and -C=O on its surface and edge. Because of the ionization of -OH and -COOH in water, the surface of GO in the dispersion solution is negatively charged. Due to electrostatic repulsion between negative charges, GO can be stably dispersed in water (7). With the addition of GO, the mechanical properties of cement-based materials can be improved (8). However, due to the chemical inertness and highly hydrophobic nature of the GO layer, it is easy to dissociate from the cement, which weakens its strengthening effect. The cement paste is usually strongly alkaline. GO is prone to complex reactions with Ca^{2+} in cement (9). Therefore, GO cannot be uniformly and stably dispersed in the cement paste. To make full use of the strengthening effect of GO on cement paste, it is particularly important to improve the dispersibility of GO in cement paste.

In recent years, scholars have conducted a lot of research on the dispersibility of GO in solution. Li et al. (10) conducted AFM tests on GO chips deposited on silicon wafers. The results show that the ultrasonic duration has a great influence on the dispersibility of GO in solution, and there is an optimal ultrasonic time [OUT]. Duan et al. (11) studied the dispersion of GO in solution by using ultraviolet spectrophotometry. The results show that increasing the ultrasonic time and power (12) can effectively enhance the dispersion of GO in solution. The influence of ultrasonic duration on dispersibility exists in the platform segment. When the ultrasound duration reaches the platform segment, the increase in the ultrasound duration has little effect on the dispersion of GO. Further increase of ultrasonic frequency has a negligible effect on the dispersion of GO in solution.

Given the problem that GO is easy to agglomerate in an alkaline solution, scholars have also carried out a lot of research. Liu et al. (13) used XPS to quantitatively detect the oxygen content of GO and studied the dispersion performance of GO in a strong alkaline solution. The results show that the GO functional group can remain stable for a short time in the strong alkaline solution of cement paste. Guo et al. (14) studied the dispersibility of GO in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution, CaCl_2 solution, and NaOH solution. The results show that the main factor that causes GO to agglomerate in cement paste in an alkaline environment is its complexation with Ca^{2+} . Duan et al. (15) studied the dispersibility of GO in alkaline pore solutions simulated by several ions by ultraviolet spectrophotometry and carried out surfactant compatibility tests. The results show that agglomeration occurs when GO is in contact with a simulated

dowym jest jego kompleksowanie z jonami Ca^{2+} . Duan i in. (15) zbadali dyspersyjność GO w alkalicznych roztworach porowych symulowanych przez różne jony za pomocą spektrofotometrii UV-VIS oraz przeprowadzili testy kompatybilności z surfaktantami. Wyniki wskazują, że aglomeracja zachodzi, gdy GO styka się z symulowanym alkalicznym roztworem porowym. Surfaktanty mogą poprawić dyspersję GO w symulowanych alkalicznych roztworach porowych.

Właściwości reologiczne oraz podstawowe właściwości mechaniczne materiałów cementowych modyfikowanych tlenkiem grafenu [GO] były również przedmiotem badań wielu naukowców. Regev i in. (16) przeprowadzili badania dotyczące wytrzymałości na ściskanie zaczynu cementowego modyfikowanego grafenem. Wyniki pokazują, że przy zawartości grafenu wynoszącej 0,02% mas. dodatek SP może zwiększyć wytrzymałość na ściskanie zaczynu cementowego o 15% do 37%. Jednocześnie dodanie SP może poprawić konsystencję zaczynu modyfikowanego GO. Liu i in. (17) zmodyfikowali GO za pomocą polikarboksylianów [PCE] i przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące dyspersji zmodyfikowanego GO [PCE-GO] w roztworze porowym zaczynu. Wyniki pokazują, że dyspersja GO w roztworze porowym ulega poprawie dzięki zawadzie sterycznej i odpychaniu elektrostatycznemu. Jednocześnie poprawiła się konsystencja oraz podstawowe właściwości mechaniczne zaczynu cementowego. Aby poprawić konsystencję betonu modyfikowanego GO, Reddy i in. (18) wykorzystali popiół lotny jako dodatek mineralny w swoich badaniach. Wyniki wskazują, że konsystencję betonu modyfikowanego GO można poprawić poprzez dodanie popiołu lotnego. Gdy zawartość popiołu lotnego wynosi 20% mas., właściwości mechaniczne po 7 i 28 dniach są lepsze niż w grupie kontrolnej. Liu i in. (19) zbadali wpływ grafenu [GO], pyłu krzemionkowego [SF] oraz pyłu krzemionkowego pokrytego tlenkiem grafenu [GO-SF] na właściwości reologiczne zaczynu cementowego. Wyniki wskazują, że GO może znacząco zmniejszyć rozptył zaczynu cementowego. Przy tej samej zawartości SF zaczyn cementowy z GO-SF wykazuje lepszy rozptył niż ten z SF. Zahabi i in. (20) zmodyfikowali GO do postaci aminowanego GO za pomocą chemicznej modyfikacji powierzchniowej. Został on dodany do zaczynu cementowego jako dodatek. Wyniki pokazują, że aminowany GO charakteryzuje się większą hydrofilowością, a jego strefa kontaktu z zaczynem cementowym jest bardziej zwarta, co pozwala zmniejszyć liczbę szkodliwych porów oraz poprawić wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Gdy zawartość aminowanego GO wynosi 0,15% mas., wytrzymałość na zginanie po 28 dniach oraz wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wzrastają odpowiednio o 4,3% i 13,8% w porównaniu z próbkami z taką samą ilością GO.

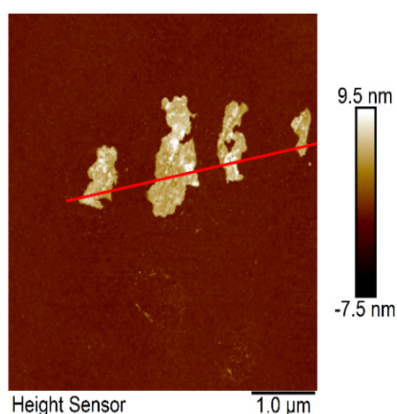
MGO wykazuje cechy charakterystyczne dla nanomateriałów, co pozwala znacznie poprawić właściwości mechaniczne kompozytów cementowych. Jednocześnie MGO jest tańszy (21). Podobnie jak GO, MGO ma również skłonność do aglomeracji w cemencie, co wpływa na właściwości mechaniczne (22). W ostatnich latach w badaniach analizowano wpływ GO wprowadzonego do betonu UHPC, wykazując jego efekt na proces hydratacji, udoskonalanie struktury porów oraz zwiększanie wytrzymałości i odporności na

alkaline pore solution. Surfactants can improve the dispersibility of GO in simulated alkaline pore solutions.

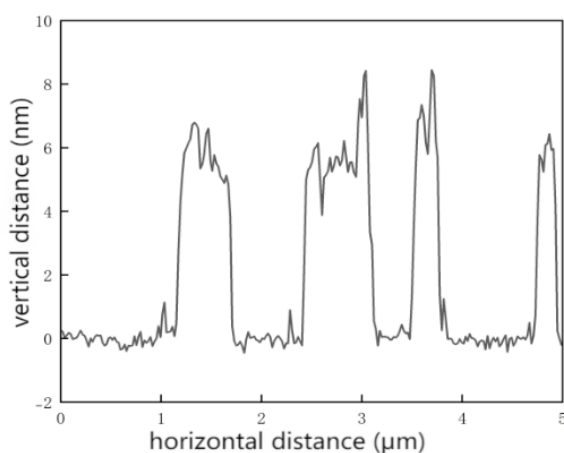
The flow properties and basic mechanical properties of GO-modified cement-based materials have also been studied by many scholars. Regev et al. (16) conducted an experimental study on the compressive strength of GO-modified cement paste. The results show that when the amount of GO is 0.02 wt.%, the addition of SP can increase the compressive strength of the cement paste from 15 % to 37 %. At the same time, the addition of SP can improve the fluidity of GO-modified cement paste. Liu et al. (17) modified GO through polycarboxylate [PCE] and conducted an experimental study on the dispersion of the modified GO [PCE-GO] in cement pore solution. The results show that the dispersion of GO in cement pore solution is improved by the steric hindrance effect and electrostatic repulsion. At the same time, the fluidity and basic mechanical properties of the cement paste were improved. To improve the fluidity of GO-modified concrete, Reddy et al. (18) used fly ash as a mineral admixture for research. The results show that the fluidity of GO-modified concrete can be improved by adding fly ash. When the fly ash content is 20 wt.%, the mechanical properties of 7d and 28d are better than those of the control group. Liu et al. (19) studied the effects of GO, silica powder [SF], and graphene oxide-coated silica powder [GO-SF] on the flow performance of cement paste. The results show that GO can significantly reduce the fluidity of cement paste. At the same SF content, the cement paste mixed with GO-SF has better fluidity than that mixed with SF. Zahabi et al. (20) modified GO through amination of GO by chemical surface modification method. It was added to the cement paste as an additive, and the experiment was carried out. The results show that aminated GO has stronger hydrophilicity, and its interface with cement paste is closer, which can reduce the number of harmful pores and improve compressive and flexural strength. When the amination GO content is 0.15 wt%, the 28d flexural strength and 28d compressive strength of the cement paste are increased by 4.3 % and 13.8 % respectively compared with the same amount of GO.

MGO has the characteristics of nanomaterials, which can significantly improve the mechanical properties of cement-based materials. At the same time, MGO is cheaper (21). Similar to GO, MGO is also prone to agglomeration in cement, thus affecting the improvement of its mechanical properties (22). In recent years, studies have examined the incorporation of GO into UHPC, demonstrating its ability to regulate hydration reactions, refine pore structure, and enhance strength and toughness (8, 16, 9). However, existing investigations primarily focus on monolayer or few-layer GO, while research on MGO remains limited. Compared with GO, MGO exhibits larger sheet dimensions, higher structural stability, lower production cost, and enhanced crack-bridging potential, giving it unique advantages for UHPC modification (21, 23). Despite these benefits, MGO faces similar dispersion challenges in highly alkaline and Ca^{2+} rich UHPC pore solutions, where agglomeration and complexation reactions restrict its reinforcing effects (9, 14, 22). At present, systematic evaluations of how ultrasonic energy and SP jointly influence MGO dispersion and its subsequent mechanical

pękanie (8, 16, 9). Jednak dotychczasowe badania skupiają się głównie na jednowarstwowym lub kilkuwarstwowym GO, podczas gdy badania nad MGO pozostają ograniczone. W porównaniu z GO, MGO charakteryzuje się większymi wymiarami płatków, wyższą stabilnością strukturalną, niższymi kosztami produkcji oraz zwiększonym potencjałem mostkowania pęknięć, co nadaje mu wyjątkowe zalety w modyfikacji betonu UHPC (21, 23). Pomimo tych korzyści, stosowanie MGO napotyka podobne wyzwania związane z dyspersją w silnie alkalicznych i bogatych w Ca^{2+} roztworach porowych betonu UHPC, gdzie aglomeracja i kompleksowanie ograniczają jego działanie wzmacniające (9, 14, 22). Obecnie brakuje systematycznych ocen dotyczących tego, w jaki sposób energia ultradźwięków i jednoczesne stosowanie SP wpływają na dyspersję MGO oraz jej późniejszy wpływ na właściwości mechaniczne w UHPC. W związku z tym niniejsze badania miały na celu wypełnienie tych luk poprzez ilościową ocenę zdolności dyspersji MGO przy różnych mocach ultradźwięków i różnych stosunkach masowych MGO/SP oraz zbadanie, w jaki sposób te właściwości dyspersyjne wpływają na konsystencję, wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC. Oczekiwano, że niniejsza praca pozwoli wyjaśnić zależności między dyspersją MGO a właściwościami użytkowymi oraz dostarczy praktycznych strategii dotyczących jego skutecznego zastosowania w betonie UHPC.



