

Research on landscape design of urban residential areas based on ecological green nanomaterials

Badania nad projektowaniem krajobrazu miejskich obszarów mieszkalnych z wykorzystaniem ekologicznych zielonych nanomateriałów



DOI: 10.15199/62.2026.9.9

Komercyjnie dostępny cement portlandzki i popiół lotny mieszano z nanomodyfikowanym aerożelem, włóknami z poli(alkoholu winylowego) oraz komercyjnie dostępnym superplastyfikatorem, a następnie otrzymane z tych mieszanin próbki poddano badaniom podstawowych właściwości mechanicznych. W szczególności przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla grup kontrolnych. Po modyfikacji uzyskano znaczną poprawę właściwości cementu.

Słowa kluczowe: nanomodyfikowane materiały, cement granulowany, właściwości mechaniczne

A com. portland cement and fly ash were mixed with nano-modified aerogel, poly(vinyl alc.) fibers and a com. superplasticizer and the resulting mixts. were then studied for basic mech. properties. In particular, the compression and bending tests were performed. The results were compared with those of control groups. A significant improvement of the cement properties was achieved after modification.

Keywords: nano-modified materials, granular cement, mechanical properties

Nanotechnologia umożliwia otrzymywanie nowych, bardziej zaawansowanych materiałów o specjalnych właściwościach i funkcjach poznawczych¹⁾. Wprowadzanie nanomodyfikowanych materiałów do cementu granulowanego jest powszechnie stosowaną metodą ograniczania typowego zjawiska pęknięcia cementu oraz poprawy jego ciągliwości. Ogólnie rzecz biorąc, materiały z cementu granulowanego mają wieloskalową strukturę hierarchiczną, a możliwości ich wzmacniania za pomocą tradycyjnych włókien są ograniczone²⁾. Jednak cement granulowany można wzmacniać poprzez dodatek nanomateriałów o różnych właściwościach³⁾.

Zhigang i współpr.⁴⁾ wzmacniali cement granulowany poprzez dodatek mikrowłókien stalowych i zaobserwowali wzrost jego ciągliwości. Tao i współpr.⁵⁾ poprawili trwałość i wytrzymałość cementu granulowanego poprzez połączenie mikrowłókien stalowych z włóknami z poli(alkoholu winylowego), jednak efekt ograniczenia powstawania pęknięć nie był wyraźny. Jing i współpr.⁶⁾ poprawili właściwości cementu poprzez dodatek nanorurek węglowych. Chociaż odporność na pęknięcie uległa znacznej poprawie, właściwości termoizolacyjne nie uległy zmianie.

W celu rozwiązania problemu modyfikacji cementu granulowanego w niniejszym badaniu wprowadzono

Nanotechnology delivers new, more comprehensive materials with special properties and cognitive functions¹⁾. Incorporating nano-modified materials into granular cement is a common method to remove the common cracking phenomenon of cement and improve its toughness. In general, granular cement materials have a multi-scale hierarchical structure, and use of traditional fibers to their reinforcement is limited²⁾. However, the granular cement can be strengthened by addition of nanomaterials with various properties³⁾.

Zhigang et al.⁴⁾ reinforced granular cement by addition of micro-steel fibers and observed an increase the toughness of the cement. Tao et al.⁵⁾ have improved the durability and strength of granular cement by combining micro-steel fibers with poly(vinyl alcohol) fibers, but the effect of crack suppression treatment was not obvious. Jing et al.⁶⁾ improved the cement by addition of carbon nanotubes. Although the fracture resistance was significantly improved, but the thermal insulation properties were not changed.

To solve the problem of granular cement modification, nano-modified materials were incorporated into granular cement and the characteristics of modified cement were explored in this study. In fact, the nano-modified materials could be easily piled up and the granular cement became stronger. However, nano-modified materials have high fragility, and the incorporation of pure nano-modified materials into granular cement will affect the basic mechanical properties of granular cement. Therefore, the nano-modified

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Guangxi University of Science and Technology, Guangxi Liuzhou 545006, China, e-mail: wangziwei8889@hotmail.com

nanomodyfikowane materiały do cementu granulowanego oraz zbadano właściwości zmodyfikowanego cementu. W rzeczywistości nanomodyfikowane materiały można było łatwo układać warstwami, dzięki czemu cement granulowany stawał się mocniejszy. Jednak nanomodyfikowane materiały charakteryzują się dużą kruchością, a wprowadzenie czystych nanomodyfikowanych materiałów do cementu granulowanego wpływa na podstawowe właściwości mechaniczne cementu granulowanego. Dlatego do cementu granulowanego dodano nanomodyfikowany materiał oraz włókna kompozytowe w celu poprawy adhezji pomiędzy cząstkami nanomodyfikowanego materiału dzięki efektowi wiążącemu włókien. Zbadano podstawowe właściwości mechaniczne cementów z dodatkiem tych materiałów.

Część doświadczalna

Materiały

Jako materiał podstawowy do badań zastosowano nanomodyfikowany cement granulowany P.O 52,5, który spełniał wymagania chińskiej normy GB175-2007⁷⁾. Jego podstawowe właściwości przedstawiono w tabeli 1.

W badaniach zamiast cementu zastosowano również popiół lotny, w celu obniżenia kosztów materiałów. Popiół lotny mógł zwiększać odporność zmodyfikowanego cementu granulowanego na działanie wysokich temperatur dzięki właściwościom pucolanowym⁸⁾. Skład chemiczny popiołu lotnego zastosowanego w badaniu przedstawiono w tabeli 2.

Do badania podstawowych właściwości mechanicznych kruszywa drobnego wybrano drobny piasek o gęstości 2,59 g/cm³. Zastosowano dostępny w handlu superplastyfikator na bazie kwasu polikarboksylowego w postaci jasno-żółtego proszku (Qingzhou Shengfengchen New Material Technology Co.)⁹⁾. Bezpośrednio wykorzystano wodę z miejskiej sieci wodociągowej. W badaniu zastosowano również rozpuszczalne w wodzie włókna z poli(alkoholu winylowego) Kuraray K-II Colalon REC15 PVA (rys. 1, tabela 3).

Nanomateriał zastosowany w badaniu był nanokompozytem zawierającym hydrofobowy aerożel, wyprodukowanym przez firmę Hongda Technology. Zawartość aerożelu wynosiła 25%, a gęstość w stanie suchym była bardzo mała i wynosiła 0,19 g/cm³. Nanokompozytowy materiał zastosowano w stanie ułożonym warstwowo, w warunkach naturalnych (rys. 2).

Metodyka badań

Do rozproszenia materiału nanokompozytowego zastosowano metodę szybkiego mieszania. Po trwającym 2 min mieszaniu z dużą prędkością uzyskano mętną ciecz z równomiernie rozproszonym materiałem nanokompozytowym, w której następnie zdyspergowano suchy proszek UHTCC¹⁰⁾.

W badaniu zastosowano 2 grupy kontrolne. Pierwszą z nich był ultrawytrzymały kompozytowy materiał cementowy. W przypadku pierwszej grupy kontrolnej proszek mieszano przez 4 min, następnie dodawano wodę i środek zmniejsza-

Table 1. Basic properties of P.O 52.5 cement used in the test

Tabela 1. Podstawowe właściwości cementu P.O 52,5 zastosowanego w badaniu

Properties/Właściwości	Value/Wartość
MgO content/Zawartość MgO, %	5.13
SO ₃ content/Zawartość SO ₃ , %	3.59
Cl ⁻ ion content/Zawartość jonów Cl ⁻ , %	0.058
Alkalinity/Zasadowość	-
Fine-grained fraction content/Zawartość frakcji drobnoziarnistej, %	10.12
Loss on ignition/Strata prażenia, %	2.14
Initial setting time/Czas początku wiązania, min	43
Final setting time/Czas końca wiązania, min	583
Flexural strength/Wytrzymałość na zginanie, MPa	22.31
Compressive strength/Wytrzymałość na ściskanie, MPa	53.17