[a] AFM chart



[b] Transverse dimensions

Rys. 1. Wymiary płatków MGO (23).

Fig. 1. Dimensions of the MGO flakes (23).

contribution to UHPC are lacking. Therefore, this study aims to address these gaps by quantitatively assessing MGO dispersibility under different ultrasonic powers and MGO/SP mass ratios and investigating how these dispersion characteristics affect the fluidity, compressive strength, and flexural properties of UHPC. This work is expected to clarify the dispersion performance relationships of MGO and provide practical strategies for its effective use in UHPC.

2. Experimental

2.1. Materials

In this study, MGO powder was used, provided by Suzhou Carbon Graphene Technology Co., Ltd, with purity greater than 95 wt.%, oxygen content of 30.9 %, black-brown color, and specific surface area of 100-300 m^2/g . AFM map of MGO, see Fig. 1. The sheet size of MGO is 10-50 μm , its average thickness is about 6 nm, the monolayer thickness of GO is 0.6-1.2 nm, and the number of sheet layers of MGO is 6-10.

The test was carried out using UHPC produced by Zhengzhou Yijian New Materials Co., Ltd. Cement grade P52.5 was used. The chemical composition of the cement is shown in Table 1, and the physical properties of the cement are shown in Table 2. The mixing ratios of UHPC are shown in Table 3. The performance index of silica fume is SF90, with a SiO_2 content of 90 %. The residue of the 45 μm square hole sieve is 4.5 %, and the specific surface area is 18 600 m^2/kg . The grade of fly ash is grade I. The residue of the 45 μm square hole sieve is 11 %. The aggregate should be quartz sand with a maximum particle size not exceeding 1.25 mm. Quartz sand can be classified into three particle size grades based on particle size, coarse particle size sand [1.25 mm-0.63 mm], medium particle size sand [0.63 mm-0.315 mm], and fine particle size sand [0.315 mm-0.16 mm]. The fineness modulus is 1.6-2.2.

The water-reducing agent used in the test was a polycarboxylic acid high-efficiency water-reducing agent [SP] QS-8020, with a water-reducing rate of ≥ 23 % provided by Shanghai Qinhe Chemical Co. Its physical and chemical indicators are shown in Table 4.

The test was conducted with high-purity deionized water from Zhejiang Wenzhou Honghuang Power Co. The conductivity is ≤ 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The resistivity is close to 18.3 $\text{M}\Omega/\text{cm}$, which belongs to the first class of experimental water. The test was carried out using fibers produced by Zhengzhou Yejian New Materials Co. Ltd, in which the polyethylene [PE] fiber diameter was 0.015 mm and the length was 12 mm. The density of PE fiber is 1.3 kg/m^3 , tensile strength of PE fibers is 767 MPa, modulus of elasticity is 85 GPa, and elongation is 20 %. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produced by Tianjin Zhiyuan Chemical Reagent Co., Ltd. used in the test had a purity greater than 95 %, a solubility of 0.16 g in 100 ml of water at room temperature, and a pH of 13 in saturated solution. The indicators of their impurity content are shown in Table 5.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU.

CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT.

Skład chemiczny / Chemical composition	CaO	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	LOI
Udział / Content, %	64.90	2.66	19.91	3.00	0.65	0.81	4.41	0.09	2.92

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU.

PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT.

Właściwość fizyczna Physical property	Powierzchnia właściwa Specific surface area, m ² /kg	Wodozjadność Standard consistency of water consumption, %	Czas wiązania Setting time, min		Wytrzymałość na zginanie Flexural strength, MPa		Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	
			Początek / Initial setting time	Koniec / Final setting time	3d	28d	3d	28d
			133	187	6.6	9.5	34	60.7

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK UHPC. [JEDNOSTKA: 50 kg/m³].THE MIXING RATIOS OF UHPC [UNIT: 50 kg/m³].

Surowiec / Raw material	Cement	PE fibre Włókna PE /	Drobny piasek Fine sand	Popiół lotny Fly ash	Pył krzemionkowy Silica fume	SP	Woda Water
Przeliczone na zawartość cement Accounting for cement mass ratio	1	0.01	0.64	0.15	0.13	0.41%	0.225

Tablica 4 / Table 4

FIZYKOCHEMICZNE WŁAŚCIWOŚCI SP.

SP PHYSICAL AND CHEMICAL INDICATORS.

Postać / Appearance	Gęstość Packing density, g/L	Zawartość aktywnego składnika Active ingredient	Wilgoć Residual moisture	PH	Redukcja wody w zaprawie The water reduction rate of mortar
White yellowish powder	650-850	≥ 90 %	≤ 3 %	7.0 - 9.0	≥ 23 %

Tablica 5 / Table 5

ZAWARTOŚĆ ZANIECZYSZCZEŃ [%].

IMPURITY CONTENT [%].

Hydrochloric acid insoluble matter	Chlor / Chloride	Siarka / Sulfate	Żelazo / Iron	Metale ciężkie Heavy metal	Sole magnezu i metali alkalicznych Magnesium salts and alkali metals	Wytrącone wodorotlenkiem amonu / Ammonium hydroxide precipitate
0.05	0.01	0.2	0.01	0.002	0.5	0.25

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

W badaniach wykorzystano proszek MGO dostarczony przez firmę Suzhou Carbon Graphene Technology Co., Ltd, o czystości powyżej 95% mas., zawartości tlenu wynoszącej 30,9%, barwie czarno-brązowej oraz powierzchni właściwej wynoszącej 100–300 m²/g. Obraz AFM proszku MGO przedstawiono na rys.

2.2. Sample and specimen preparation

2.2.1. Preparation of MGO dispersions and dilutions

SP was mixed with deionized water, after which MGO powder was added to prepare MGO dispersion at a concentration of 4 mg/ml. The mass ratios of MGO to SP in the MGO dispersion were 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, and 2.0, respectively. The ultrasound machine model is YM-100S. The ultrasound power was 120 W, 400 W, and 600 W,

1. Rozmiar płatków MGO wynosi 10–50 μm , ich średnia grubość około 6 nm, natomiast grubość monowarstwy GO - 0,6–1,2 nm. Płatki MGO składają się z 6–10 warstw.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem betonu UHPC wyprodukowanego przez firmę Zhengzhou Yijian New Materials Co., Ltd. Użyto cementu o klasie P 52,5. Skład chemiczny cementu przedstawiono w tablicy 1, a właściwości fizyczne w tablicy 2. Skład betonu UHPC przedstawiono w tablicy 3. Pył krzemionkowy miał klasę [oznaczenie] SF90 i zawartość SiO_2 wynoszącą 90%. Pozostałość na sicie o otworach kwadratowych 45 μm wynosi 4,5%, a powierzchnia właściwa 18 600 m^2/kg . Popiół lotny, który zastosowano miał pozostałość na sicie o otworach kwadratowych 45 μm wynoszącą 11%. Kruszywo drobne to piasek kwarcowy o maksymalnej wielkości ziarna nieprzekraczającej 1,25 mm. Piasek kwarcowy można podzielić na trzy klasy wielkości ziarna w zależności od wielkości cząstek: piasek gruboziarnisty [1,25 mm–0,63 mm], piasek średnioziarnisty [0,63 mm–0,315 mm] oraz piasek drobnoziarnisty [0,315 mm–0,16 mm]. Moduł uziarnienia wynosi 1,6–2,2.

Domieszką redukującą ilość wody zastosowaną w badaniach był superplastifikator polikarboksylowy [SP] o nazwie handlowej QS-8020 i współczynniku zmniejszenia zawartości wody wynoszącym $\geq 23\%$, dostarczony przez firmę Shanghai Qinhe Chemical Co. Jego właściwości fizyczne i chemiczne przedstawiono w tablicy 4.

Badanie przeprowadzono przy użyciu wody dejonizowanej o wysokiej czystości dostarczonej przez firmę Zhejiang Wenzhou Honghuang Power Co. Jej przewodnictwo jonowe wynosiło $\leq 0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$, rezystywność 18,3 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$, co kwalifikuje ją do pierwszej klasy wody eksperymentalnej. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem włókien polietylenowych [PE] wyprodukowanych przez firmę Zhengzhou Yejian New Materials Co. Ltd, o średnicy 0,015 mm, długości 12 mm. Wytrzymałość na rozciąganie włókien PE wynosi 767 MPa, moduł sprężystości 85 GPa, a wydłużenie 20%. Wykorzystany w badaniu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wyprodukowany przez firmę Tianjin Zhiyuan Chemical Reagent Co., Ltd. charakteryzował się czystością powyżej 95%, rozpuszczalnością wynoszącą 0,16 g w 100 ml wody w temperaturze pokojowej oraz pH równym 13 w roztworze nasyconym. Wskaźniki zawartości zanieczyszczeń przedstawiono w tablicy 5.

2.2. Przygotowanie próbek

2.2.1. Przygotowanie dyspersji i rozcieńczeń MGO

W celu przygotowania dyspersji MGO o stężeniu 4 mg/ml, SP zmieszano z wodą dejonizowaną, a następnie dodano proszek MGO. Stosunki masowe MGO do SP w dyspersji MGO wynosiły odpowiednio 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 i 2,0. Model aparatu ultradźwiękowego to YM-100S. Moc ultradźwięków wynosiła 120 W, 400 W i 600 W, a czas działania ultradźwięków na dyspersję wynosił 1,5 godziny. Dyspersję MGO przygotowaną przy mocy ultradźwiękowej 120 W oznaczono jako G1, 400 W oznaczono jako G2 a 600 W oznaczono jako G3.

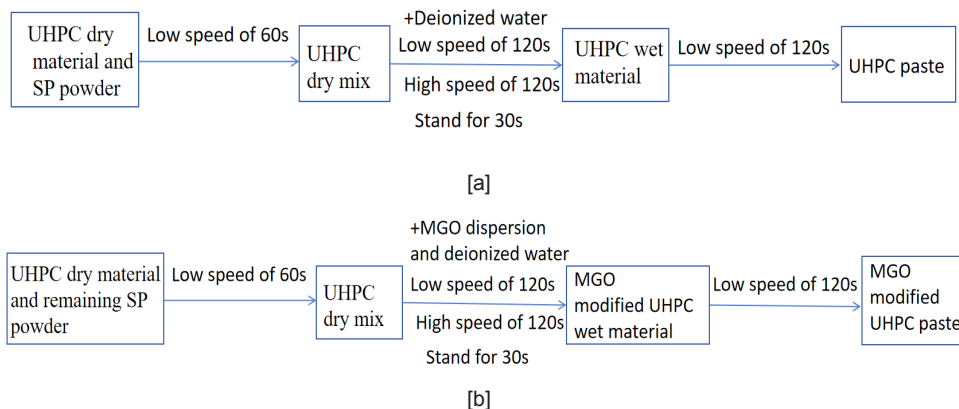
and the ultrasound duration was 1.5 h. The MGO dispersion with an ultrasonic power of 120 W was recorded as G1, the MGO dispersion with an ultrasonic power of 400 W was recorded as G2, and the MGO dispersion with an ultrasonic power of 600 W was recorded as G3.

1–2 ml was removed from the prepared MGO dispersion and placed in a centrifuge tube. The MGO supernatant was obtained by centrifuging the MGO dispersion at 5000 rpm for 3 min. The centrifugation step serves to remove large MGO agglomerates that cannot remain stably suspended. Because larger particles sediment rapidly under centrifugal force, only well-dispersed nanosheets remain in the supernatant. This ensures that the absorbance values obtained from the UV-VIS measurements represent the true dispersion quality of MGO under different ultrasonic powers and SP dosages. Isolating these effectively dispersed nanosheets is crucial, as they are the components capable of penetrating micro-pores, participating in hydration reactions, and contributing to improvements in UHPC performance.