Table 2. Chemical composition of fly ash used in the study

Tabela 2. Skład chemiczny popiołu lotnego zastosowanego w badaniu

Component/Składnik	Content/Zawartość, %
Calcium oxide/Tlenek wapnia	19.83
Silica/Krzemionka	50.41
Aluminum oxide/Tlenek glinu	20.74
Ferric oxide/Tlenek żelaza(III)	3.17
Manganese oxide/Tlenek manganu	2.11
Sulfur trioxide/Tlenek siarki(VI)	-
Potassium oxide/Tlenek potasu	1.39
Sodium oxide/Tlenek sodu	2.21
Loss on ignition/Strata prażenia	1.39

material and composite fibers were added to the granular cement to improve the adhesion between the nano-modified material by fiber's bonding effect. The doped cements were studied to determine their basic mechanical properties.

Experimental

Materials

The nano-modified granular P.O 52.5 cement was used as a basic material for the tests, that met requirements of the Chinese standard GB175-2007⁷⁾. Its basic properties were collected in Table 1.

A fly ash was also used instead of cement in the tests to reduce material costs. The fly ash could enhance the high temperature resistance of modified granular cement through the properties of pozzolans⁸⁾. Chemical composition of the fly ash used in the test was shown in the Table 2.

Fine sand (density was 2.59 g/cm³) was selected for studying basic mechanical properties of the fine aggregate. A commercial polycarboxylic acid superplasticizer was used as a light yellow powder (Qingzhou Shengfengchen New Material Technology Co.)⁹⁾. The municipal tap water was directly used. Water-soluble poly(vinyl alcohol) Kuraray's K-II Colalon REC15 PVA fibers were also used in the test (Fig. 1, Table 3).



Fig. 1. K-II Colalon REC15 PVA fibers

Rys. 1. Włókna PVA K-II Colalon REC15

Table 3. Basic properties of K-II Colalon REC15 PVA fibers

Tabela 3. Podstawowe właściwości włókien PVA K-II Colalon REC15

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Fineness/Masa liniowa, dtex	15.21
Length/Długość, mm	12.33
Diameter/Średnica, mm	0.038
Tensile strength/Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	1589
Stretch length/Wydłużenie przy rozciąganiu, %	6.83
Tensile modulus/Moduł sprężystości przy rozciąganiu, GPa	42.76
Density/Gęstość, g/m ³	1.31

jący ilość potrzebnej w mieszance wody i kontynuowano mieszanie przez 15 min. Następnie dodawano włókna PVA i mieszano przez kolejne 3 min. Drugą grupę kontrolną stanowiła powłoka ognioodporna Sichuan Tianfu. Mieszaniny grupy kontrolnej składały się ze środka gruntującego i proszku w stosunku 4:5. Umieszczono je na zewnątrz na 28 dni w celu wysuszenia i utwardzenia. Powłoka ognioodporna Sichuan Tianfu była produktem pęczniejącym i stanowiła dobrą podstawę do porównań.

Próbki cementu granulowanego z dodatkiem nanomodyfikowanych materiałów poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Kolejność badanych próbek była następująca: próbka nanomodyfikowanego materiału cementowego, próbka porównawcza UHTCC oraz 2 próbki porównawcze powłoki ognioodpornej Sichuan Tianfu.

W badaniu wytrzymałości na ściskanie zastosowano standardową hydrauliczną maszynę wytrzymałościową (60 t) (rys. 3). Badanie to polegało na określeniu wytrzymałości na ściskanie konwencjonalnego modyfikowanego cementu w postaci kostek (80 × 80 × 80 mm), o różnych proporcjach składników, w temperaturze pokojowej oraz po 1-godzinym działaniu wysokiej temperatury. Przed badaniem powierzchnię odlanej próbki zmodyfikowanego cementu należało oszlifować. W przypadku próbek przeznaczonych



Fig. 2. Nanocomposite materials used in the experiment

Rys. 2. Nanokompozytowe materiały zastosowane w badaniu

The nano-modified material used in the test was a hydrophobic aerogel-containing nano-composite produced by Hongda Technology company. The aerogel content was 25% and the dry density was ultra-low (0.19 g/cm³). The nanocomposite material was used in a stacked state under natural conditions (Fig. 2).