To ensure that the amount of SP adsorbed onto MGO surfaces did not bias the concentration measurements, a calibration procedure was implemented. The characteristic SP peak in the UV spectrum was first measured using SP solutions without MGO at the same SP dosages used in the dispersions. This calibration allowed us to identify and subtract the SP-related absorbance from the total signal. As a result, the MGO absorbance values used in the analysis correspond strictly to dispersed MGO nanosheets. This procedure also confirmed that the SP-to-MGO mass ratio remained consistent during centrifugation, ensuring comparability across all dispersion conditions. The collected MGO supernatant was then diluted 50-fold with either deionized water or saturated lime water to produce the test dilutions used for UV-VIS characterization.

2.2.2. Preparation of MGO-modified UHPC specimen blocks

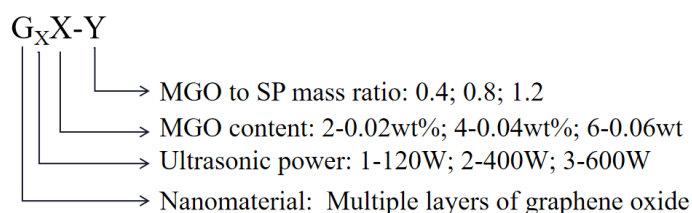
The size of the UHPC specimens was 40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 160 mm. This specimen dimension was selected based on the material characteristics of the UHPC mixture, which contains no coarse aggregates and uses only fine quartz sand with a maximum particle size below 1.25 mm. As such, the mixture exhibits behavior closer to cement mortar rather than conventional concrete. According to the aggregate-specimen size relationship specified in GB/T50081-2019 (24), the specimen dimensions should be matched to the maximum aggregate size to ensure uniform stress distribution and avoid boundary effects. For mixtures composed exclusively of fine aggregates, mortar-sized prisms [40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 160 mm] are therefore appropriate and are widely used in UHPC studies, particularly when evaluating systems modified with nanomaterials. Although the UHPC contains polyethylene fibers with a length of 12 mm, the fiber length remains smaller than one-third of the smallest dimension of the specimen, ensuring that fiber orientation and end-effects do not compromise the validity or representativeness of the strength measurements.



Rys. 2. Schemat technologiczny przygotowania betonu UHPC: [a] Schemat technologiczny przygotowania betonu UHPC; [b] Schemat technologiczny przygotowania betonu UHPC modyfikowanego MGO.

Fig. 2. Flow chart of UHPC preparation: [a] Flow chart of UHPC preparation; [b] Flow chart of MGO-modified UHPC preparation.

Z przygotowanej dyspersji MGO pobrano 1–2 ml i umieszczono w probówce przeznaczonej do wirowania. Roztwór nad osadem MGO uzyskano poprzez wirowanie dyspersji MGO z prędkością 5000 obr./min przez 3 minuty. Etap wirowania służy usunięciu dużych aglomeratów MGO, które nie mogą pozostawać w stabilnej zawieszynie. Ponieważ większe cząstki szybko osiadają pod wpływem siły odśrodkowej, w roztworze nad osadem pozostają wyłącznie dobrze zdyspergowane nanopłatki. Zapewnia to, że wartości absorbancji uzyskane w pomiarach UV-VIS odzwierciedlają



Rys. 3. Schemat przedstawiający numery próbek betonu UHPC.

Fig. 3. Illustration of UHPC specimen numbers.

Tablica 6 / Table 6

PROPORCJE MIESZANKI BETONU UHPC MODYFIKOWANEGO MGO.

MIX PROPORTIONS OF MGO-MODIFIED UHPC.

Numer Number	Moc ultradźwięków Ultrasonic power	UHPC, g	Woda Water, g	W/C	MGO, mg	Dodatek MGO MGO dosage, wt. %	SP, mg		Dodatek SP SP dosage, wt. %
							UHPC	Dyspersja MGO MGO dispersion	
G0-0	-	1800	405	0.17	-	-	465	-	0.05
G ₂ -0.4	G1	1800	405	0.17	186	0.02	0	465	0.05
G ₂ -0.4	G2	1800	405	0.17	186	0.02	0	465	0.05
G ₂ -0.4	G3	1800	405	0.17	186	0.02	0	465	0.05
G ₂ -0.8	G1	1800	405	0.17	186	0.02	232	233	0.05
G ₂ -0.8	G2	1800	405	0.17	186	0.02	232	233	0.05
G ₂ -0.8	G3	1800	405	0.17	186	0.02	232	233	0.05
G ₄ -0.8	G1	1800	405	0.17	372	0.04	0	465	0.05
G ₄ -0.8	G2	1800	405	0.17	372	0.04	0	465	0.05
G ₄ -0.8	G3	1800	405	0.17	372	0.04	0	465	0.05
G ₂ -1.2	G1	1800	405	0.17	186	0.02	310	155	0.05
G ₂ -1.2	G2	1800	405	0.17	186	0.02	310	155	0.05
G ₂ -1.2	G3	1800	405	0.17	186	0.02	310	155	0.05
G ₄ -1.2	G1	1800	405	0.17	372	0.04	155	310	0.05
G ₄ -1.2	G2	1800	405	0.17	372	0.04	155	310	0.05
G ₄ -1.2	G3	1800	405	0.17	372	0.04	155	310	0.05
G ₆ -1.2	G1	1800	405	0.17	558	0.06	0	465	0.05
G ₆ -1.2	G2	1800	405	0.17	558	0.06	0	465	0.05
G ₆ -1.2	G3	1800	405	0.17	558	0.06	0	465	0.05

Uwaga: Procentowe dozowanie MGO oraz procentowe dozowanie SP oznaczają odpowiednio ich procentowy udział w stosunku do masy cementu w mieszance UHPC.

Note: The percentage dosing of MGO and percentage dosing of SP are their percentage dosing of cement within the UHPC, respectively.

rzeczywistą jakość dyspersji MGO przy różnych mocach ultradźwięków i udziale SP. Wyizolowanie skutecznie zdyspergowanych nanopłatków ma kluczowe znaczenie, ponieważ są to składniki zdolne do penetracji mikroporów, uczestniczące w reakcjach hydratacji i przyczyniające się do poprawy właściwości betonu UHPC.

Aby upewnić się, że ilość SP zaadsorbowanego na powierzchniach MGO nie wpłynęła na wyniki pomiarów stężenia, przeprowadzono procedurę kalibracji. Charakterystyczne pasmo SP w widmie UV zmierzono najpierw przy użyciu roztworów SP bez MGO, przy takich samych ilościach SP, jakie zastosowano w dyspersjach. Kalibracja ta pozwoliła zidentyfikować i odjąć absorbancję związaną z SP od całkowitego sygnału. W rezultacie wartości absorbancji MGO wykorzystane w analizie odpowiadają ściśle zdyspergowanym nanowarstwom MGO. Procedura ta potwierdziła również, że stosunek masowy SP do MGO pozostawał stały podczas wirowania, zapewniając porównywalność wyników we wszystkich warunkach dyspersji. Zebrana ciecz z nad osadu MGO została następnie rozcieńczona 50-krotnie wodą dejonizowaną lub nasyconą wodą wapienną w celu uzyskania rozcieńczeń testowych wykorzystanych do charakterystyki w zakresie UV-VIS.

2.2.2. Przygotowanie próbek z betonu UHPC modyfikowanego MGO

Wymiary próbek betonu UHPC wynosiły 40 mm × 40 mm × 160 mm. Wymiary te wybrano w oparciu o właściwości mieszanki betonu UHPC, która nie zawiera kruszywa gruboziarnistego, a wykorzystuje wyłącznie drobny piasek kwarcowy o maksymalnej wielkości ziarna poniżej 1,25 mm. W związku z tym mieszanka wykazuje właściwości bliższe zaprawie cementowej niż betonowi konwencjonalnemu. Zgodnie z zależnością między wielkością kruszywa a wymiarami próbki określoną w normie GBT50081-2019 (24), wymiary próbek powinny być dopasowane do maksymalnej wielkości kruszywa, aby zapewnić równomierny rozkład naprężeń i uniknąć efektów brzegowych. W przypadku mieszanek składających się wyłącznie z drobnych kruszyw odpowiednie są zatem belki zaprawy o wymiarach [40 mm × 40 mm × 160 mm], które są szeroko stosowane w badaniach nad UHPC, szczególnie podczas oceny układów modyfikowanych nanomateriałami. Chociaż beton UHPC zawiera włókna polietylenowe o długości 12 mm, długość włókien pozostaje mniejsza niż jedna trzecia najmniejszego wymiaru próbki, co gwarantuje, że orientacja włókien i efekty brzegowe nie wpływają negatywnie na istotność ani reprezentatywność pomiarów wytrzymałości.

Szczegółowy proces przygotowania próbek UHPC przedstawiono na rys. 2, a system numeracji poszczególnych grup próbek zilustrowano na rys. 3. Proporcje mieszanki UHPC modyfikowanego MGO przedstawiono w tabeli 6. Próbkę rozformowano 24 godziny po zaformowaniu. Następnie dojrzewały zgodnie z warunkami normowymi [GBT50081-2019 (24)], w temperatu-



Rys. 4. Spektrofotometr ultrafioletowy.

Fig. 4. Ultraviolet spectrophotometer.

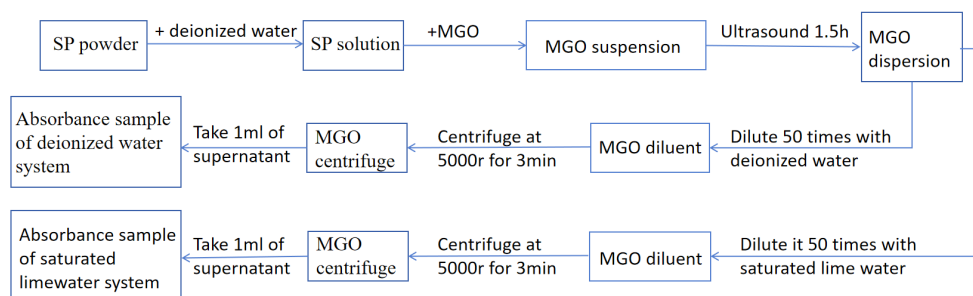
The specific preparation process of the UHPC specimens is shown in Fig. 2, and the numbering system for each specimen group is illustrated in Fig. 3. The mix proportions of the MGO-modified UHPC are presented in Table 6. The molds were removed 24 hours after casting. Specimens were then cured according to GBT50081-2019 (24), at a temperature of $[20 \pm 2]^\circ\text{C}$ and a relative humidity not less than 90% for 28 days.

2.3. Testing methods

The dispersibility of MGO in deionized water and saturated lime water was tested by UV spectrophotometer. The UV spectrophotometer was manufactured by Shanghai Yidian Analytical Instruments Co. Ltd, model 752G see Fig. 4. The characteristic peak of MGO is located at 230 nm. Three spectra were measured for each set of MGO diluted solutions and the average was taken as the final result. The specific absorbance test flow chart is shown in Fig. 5.

According to the fluidity of cementitious sand [GB50007-2011] (25) the fluidity test of UHPC was carried out using a truncated cone mould with a top diameter of 70 mm, a bottom diameter of 100 mm, and a height of 60 mm. The fresh mortar was added into the test mold in two layers, and the tamping rod was used to tamp 15 times and 10 times respectively from the edge to the center after each addition of mortar. After tamping, the test mold was lifted gently vertically upward. Finally, 25 beats were performed at a rate of one per second. The fluidity test is shown in Fig. 6.

The strength of the cement mortar was tested according to the Cement mortar strength test method [GB 17671– 2021] (26). The



Rys. 5. Schemat blokowy badania absorbancji.

Fig. 5. Flow chart of absorbance test.

rze $[20 \pm 2]$ °C i przy wilgotności względnej nie mniejszej niż 90% przez 28 dni.