Methods

A high-speed stirring method was used to disperse the nanocomposite material. After 2 min long high-speed stirring, a uniformly dispersed nanocomposite turbid liquid was obtained, then dispersed by UHTCC dry powder⁽¹⁰⁾.

Two control groups were used in the test. The first one was an ultra-tough composite cement material. The control group stirred the powder for 4 min, mixed with water and a water reducing agent, and continued to stir for 15 min. PVA fibers were then added and stirred for 3 min. The second control group was Sichuan Tianfu fire-resistant coating. The control group mixtures consisted of interface agent with the powder in a 4:5 ratio. They were placed outdoors for 28 days for drying and curing. Sichuan Tianfu Fireproof Coating was a lung-expanding fireproof product and has good comparative reference value.

The granular cement test specimens doped with nano-modified materials were subjected to compression and bending tests. The order of the test pieces was the nano-modified cement material test piece, the UHTCC comparison test piece, and two Sichuan Tianfu fireproof coating comparison test pieces.

In the compression test, a common hydraulic material testing machine (60 t) was used (Fig. 3). The content of the compression test is to test the compressive strength of conventional cube-modified cement (80 × 80 × 80 mm) with different proportions at room temperature and high temperature for one hour. Before the test, the cast surface of the modified cement test piece needs to be ground. For normal temperature test pieces, a vernier caliper + grinding wheel is used to solve

do badań w temperaturze pokojowej zastosowano suwmiarkę i ściernicę. W przypadku próbek przeznaczonych do badań w wysokiej temperaturze do wygładzenia powierzchni zastosowano papier ścierny. Przed rozpoczęciem właściwego badania wytrzymałości na ściskanie konieczne było wstępne obciążenie próbki, a po jego zakończeniu próbkę bezpośrednio obciążano aż do jej zniszczenia, przy szybkości przyrostu siły wynoszącej 2–3 kN/s. Każda seria badań obejmowała 3 próbki. Podczas badania obserwowano zniszczenie struktury próbki oraz odnotowywano wartość wytrzymałości na ściskanie kostki z badanego materiału. Następnie obliczano średnią wartość tego parametru dla całego badania. W przypadku dużego rozrzutu wyników badania wytrzymałości na ściskanie konieczne było zwiększenie liczby badanych próbek.

Wyniki badań i ich omówienie

W warunkach wysokiej temperatury próbki cementu granulowanego z dodatkiem nanomodyfikowanych materiałów zachowywały integralność powierzchni i po wypalaniu w wysokiej temperaturze przybierały jasno-żółtą barwę. Na powierzchni występowały drobne pory (bez odpajania się materiału). W przeciwieństwie do 2 badanych próbek, większość próbek UTHCC wykazywała pęknięcia i umiarkowaną stabilność, natomiast próbki powłoki ognioodpornej Sichuan Tianfu miały sypką i wilgotną strukturę oraz zasadniczo utraciły wewnętrzną nośność cementu granulowanego. Dlatego wszystkie próbki porównawcze wykazywały w wysokich temperaturach znaczne spękania oraz pewien stopień odpajania się materiału. Wyniki badań wykazały, że nanomodyfikowane materiały mogą skutecznie ograniczać efekt eksplozyjnego rozpryskiwania cementu granulowanego w warunkach wysokiej temperatury.

Spośród próbek zawierających różne proporcje nanomateriałów najmniejszą wytrzymałość na ściskanie wykazała próbka zawierająca 30% nanomateriału, natomiast największą próbka zawierająca 40% nanomateriału. Wraz ze wzrostem udziału nanomodyfikowanych materiałów zmniejszała się zawartość cementu granulowanego, co mogło prowadzić do zmniejszenia stopnia hydratacji w modyfikowanym materiale. W rezultacie w wyższych temperaturach udział nanomodyfikowanych materiałów był większy. Ponieważ nanomateriały charakteryzowały się wysoką aktywnością i mogły przyspieszać hydratację cementu granulowanego, to im większy był udział materiału modyfikującego, tym większa była wytrzymałość materiału w warunkach normalnej temperatury. Ponieważ kompozyty aerożelowe zawarte w nanomodyfikowanych materiałach zawierały dużą ilość włókien, działanie wysokiej temperatury prowadziło do powstawania większych porów i zmniejszenia prawdopodobieństwa gwałtownego pęknięcia materiału modyfikowanego, co z kolei mogło poprawiać jego podstawowe właściwości mechaniczne.