2.3. Metody badawcze

Zdolność do dyspersji MGO w wodzie dejonizowanej i nasyconej wodzie wapiennej badano za pomocą spektrofotometru UV. Spektrofotometr UV został wyprodukowany przez firmę Shanghai Yidian Analytical Instruments Co. Ltd, model 752G [patrz rys. 4]. Charakterystyczne pasmo MGO znajduje się przy 230 nm. Dla każdego zestawu rozcieńczonych dyspersji MGO zmierzono trzy widma, a jako wynik końcowy przyjęto średnią. Schemat badania absorbancji właściwej przedstawiono na rys. 5.

Zgodnie z normą dotyczącą konsystencji [GB50007-2011] (25) badanie UHPC przeprowadzono przy użyciu formy o średnicy górnej 70 mm, średnicy dolnej 100 mm i wysokości 60 mm. Świeżą zaprawę wprowadzono do formy w dwóch warstwach, a po dodaniu każdej z nich za pomocą ubijaka ubijano odpowiednio 15 i 10 razy, ruchami od krawędzi do środka. Po ubiciu formę delikatnie podniesiono pionowo do góry. Na koniec wykonano 25 uderzeń z częstotliwością jednego uderzenia na sekundę. Badanie rozplywu przedstawiono na rys. 6.

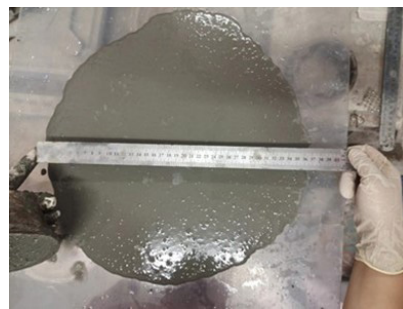
Wytrzymałość zaprawy cementowej zbadano zgodnie z metodą badania wytrzymałości [GB 17671–2021] (26). Próbkę o wymiarach 40 mm × 40 mm × 160 mm odlewano i poddawano standardowemu dojrzewaniu przez 3, 7 i 28 dni w celu przeprowadzenia badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie, jak pokazano odpowiednio na rys. 7 i rys. 8. Szybkość obciążania wynosiła odpowiednio 2,4 kN/s i 1,5 kN/s podczas badań na ściskanie i zginanie, a obciążanie prowadzono do momentu zniszczenia.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Zdolność dyspersji MGO w wodzie dejonizowanej

Wstępną ocenę wizualną dyspersji MGO, przygotowanych przy zastosowaniu różnych mocy ultradźwięków i o różnych stosunkach masowych MGO do SP, przedstawiono na rys. 9. Kluczowym odkryciem wynikającym z analizy spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera [FTIR], przedstawionej na rys. 10, było pojawienie się dodatkowych pasm od drgań -C-O i -OH przy 1054 cm^{-1} i 2973 cm^{-1} w próbkach poddanych działaniu ultradźwięków o mocy 400 W i 600 W, w porównaniu z próbką poddaną działaniu ultradźwięków o mocy 120 W. Wskazuje to, że wyższa energia ultradźwiękowa wywołała zmiany strukturalne w MGO, prawdopodobnie poprzez wprowadzenie większej liczby grup funkcyjnych zawierających tlen, które mogą zwiększyć hydrofilowość i zmieniać dyspersję (27).

Analiza ilościowa zdolności dyspersji MGO przeprowadzona metodą spektrofotometrii UV-Vis ujawniła kilka istotnych informacji. Po pierwsze, jakość dyspersji MGO była lepsza w wodzie dejonizowanej w porównaniu z nasyconą wodą wapienną, jak pokazano na rys. 11 i rys. 12, co podkreśla znaczący efekt hamujący jonów



Rys. 6. Test rozplywu.

Fig. 6. Fluidity test.



Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie.

Fig. 7. Flexural strength test.



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie.

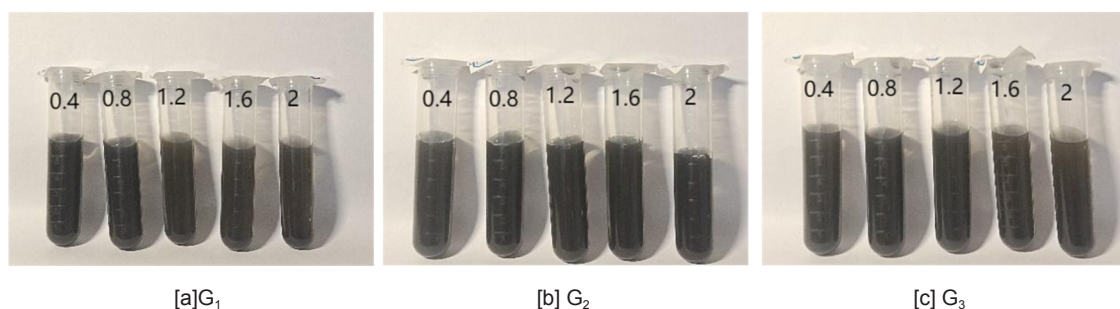
Fig. 8. Compressive strength test.

specimens of 40 mm × 40 mm × 160 mm were cast with standard curing for 3d, 7d, and 28d for compressive and flexural tests, as shown in Fig. 7 and Fig. 8, respectively. The loading rate was 2.4 kN/s and 1.5 kN/s during the compressive and flexural tests, respectively, and loaded until destruction.

3. Results and discussion

3.1. Dispersibility of MGO in deionized water

The initial visual assessment of the MGO dispersions, prepared with varying ultrasonic powers and MGO-to-SP mass ratios, is shown in Fig. 9. A key finding from the Fourier transform infrared [FTIR] spectroscopy shown in Fig. 10 was the appearance of additional -C-O and -OH vibration peaks at 1054 cm^{-1} and 2973 cm^{-1}



Rys. 9. Dyspersja MGO [Stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4 – 2].

Fig. 9. MGO dispersion [The mass ratio of MGO to SP is 0.4 – 2].

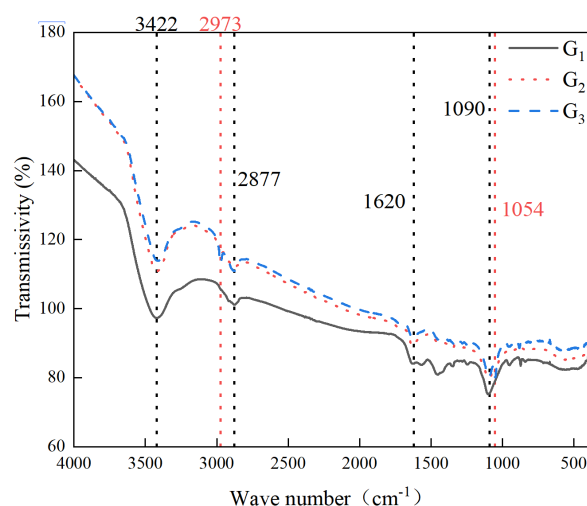
Ca^{2+} w alkalicznym środowisku zaczynu cementowego. Dane dotyczące absorpcji MGO w wodzie dejonizowanej, przedstawione na rys. 13, pokazują, że moc ultradźwięków wynosząca 400 W [G2] zapewniła najwyższą absorpcję dla niemal wszystkich stosunków masowych MGO do SP, co wskazuje na optymalną dyspersję. Ponadto zidentyfikowano istotną zależność między stosunkiem masowym MGO do SP a zdolnością do dyspersji. Absorbancja malała wraz ze wzrostem tego stosunku. Tendencja ta była najbardziej wyraźna do momentu, gdy stosunek masowy osiągnął około 1,2, po czym spadek absorpcji ustabilizował się dla wszystkich mocy ultradźwięków. Wskazuje to na istnienie „punktu nasycenia”, powyżej którego dodanie większej ilości SP przynosi coraz mniejsze korzyści dla dyspersji w wodzie dejonizowanej.

Podobny efekt plateau zaobserwowano w przypadku dyspersji w nasyconej wodzie wapiennej [rys. 14], choć wystąpił on przy wyższym stosunku masowym MGO do SP, wynoszącym 1,6. Sugeruje to wpływ jonów Ca^{2+} oraz, że w warunkach symulujących roztwór porowy cementu wymagana jest większa ilość superplastyfikatora. Co istotne, przy tych wyższych stosunkach masowych [1,6–2,0] zdolność dyspersji MGO stała się mniej wrażliwa na zmiany zawartości SP.

3.2. Konsystencja betonu UHPC modyfikowanego MGO

3.2.1. Wpływ mocy ultradźwięków na rozplływ

Rozplływ betonu UHPC modyfikowanego MGO przy różnych mocach ultradźwięków i różnych ilościach MGO przedstawiono na rys. 15. Jak widać na rys. 15, rozplływ betonu UHPC przekracza 250 mm. Konsystencja betonu UHPC z MGO była lepsza niż w grupie kontrolnej. Może to wynikać z faktu, że podczas procesu przygotowania, SP w próbce kontrolnej mieszano z suchym materiałem UHPC. Natomiast w grupie eksperymentalnej UHPC mieszano część lub całość SP w postaci roztworu. Wraz ze wzrostem mocy ultradźwięków, przy zawartości MGO wynoszącej 0,02% mas., rozplływ UHPC był o 5% większy niż w grupie kontrolnej. Gdy zawartość MGO wynosi 0,04% mas., a moc ultradźwięków 400 W, rozplływ betonu UHPC osiąga maksimum, wynoszące 350 mm. Gdy zawartość MGO wynosi 0,06% mas., a moc ultradźwięków 400 W, rozplływ osiąga maksimum wynoszące 340 mm. Przy niezmienniej zawartości MGO rozplływ próbek G1 i G2 jest podobny, natomiast rozplływ próbki G3 znacznie różni się od próbek G1 i G2. Wyniki pokazują, że przy mocy ultradźwięków wynoszącej 600 W



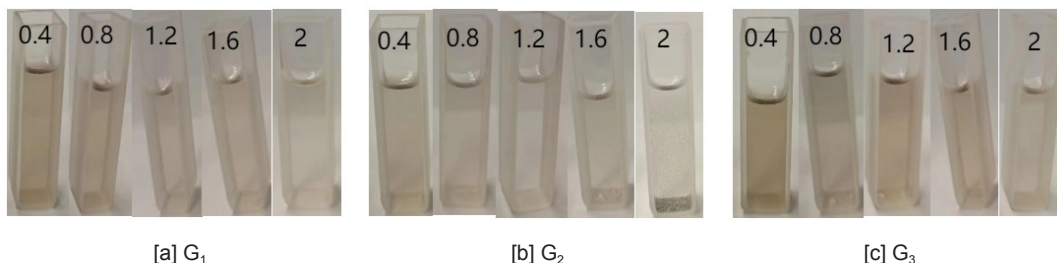
Rys. 10. Widma FTIR dla MGO o stosunku masowym MGO do SP wynoszącym 0,4.

Fig. 10. FTIR diagram of MGO with a mass ratio of MGO to SP of 0.4.

in samples treated with 400 W and 600 W ultrasound, compared to the 120 W sample. This indicates that higher ultrasonic energy induced structural changes in the MGO, likely by introducing more oxygen-containing functional groups that can enhance hydrophilicity and dispersion (27).

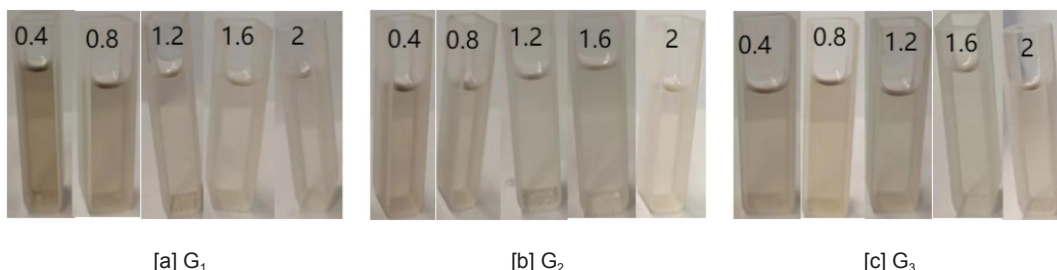
The quantitative analysis of MGO dispersibility via UV-Vis spectrophotometry revealed several important trends. First, the dispersion quality of MGO was consistently superior in deionized water compared to saturated lime water, as shown in Figs 11 and 12, highlighting the significant inhibitory effect of Ca^{2+} ions in the alkaline cementitious environment. The absorbance data for MGO in deionized water, as shown in Fig. 13, demonstrates that an ultrasonic power of 400 W [G2] yielded the highest absorbance across nearly all MGO-to-SP mass ratios, indicating optimal dispersion. Furthermore, a crucial relationship was identified between the MGO-to-SP mass ratio and dispersibility. Absorbance decreased as the mass ratio increased. This trend was most pronounced until the mass ratio reached approximately 1.2, after which the decline in absorbance plateaued for all ultrasonic powers. This establishes a „saturation point” beyond which additional SP provides diminishing returns for dispersion in deionized water.

A similar plateau effect was observed for dispersions in saturated lime water shown in Fig. 14, though it occurred at a higher MGO-



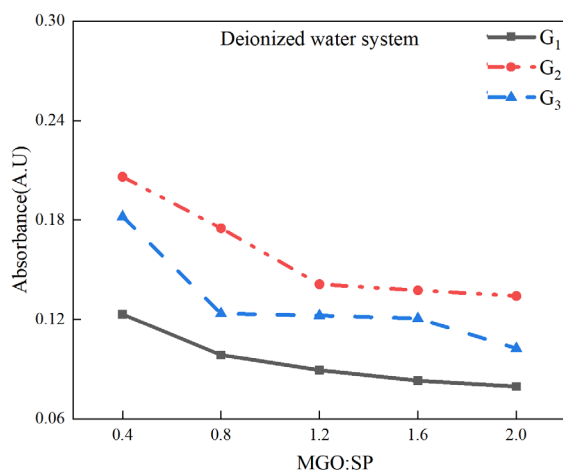
Rys. 11. Rozcieńczanie w wodzie dejonizowanej [stosunek masowy MGO do SP 0,4–2].

Fig. 11. Diluent in deionized water [mass ratio of MGO to SP 0.4–2].



Rys. 12. Rozcieńczanie w nasyconej wodzie wapiennej [stosunek masowy MGO do SP wynoszący 0,4–2].

Fig. 12. Diluent in saturated lime water [mass ratio of MGO to SP 0.4–2].

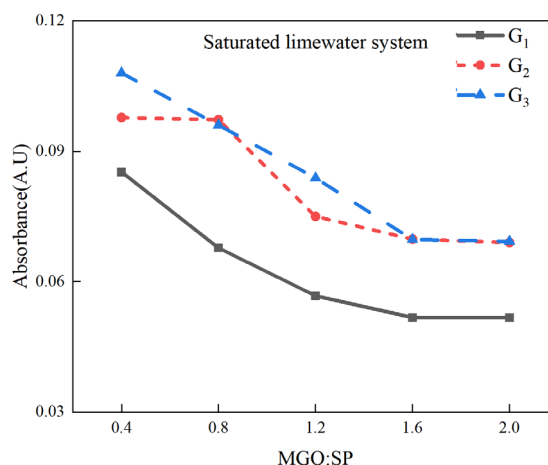


Rys. 13. Absorbancja dla różnych rozcieńczeń w wodzie dejonizowanej.

Fig. 13. Absorbance of diluent in deionized water.

obserwuje się znaczący wpływ na strukturę MGO, co skutkuje istotną różnicą w konsystencji.

Jak widać na rys. 13 i rys. 14, im mniejszy jest stosunek masowy MGO do SP, czyli im większe stężenie roztworu MGO, tym większa jest absorbancja. Ta tendencja absorbancji jest spójna z mocą ultradźwięków wynoszącą 120 W i 400 W. Wcześniej-sze badania wykazały, że wzrost energii ultradźwięków może rozpraszać agregaty nanomateriałów, jednak istnieje optymalna wartość tej energii. Po przekroczeniu optymalnej wartości energii ultradźwięków absorbancja osiąga plateau, co wyjaśnia, dlaczego absorbancja układu nasyconej wody wapiennej przy mocy ultradźwięków wynoszącej 600 W jest podobna do tej uzyskanej przy mocy 400 W, ale tendencja rozplywu jest zupełnie inna.



Rys. 14. Absorbancja dla różnych rozcieńczeń w nasyconej wodzie wapiennej.

Fig. 14. Absorbance of diluent in saturated lime water.

-to-SP mass ratio of 1.6. This suggests that a greater amount of superplasticizer is required to counteract the agglomerating effects of Ca^{2+} ions and achieve stable dispersion in conditions simulating cement pore solution. Notably, at these higher mass ratios [1.6–2.0], the dispersibility of MGO became less sensitive to changes in SP content.

3.2. Fluidity of MGO-modified UHPC

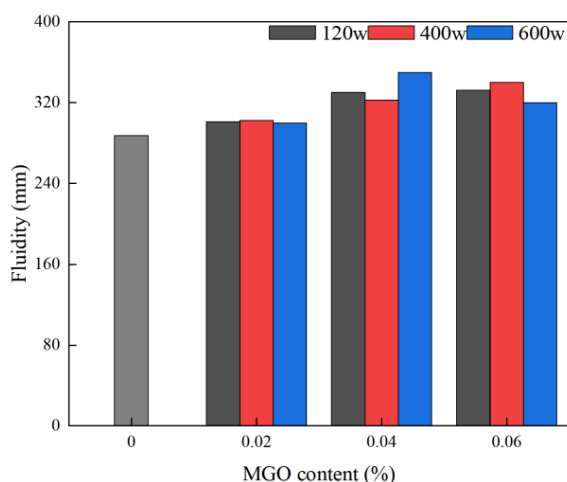
3.2.1. Effect of ultrasonic power on fluidity

The fluidity of MGO-modified UHPC under different ultrasonic powers and different MGO dosages is shown in Fig. 15. As can be seen from Fig. 15, the fluidity of UHPC is greater than 250 mm. The fluidity of UHPC mixed with MGO was better than that of the control group. This may be because, during the preparation process, the SP of the control group was mixed with UHPC dry material in a powder state. However, some or all SP of the experi-

3.2.2. Wpływ stosunku masowego MGO do SP na rozpliw

Gdy zawartość MGO wynosi 0,02% mas., rozpliw betonu UHPC modyfikowanego MGO przy różnych stosunkach masowych MGO do SP oraz przy różnej mocy ultradźwięków przedstawiono na rys. 16. Jak widać, rozpliw betonu UHPC przekracza 250 mm. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 1,2, konsystencja poszczególnych próbek UHPC znacznie się różni. Przy zawartości MGO wynoszącej 0,02% mas. rozpliw próbki G1 wynosi 353 mm, czyli o 6% więcej niż w przypadku próbki G2. Gdy stosunek masowy MGO do SP jest mniejszy niż 0,8, rozpliw poszczególnych próbek UHPC jest zasadniczo taki sam. Konsystencja betonu UHPC o stosunku masowym MGO do SP wynoszącym 0,8 oraz 1,2 jest wyższa niż w przypadku betonu UHPC o stosunku masowym MGO do SP wynoszącym 0,4. Przy stosunku MGO/SP wynoszącym 0,4 cały SP wprowadzono wraz z dyspersją MGO, natomiast przy stosunkach 0,8 i 1,2 część SP znajdowała się w dyspersji MGO, a pozostałą część dodawano bezpośrednio do UHPC w postaci proszku. Podsumowując, wpływ na konsystencję po dodaniu proszku SP nie jest tak wyraźny, jak w przypadku SP dodawanego w roztworze.

Jak pokazano na rys. 16, gdy zawartość MGO wynosi 0,02% mas., rozpliw betonu UHPC stopniowo wzrasta wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP. Wpływ SP w roztworze i w postaci proszku SP w betonie UHPC o różnych stosunkach masowych MGO do SP jest różny. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, zawartość SP wynosi 0,05% mas. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,8, zawartość SP wynosi 0,025% mas., a zawartość sproszkowanego SP wynosi 0,025% mas. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 1,2, zawartość SP wynosi 0,017% mas., a zawartość SP w postaci suchej wynosi 0,033% mas. Udział roztworu SP i proszku SP w betonie UHPC o różnych stosunkach masowych MGO do SP jest różny. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, zawartość samego SP wynosi 0,05% mas. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, zawartość wynosi 0,025% mas, a zawartość proszku SP wynosi 0,025% mas. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 1,2, zawartość SP wynosi 0,017% mas., a zawartość proszku SP wynosi 0,033% mas.



Rys. 15. Rozpliw betonu UHPC przy różnych mocach ultradźwięków.

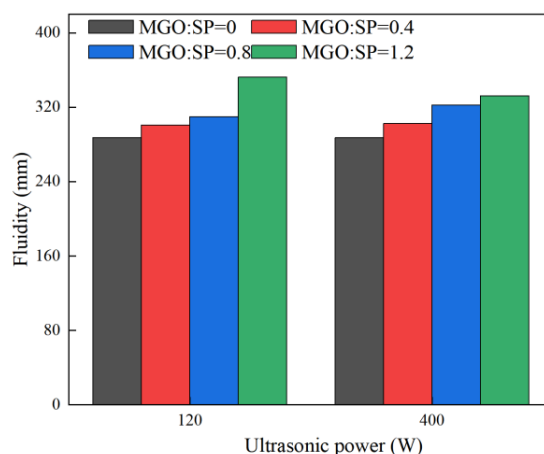
Fig. 15. Fluidity of UHPC at different ultrasonic powers.

mental group was mixed with UHPC in solution. With the increase of ultrasonic power, when the MGO content was 0.02 wt.%, the fluidity of UHPC was 5 % higher than that of the control group. When the MGO content is 0.04 wt.%, and the ultrasonic power is 400 W, the fluidity of UHPC is the maximum, which is 350 mm. When the MGO content is 0.06 wt.%, and the ultrasonic power is 400 W, the fluidity reaches the maximum of 340 mm. When the MGO content is unchanged, the mobility of G1 and G2 is similar, and the fluidity of G3 is significantly different from that of G1 and G2. The results show that when the ultrasonic power is 600 W, it has a great influence on the MGO structure, resulting in a significant difference in mobility.

As can be seen from Figs. 13 and 14, the smaller the mass ratio of MGO to SP, that is, the greater the concentration of MGO solution, the greater the absorbance. The trend of absorbance is consistent with the ultrasonic power of 120 W and 400 W. Previous studies have shown that the increase of ultrasonic energy can disperse the aggregates of nanomaterials, but there is an optimal ultrasonic energy. When the optimal ultrasonic energy is exceeded, the absorbance reaches a plateau, which explains that the absorbance of the saturated lime water system is similar to that of 400 W when the ultrasonic power is 600 W, but the fluidity trend is very different.

3.2.2. Effect of mass ratio of MGO to SP on fluidity

When the MGO content is 0.02 wt.%, the MGO-modified UHPC fluidity under different MGO to SP mass ratios and different ultrasonic power is shown in Fig. 16. As can be seen from Fig. 16, the fluidity of UHPC exceeds 250 mm. When the mass ratio of MGO to SP is 1.2, the fluidity of each UHPC varies greatly. When the MGO content is 0.02 wt.%, the fluidity of G1 is 353 mm, which is 6 % higher than that of G2. When the mass ratio of MGO to SP is less than 0.8, the fluidity of each UHPC is basically the same. The mobility of UHPC with an MGO to SP mass ratio of 0.8 and MGO to SP mass ratio of 1.2 is higher than that of UHPC with an MGO to SP mass ratio of 0.4. Compared with MGO to SP mass ratio of 0.4, and MGO to SP mass ratio of 0.8 and 1.2, in addition



Rys. 16. Rozpliw betonu UHPC o różnych stosunkach masowych MGO do SP przy zawartości MGO wynoszącej 0,02% mas.

Fig. 16. Fluidity of UHPC with different MGO to SP mass ratio when the MGO content is 0.02 wt. %.

W obecności roztworu SP dodanie proszku SP może poprawić konsystencję betonu UHPC. Gdy całkowita ilość SP zmieszanego z betonem UHPC jest taka sama, jego konsystencja różni się ze względu na różne procesy przygotowania.

3.3. Wytrzymałość betonu UHPC modyfikowanego MGO

3.3.1. Wpływ różnych mocy ultradźwiękowych

Dane przedstawione na rys. 17 wskazują wyraźnie optymalną moc zastosowanych ultradźwięków dla zwiększenia wytrzymałości. Próbkę betonu UHPC w wieku 3, 7 i 28 dni, przygotowane z wykorzystaniem MGO zdyspergowanego przy mocy 400 W [G2], konsekwentnie wykazywały najwyższą wytrzymałość na ściskanie i zginanie.

Kluczowym odkryciem był nieliniowy wpływ energii ultradźwiękowej. Chociaż moc 400 W okazała się optymalna, wytrzymałość próbek przygotowanych przy użyciu ultradźwięków o mocy 600 W [G3] była często znacznie niższa, a nawet spadła poniżej wyników próbek przygotowanych przy mocy 120 W [G1]. Wskazuje to, że nadmierna moc ultradźwięków może uszkodzić strukturę MGO, zmniejszając jego skuteczność jako nanomateriału wzmacniającego.

Najbardziej wyraźny wzrost wytrzymałości zanotowano po 28 dniach, co pokazano na rys. 17 [e] i 17 [f] w odniesieniu do wytrzymałości na zginanie. Gdy zawartość MGO wynosiła 0,02% mas. i dyspersja dokonana była przy ultradźwiękach o mocy 400 W, wytrzymałość na zginanie w wieku 28 dni wzrosła o aż 31% w porównaniu z grupą kontrolną. Podkreśla to kluczową rolę prawidłowej dyspersji w uwolnieniu pełnego potencjału MGO w zakresie poprawy wytrzymałości betonu UHPC.

Wyniki wskazują, że MGO znacząco poprawia wytrzymałość betonu UHPC we wczesnym etapie hydratacji. W porównaniu z grupą kontrolną G0 wytrzymałość jest niższa, co wskazuje, że wyższa moc ultradźwięków niekoniecznie oznacza lepszy efekt (28). Dostarczenie nadmiernej energii ultradźwięków powoduje poważne uszkodzenia struktury MGO. Może to wynikać z faktu, że przy niskich stężeniach MGO pozostałe cząsteczki SP mogą opóźniać agregację MGO poprzez efekt steryczny. Jednak wraz ze wzrostem stężenia MGO efektywność superplastyfikatora spada a MGO aglomeruje w matrycy betonu UHPC.

Wraz ze wzrostem zawartości MGO efektywność mocy ultradźwięków wynoszącej 120 W, wzrasta w jeszcze większym stopniu. Przypuszcza się, że przy zwiększeniu mocy ultradźwięków do 400 W, dochodzi do zmian w strukturze MGO. Wzrost mocy ultradźwięków powoduje powstawanie defektów między wewnętrznymi warstwami MGO, a defekty te ujawniają się na powierzchni zewnętrznej (29). Uszkodzony MGO nie był w stanie zapewnić większej liczby aktywnych miejsc dla hydratacji.

3.3.2. Wpływ stosunku masowego MGO do SP na wytrzymałość betonu UHPC

Wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC po 3 dniach dojrzewania dla różnych stosunków masowych MGO do SP przed-

to SP in MGO solution, the remaining SP powder is directly added to UHPC. In conclusion, the effect of adding SP powder on the fluidity of UHPC is not as obvious as that of liquid SP.

As shown in Fig. 16, when the MGO content is 0.02 wt.%, the fluidity of UHPC gradually increases with the increase of the mass ratio of MGO to SP. The proportion of liquid SP and SP powder in UHPC with different mass ratios of MGO to SP is different. When the mass ratio of MGO to SP is 0.4, the liquid SP content is 0.05 wt.%. When the mass ratio of MGO to SP is 0.8, the liquid SP content is 0.025 wt.%, and the powder SP content is 0.025 wt.%. When the mass ratio of MGO to SP is 1.2, the liquid SP content is 0.017 wt.%, and the powder SP content is 0.033 wt.%. The proportion of liquid SP and SP powder in UHPC with different mass ratios of MGO to SP is different. When the mass ratio of MGO to SP is 0.4, the liquid SP content is 0.05 wt.%. When the mass ratio of MGO to SP is 0.4, the liquid SP content is 0.025 wt.%, and the powder SP content is 0.025 wt.%. When the mass ratio of MGO to SP is 1.2, the liquid SP content is 0.017 wt.%, and the powder SP content is 0.033 wt.%. In the presence of liquid SP, the addition of SP powder can improve the fluidity of UHPC. When the total amount of SP mixed into UHPC is the same, its fluidity is different due to the different preparation processes.

3.3. Strength of UHPC modified by MGO

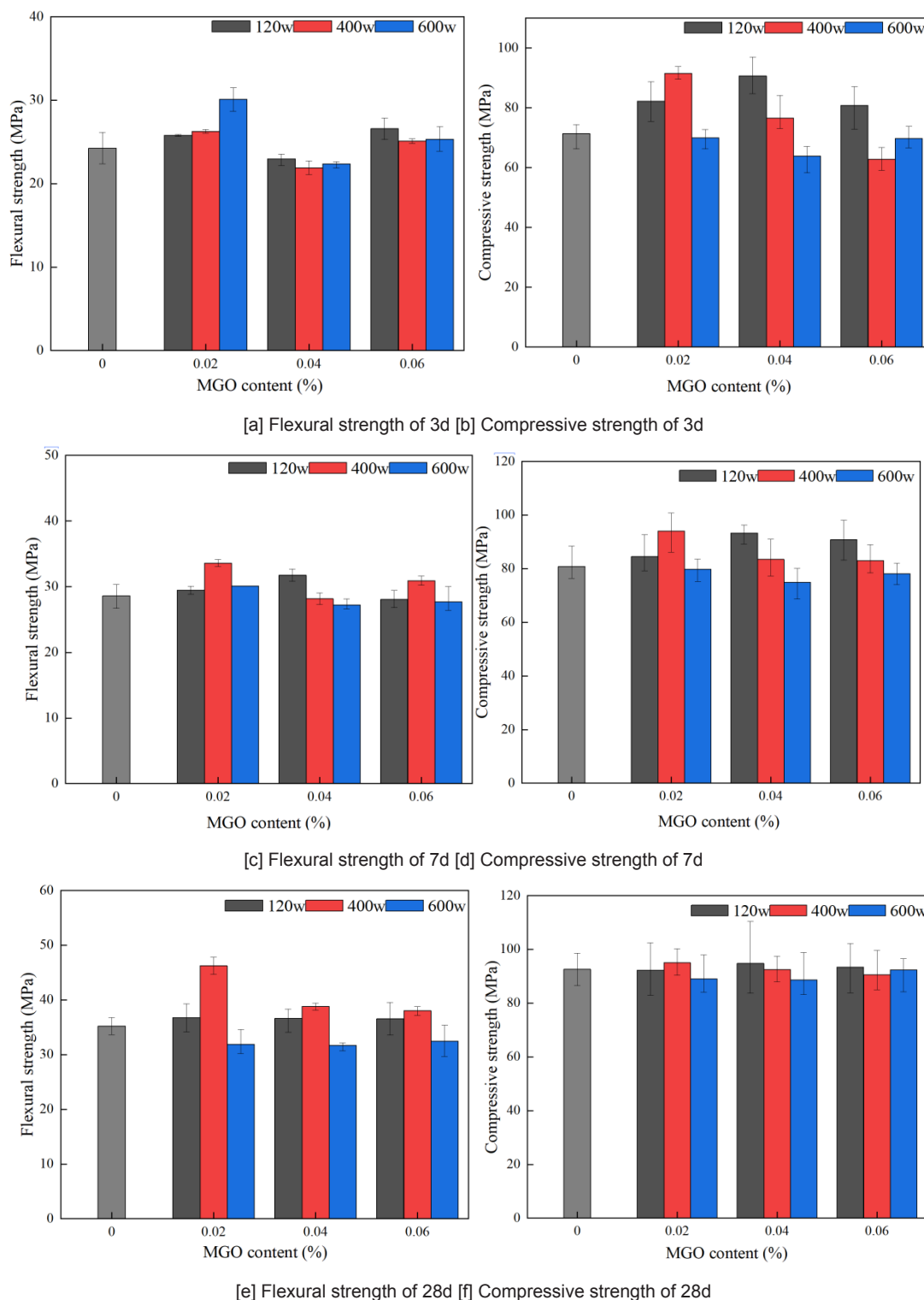
3.3.1. The influence of different ultrasonic power

The data shown in Fig. 17 reveals a clear optimal ultrasonic power for strength enhancement. The UHPC specimens at 3d, 7d and 28d age prepared with MGO dispersed at 400 W [G2] consistently demonstrated the highest compressive and flexural strengths.

A crucial finding was the non-linear effect of ultrasonic energy. While 400 W was optimal, the strength of samples prepared with 600 W ultrasound [G3] was often significantly lower, even falling below the performance of the 120 W [G1] samples. This indicates that excessive ultrasonic power can damage the MGO structure, reducing its effectiveness as a reinforcing nanomaterial.

The most pronounced strength improvement was observed at 28 days shown in Figs. 17 [e] and 17 [f] for flexural strength. When the MGO content was 0.02 wt.% and dispersed at 400 W, the flexural strength at 28 d age increased by a remarkable 31% compared to the control group. This underscores the critical role of proper dispersion in unlocking MGO's full potential for enhancing UHPC's tensile performance.

It can be seen from the above results that MGO significantly improves the strength of early-age UHPC. Compared with the control group G0, the intensity of 600 W ultrasonic power is reduced, indicating that the higher the ultrasonic power is not the better (28). The input of excessive ultrasonic energy causes serious damage to the structure of MGO. When the MGO content is 0.02 wt.%, the ultrasonic power is 400 W. This may be because, at low concentrations of MGO, the remaining SP molecules can delay the aggregation of MGO through steric hindrance effects. However,



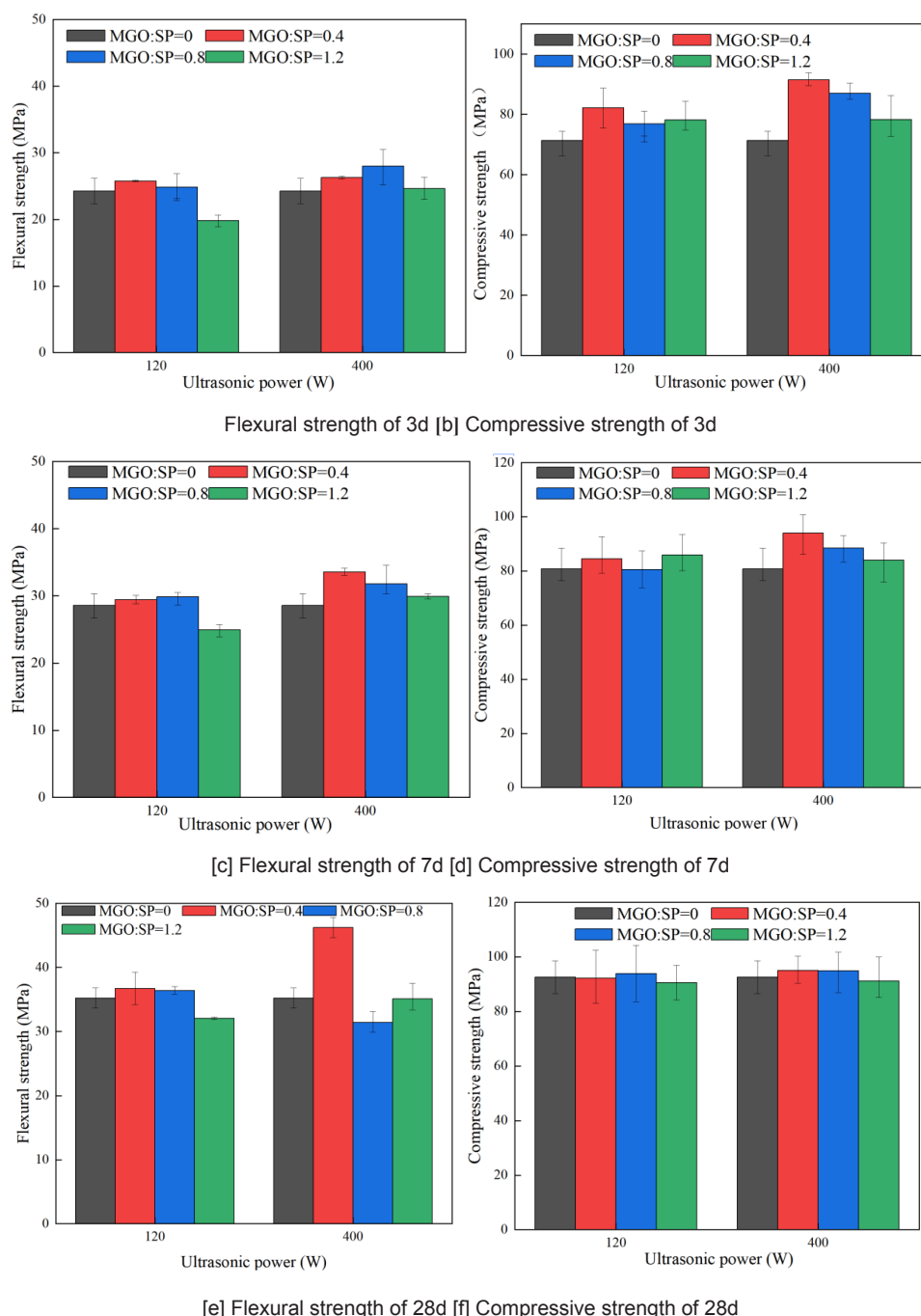
Rys. 17. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC przy różnych mocach ultradźwięków.

Fig. 17. Compressive and flexural strength of UHPC at different ultrasonic power.

stawiono na rys. 18 [a] [b]. Gdy moc ultradźwięków wynosi 120 W, zarówno wytrzymałość na zginanie, jak i wytrzymałość na ściskanie najpierw rosną, a następnie maleją wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, maksymalny wzrost wytrzymałości na zginanie wynosi 6%. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, maksymalny wzrost wytrzymałości na ściskanie wynosi 15%. Gdy moc ultradźwięków wynosi 400 W, wytrzymałość na zginanie najpierw wzrasta, a następnie maleje wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do

with the increase of MGO concentration, there is no spare SP molecule left idle, and MGO agglomerates quickly in the UHPC matrix.

However, when the MGO content increases, the intensity of 120 W ultrasonic power increases more. It is speculated that the MGO structure changes when the ultrasonic power is increased to 400 W. The increase in ultrasonic power causes defects between the inner layers of MGO, and the defects are exposed on the outside (29). The damaged MGO could not provide more active



Rys. 18. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC o zawartości MGO wynoszącej 0,02% mas. oraz stosunku masowym MGO do SP.
Fig. 18. Compressive and flexural strength of UHPC with MGO content of 0.02 wt% and mass ratio of MGO to SP.

SP. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,8, wytrzymałość na zginanie wzrasta do 15%. Wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP wytrzymałość na ściskanie najpierw rośnie, a następnie maleje. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, wytrzymałość na ściskanie wzrasta do 28%.

Na rys. 18 [c] i [d] przedstawiono wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC po 7 dniach dla różnych stosunków masowych MGO do SP dla próbek o zawartości MGO 0,02% mas. Przy mocy ultradźwięków wynoszącej 120 W zarówno wytrzymałość na zginanie, jak i wytrzymałość na ściskanie najpierw rosną, a następnie maleją wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,8, maksymalny wzrost wytrzymałości na zginanie i ściskanie wynosi 5%, przy stosunku

sites for the hydration reaction. The slowing down of the hydration reaction makes the ultrasonic power of 400 W with the increase of MGO content, and the intensity of ultrasonic power of 120 W not significantly improved.

3.3.2. Influence of mass ratio of MGO to SP on strength of UHPC

When the MGO content is 0.02 wt.%, the compressive and flexural strength of UHPC at 3d age with different MGO to SP mass ratios is shown in Fig. 18 [a] and [b]. When the ultrasonic power is 120 W, the flexural strength and compressive strength both increase first and then decrease with the increase of MGO to SP mass ratio. When the mass ratio of MGO to SP is 0.4, the maximum increase

masowym MGO do SP równym 0,4. Gdy moc ultradźwięków wynosi 400 W, wytrzymałość na zginanie najpierw wzrasta, a następnie maleje wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,8, wytrzymałość na zginanie wzrasta do 18%. Wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP wytrzymałość na ściskanie najpierw wzrasta, a następnie maleje. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, wytrzymałość na ściskanie wzrasta do 16%.

Na rys. 18 [e] [f] przedstawiono wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC w wieku 28 dni dla różnych stosunków masowych MGO do SP, dla zawartości dyspersji MGO wynoszącej 0,02% mas. Stosunek masowy MGO do SP ma niewielki wpływ na wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. Gdy moc ultradźwięków wynosi 120 W, wytrzymałość na zginanie najpierw wzrasta, a następnie maleje wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP.

Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, wytrzymałość na zginanie wzrasta o 4%. Wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP wytrzymałość na ściskanie najpierw rośnie, a następnie maleje. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,8, wytrzymałość na ściskanie wzrasta o 1%. Gdy moc ultradźwięków wynosi 400 W, wytrzymałość na zginanie najpierw wzrasta, a następnie maleje wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, wytrzymałość na zginanie wzrasta nawet o 31%. Wraz ze wzrostem stosunku masowego MGO do SP wytrzymałość na ściskanie najpierw rośnie, a następnie maleje. Gdy stosunek masowy MGO do SP wynosi 0,4, wytrzymałość na ściskanie wzrasta o 3%.

Zgodnie z powyższymi wynikami, przy stałej zawartości dyspersji MGO i stosunku masowym MGO do SP wynoszącym 0,4, wytrzymałość ulega większej poprawie. Stosunek masowy MGO do SP ma duży wpływ na wytrzymałość wczesną betonu UHPC. Jednak wraz z upływem czasu stosunek masowy MGO/SP nie wywiera znaczącego wpływu na poprawę wytrzymałości na ściskanie. Może to wynikać z faktu, że podczas przygotowywania betonu UHPC część SP tworzy warstwę na powierzchni ziaren cementu, opóźniając hydratację (30). Wraz z upływem czasu otoczone ziarna cementu są stopniowo uwalniane. Reakcja hydratacji powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie. Jest to również przyczyną wzrostu wytrzymałości na ściskanie próbek o stosunku masowym MGO do SP wynoszącym 0,8 i 1,2 w wieku 28 dni.

4. Wnioski

Za pomocą spektrofotometrii UV-VIS zbadano wpływ różnych mocy ultradźwięków oraz stosunków masowych MGO do SP na stabilność dyspersji MGO w wodzie dejonizowanej i nasyconej wodzie wapiennej. Zbadano również wpływ dyspersji MGO wykonywanej przy różnych mocach ultradźwięków i stosunkach masowych MGO do SP na konsystencję oraz właściwości mechaniczne betonu UHPC. Głównie wnioski są następujące.

[1] Dyspersja MGO jest lepsza w wodzie dejonizowanej niż w nasyconej wodzie wapiennej. Absorbancja MGO w wodzie dejonizo-

in flexural strength is 6 %. When the mass ratio of MGO to SP is 0.8, the maximum compressive strength increase is 15 %. When the ultrasonic power is 400 W, the bending strength increases first and then decreases with the increase of the MGO to SP mass ratio. When the MGO to SP mass ratio is 0.8, the bending strength increases to 15 %. With the increase of MGO to SP mass ratio, the compressive strength increases first and then decreases. When the MGO to SP mass ratio is 0.4, the compressive strength increases to 28 %.

When the MGO content is 0.02 wt.%, the compression and folding strength of UHPC at 7d age with different MGO to SP mass ratios are shown in Fig. 18 [c] and [d]. When the ultrasonic power is 120 W, the flexural strength and compressive strength both increase first and then decrease with the increase of MGO to SP mass ratio. When the mass ratio of MGO to SP is 0.8, the maximum flexural and compressive strength increase is 5 %, when the mass ratio of MGO to SP is 0.4. When the ultrasonic power is 400 W, the bending strength increases first and then decreases with the increase of the MGO to SP mass ratio. When the MGO to SP mass ratio is 0.4, the bending strength increases to 18%. With the increase of MGO to SP mass ratio, the compressive strength increases first and then decreases. When the MGO to SP mass ratio is 0.4, the compressive strength increases to 16%.

When the MGO content is 0.02 wt.%, the compressive and flexural strength of UHPC at 28d age with different MGO to SP mass ratios is shown in Fig. 18 [e] and [f]. The MGO and SP mass ratio has little influence on 28d compressive strength. When the ultrasonic power is 120 W, the bending strength increases first and then decreases with the increase of the MGO-SP mass ratio. When the MGO-SP mass ratio is 0.4, the bending strength increases to 4 %. With the increase of MGO to SP mass ratio, the compressive strength increases first and then decreases. When the MGO to SP mass ratio is 0.8, the compressive strength increases to 1 %. When the ultrasonic power is 400 W, the bending strength increases first and then decreases with the increase of the MGO-SP mass ratio. When the MGO-SP mass ratio is 0.4, the bending strength increases up to 31 %. With the increase of MGO to SP mass ratio, the compressive strength increases first and then decreases. When the MGO to SP mass ratio is 0.4, the compressive strength increases to 3 %.

According to the above results, when the MGO content is fixed, and the mass ratio of MGO to SP is 0.4, the strength is improved more. The mass ratio of MGO and SP has a great influence on the early age strength of UHPC. However, with the increase of age, the MGO/SP mass ratio has no significant improvement effect on compressive strength. This may be due to the fact that during the preparation of UHPC, part of the SP powder will wrap around the outside of the UHPC when mixed with the UHPC dry material. SP forms fluff on the surface of cement mineral particles, thus preventing the polymerization of cement mineral particles (30). As the age increases, the encased cement mineral particles are gradually released. The hydration reaction continues to increase the compressive strength. This is also the reason for the increase in compressive strength of specimens with MGO to SP mass ratio

wanej maleje, gdy stosunek masowy MGO do SP osiąga wartość 1,2. Przy mocy ultradźwięków wynoszącej 120 W, 400 W i 600 W absorbancja maleje odpowiednio o 27,4%, 31,5% i 32,7%. Absorbancja dyspersji MGO w nasyconej wodzie wapiennej zmniejszała się powoli, gdy stosunek masowy MGO do SP osiągnął 1,6. Przy mocy ultradźwięków wynoszącej 120 W, 400 W i 600 W absorbancja zmniejsza się odpowiednio o 39,2%, 28,6% i 35,5%. Im lepsza dyspersja MGO w nasyconej wodzie wapiennej, tym wyraźniejszy wzrost wytrzymałości wczesnej.

[2] Dodatek MGO zwiększa rozplływ betonu UHPC. Przy mocy ultradźwięków wynoszącej 120 W i 400 W rozplływ betonu UHPC rośnie wraz ze wzrostem zawartości MGO, a maksymalny wzrost wynosi 18%. Rozplływ betonu UHPC przy mocy ultradźwięków 400 W jest większy niż przy mocy 120 W, gdy zawartość MGO pozostaje niezmienną. Przy mocy ultradźwięków 600 W konsystencja najpierw wzrasta, a następnie maleje wraz ze wzrostem zawartości MGO, a maksymalny wzrost wynosi 22%. Pod wpływem SP rozplływ przy mocy ultradźwiękowej 120 W i 400 W wzrasta wraz ze wzrostem stosunku masy MGO do masy SP, a maksymalny wzrost wynosi 23%. W próbkach zawierających roztwór SP, dodanie proszku SP może poprawić konsystencję UHPC. Rozplływ betonu UHPC zmieszanego z proszkiem SP jest mniejszy niż betonu UHPC zmieszanego z SP w postaci roztworu. Rozplływ betonu UHPC zmieszanego z SP w roztworze jest mniejszy niż w przypadku betonu UHPC zmieszanego z obiema postaciami SP.

[3] MGO ma wyraźny wpływ na wczesną wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu UHPC. Gdy zawartość MGO wynosi 0,02% mas., a moc ultradźwięków 400 W, MGO zapewnia najlepszy efekt poprawy wytrzymałości betonu UHPC. Jednak wraz ze wzrostem zawartości MGO wpływ mocy ultradźwięków na zwiększenie wytrzymałości ulega osłabieniu. Gdy moc ultradźwięków wynosi 600 W, MGO nie poprawia znacząco wytrzymałości betonu UHPC. Pod wpływem SP, przy mocy ultradźwięków wynoszącej 400 W, wytrzymałość betonu UHPC na ściskanie i zginanie ulega znacznej zmianie we wczesnym okresie. Ponieważ całkowita ilość SP jest stała, zmiana stosunku masowego MGO do SP jedynie opóźnia tempo wzrostu wytrzymałości.

Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić wdzięczność za wsparcie finansowe udzielone przez Narodową Fundację Nauk Przyrodniczych [NSFC] Chińskiej Republiki Ludowej nr 52078370.

Oświadczenie o braku konfliktu interesów

Autorzy oświadczają, że nie mają żadnych znanych, konkurencyjnych interesów finansowych ani osobistych powiązań, które mogłyby wywrzeć wpływ na wyniki przedstawione w niniejszym artykule.

of 0.8 and 1.2 at 28 d age. Since the encased cement mineral particles are evenly distributed throughout the UHPC body, the surrounding hydration reaction can continue after being released. This enhances the binding force between the hydration products and makes the flexural strength increase significantly in the later period.

4. Conclusion

The effects of different ultrasonic power levels and mass ratios of MGO to SP on the dispersibility of MGO in deionized water and saturated lime water were studied by UV-VIS spectrophotometry. The effects of MGO dispersions with different ultrasonic power and mass ratios of MGO to SP on the fluidity, compressive and flexural strength of UHPC were studied. The main conclusions are as follows.

[1] The dispersion of MGO is better in deionized water than in saturated lime water. The absorbance of MGO in deionized water decreases when the mass ratio of MGO to SP reaches 1.2. When the ultrasonic power is 120 W, 400 W, and 600 W, the absorbance decreases by 27.4 %, 31.5 %, and 32.7 %, respectively. The absorbance of MGO dispersion in saturated lime water decreased slowly when the mass ratio of MGO to SP reached 1.6. When the ultrasonic power is 120 W, 400 W, and 600 W, the absorbance decreases by 39.2 %, 28.6 %, and 35.5 %, respectively. The better the dispersion of MGO in saturated lime water, the more obvious the early strength improvement.

[2] The addition of MGO increases the fluidity of UHPC. When the ultrasonic power is 120 W and 400 W, the fluidity of UHPC increases with the increase of MGO content, and the maximum increase is 18 %. The fluidity of UHPC at 400 W ultrasonic power is greater than that at 120 W ultrasonic power when the MGO content is unchanged. When the ultrasonic power is 600 W, the fluidity increases first and then decreases with the increase of MGO content, and the maximum increase is 22 %. Under the influence of SP, the mobility of ultrasonic power for 120 W and 400 W increases with the increase of MGO to SP mass ratio, and the maximum increase is 23 %. In the presence of liquid SP, the addition of SP powder can improve the fluidity of UHPC slurry. The fluidity of UHPC mixed with SP powder is less than that of UHPC mixed with liquid SP. The fluidity of UHPC mixed with liquid SP is less than that of UHPC mixed with liquid SP and SP powder.

[3] MGO has an obvious effect on the early-age compressive and flexural strength of UHPC. When the MGO content is 0.02 wt.%, and the ultrasonic power is 400 W, the MGO has the best enhancement effect on UHPC strength. However, with the increase of MGO content, the enhancement effect of ultrasonic power on strength is weakened. When the ultrasonic power is 600 W, MGO does not significantly improve the strength of UHPC. Under the influence of SP, when the ultrasonic power is 400 W, the compressive and flexural strength of UHPC changes significantly at an early age.

Literatura / References

1. B. Han, L. Zhang, S. Zeng, et al., Nano-core effect in nano-engineered cementitious composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **95**, 100-109 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.01.008>
2. S. Bai, L. Jiang, N. Xu, et al., Enhancement of mechanical and electrical properties of graphene/cement composite due to improved dispersion of graphene by addition of silica fume. *Constr. Build. Mater.* **164**, 433-441 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.176>
3. W. Zeng, P. Wang, Y. Zhang, et al., The effect of carbon nanotubes on the mechanical and damping properties of macro-defect-free cements. *Sci. Eng. Compos. Mater.* **27**(1), 28-40 (2020). <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0005>
4. Y. Ruan, D. Zhou, S. Sun, et al., Self-damping cementitious composites with multi-layer graphene. *Mater. Res. Express* **4**(7), 075605 (2017). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa78e4>
5. P. Yu, Z. Wang, S. Lu, et al., Effects of carbon nanofibers and carboxyl functionalized multi-walled carbon nanotubes on mechanical damping behavior of cement paste. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **19**(1), 163-169 (2019). <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16465>
6. Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J.W. Suk, J.R. Potts, R.S. Ruoff, Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv. Mater.* **22**(35), 3906-3924 (2010). <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>
7. A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, A.G. Nasibulin, et al., SEM/AFM studies of cementitious binder modified by MWCNT and nano-sized Fe needles. *Mater. Charact.* **60**(7), 735-740 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.11.001>
8. S. Lv, S. Ting, J. Liu, Q. Zhou, Use of graphene oxide nanosheets to regulate the microstructure of hardened cement paste to increase its strength and toughness. *Cryst. Eng. Comm.* **16**(36), 8508-8516 (2014). <https://doi.org/10.1039/C4CE00684D>
9. G.J. Jing, Z.M. Ye, X.L. Lu, et al., Incorporating graphene oxide into lime solution: a study of flocculation and corresponding improvement. *Mater. Constr.* **68**(331), e165 (2018). <https://doi.org/10.3989/mc.2018.05217>
10. Y. Li, R. Umer, Y.A. Samad, et al., The effect of the ultrasonication pre-treatment of graphene oxide (GO) on the mechanical properties of GO/polyvinyl alcohol composites. *Carbon* **55**, 321-327 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.071>
11. S. Chuah, W. Li, S.J. Chen, J.G. Sanjayan, W.H. Duan, Investigation on dispersion of graphene oxide in cement composite using different surfactant treatments. *Constr. Build. Mater.* **161**, 519-527 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.154>
12. Y. Gao, H.W. Jing, S.J. Chen, et al., Influence of ultrasonication on the dispersion and enhancing effect of graphene oxide-carbon nanotube hybrid nanoreinforcement in cementitious composite. *Compos. Part B Eng.* **164**, 45-53 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.066>
13. L. Zhao, X. Guo, Y. Liu, et al., Hydration kinetics, pore structure, 3D network calcium silicate hydrate, and mechanical behavior of graphene oxide reinforced cement composites. *Constr. Build. Mater.* **190**, 150-163 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.105>
14. L. Zhao, S. Zhu, H. Wu, et al., Deep research about the mechanisms of graphene oxide (GO) aggregation in alkaline cement pore solution. *Constr. Build. Mater.* **247**, 118446 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118446>
15. A.H. Korayem, N. Tourani, M. Zakertabrizi, A.M. Sabziparvar, W.H. Duan, A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices: nanoparticle geometry perspective. *Constr. Build. Mater.* **153**, 346-357 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.164>
16. M. Birenboim, R. Nativ, A. Alatawna, et al., Reinforcement and workability aspects of graphene-oxide-reinforced cement nanocomposites. *Compos. Part B Eng.* **161**, 68-76 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.030>
17. B. Liu, L. Wang, G. Pan, et al., Dispersion of graphene oxide modified polycarboxylate superplasticizer in cement alkali solution for improving cement composites. *J. Build. Eng.* **57**, 104860 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104860>
18. P.V.R.K. Reddy, D. Ravi Prasad, A study on workability, strength and microstructure characteristics of graphene oxide and fly ash based concrete. *Mater. Today Proc.* **62**, 2919-2925 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.495>

Because the total amount of SP is fixed, the change of MGO to SP mass ratio only delays the growth rate of strength.

Acknowledgments

The authors would like to appreciate the financial sponsored by National Natural Science Foundation [NSFC] of PR China No. 52078370.

Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

19. Y. Shang, D. Zhang, C. Yang, et al., Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes. *Constr. Build. Mater.* **96**, 20-28 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.181>
20. M.E. Abrishami, V. Zahabi, Reinforcing graphene oxide/cement composite with NH₂ functionalizing group. *Bull. Mater. Sci.* **39**(4), 1073-1078 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12034-016-1250-7>
21. J. Liu, L. Zhao, F. Chang, et al., Mechanical properties and microstructure of multilayer graphene oxide cement mortar. *Front. Struct. Civ. Eng.* **15**(4), 1058-1070 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0747-3>
22. W.-J. Long, H.-D. Li, C.-L. Fang, et al., Uniformly dispersed and re-agglomerated graphene oxide-based cement pastes: a comparison of rheological properties, mechanical properties and microstructure. *Nanomaterials* **8**(1) (2018). <https://doi.org/10.3390/nano8010031>
23. J. Liu, L. Zhao, L. Chi, et al., Effect of multilayer graphene oxide on the hydration and early mechanical strength of cement mortar in low temperature. *Constr. Build. Mater.* **364**, 129997 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129997>
24. GB/T 50081-2019, Standard for test methods for physical and mechanical properties of concrete. Ministry of Housing and Urban-Rural Development, 2019.
25. GB/T 2419-2005, Test method for fluidity of cement mortar. Chinese National Standard, 2005.
26. GB/T 17671-2021 | Test method of cement mortar strength. Chinese National Standard, 2021.
27. B. Zou, S.J. Chen, A.H. Korayem, et al., Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes. *Carbon* **85**, 212-220 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.094>
28. Y. Yao, Y. Pan, S. Liu, Power ultrasound and its applications: a state-of-the-art review. *Ultrason. Sonochem.* **62**, 104722 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104722>
29. J. Chen, L. Huang, L. Dong, et al., Hydration behavior of MgO surface: a first-principles study. *Appl. Surf. Sci.* **611**(Part A), 155441 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155441>
30. L. Lei, J. Plank, A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance. *Cem. Concr. Res.* **42**(10), 1299-1306 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.07.001>