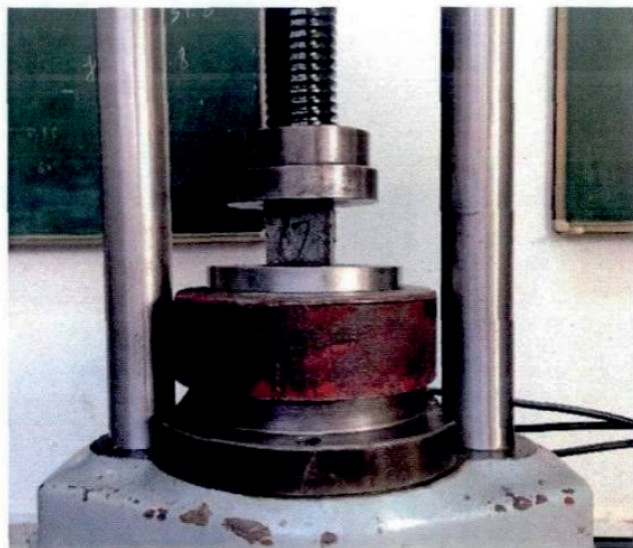


Fig. 3. General hydraulic material testing

Rys. 3. Ogólne badanie materiałów hydraulicznych

them. For high temperature test pieces, sand paper is used for smoothing. Before the formal compression test began, it was necessary to pre-compress the test piece, and after the compression was completed the test piece was directly compressed to a destruction force of 2–3 kN/s. Each set of tests contained 3 test pieces. During the test, the morphology of the test piece was destroyed and the compressive strength value of the test piece cube was observed and recorded, and the average value of the compression test was finally calculated. When the dispersion of the compression test piece was large, an increase of test piece number was necessary.

Results and discussion

In a high-temperature environment, the granular cement test specimens doped with nano-modified materials could ensure a complete appearance and appear pale yellow after high-temperature baking. The surface had some small pores (no shedding). In contrast to the 2 test specimens, most of the UTHCC specimens exhibited cracking and average stability, while the Sichuan Tianfu fireproof coating specimens appeared powdery and watery, and had basically lost the internal bearing capacity of granular cement. Therefore, the comparative specimens all showed significant cracks at high temperatures and a certain proportion of shedding. The experimental results showed that the nano-modified materials could effectively suppress the bursting effect of the high-temperature environment on granular cement.

In the comparison of the proportion of nanomaterials, the compressive strength of the 30% nanomaterial test piece was the lowest, and the 40% nanomaterial test piece had the highest compressive strength. With the increase of the proportion of nano-modified materials, the content of granular cement decreased, so that the degree of hydration in the modified materials could decrease, and finally, at higher temperatures, the proportion of modified materials was higher. Because nanomaterials had strong nanoactivity

Wraz ze wzrostem zawartości nanomateriałów stopniowo zwiększała się utrata masy próbki, przy czym próbka z materiału ognioodpornego Sichuan Tianfu wykazywała największą utratę masy. Po obróbce w wysokiej temperaturze próbki UHTCC ulegały gwałtownemu rozpadowi i wydzielaly drażniące gazy, a w przypadku 2 pozostałych materiałów porównawczych nie obserwowano znacznej emisji drażniących gazów w wysokich temperaturach. Ogólnie rzecz biorąc, wraz ze wzrostem temperatury otoczenia wnętrze materiału ulegało rozkładowi termicznemu i pochłaniało energię, dlatego materiał charakteryzujący się większą utratą masy wykazywał silniejszy efekt odprowadzania ciepła.

Wnioski

Cząstki cementu mieszano z nanomodyfikowanym aerozelem, superplastyfikatorem oraz włóknami z poli(alkoholu winylowego) w celu poprawy ich podstawowych właściwości mechanicznych (wytrzymałości na ściskanie i zginanie). Na podstawie porównania wykazano, że po wprowadzeniu nanomodyfikowanych materiałów uzyskano najlepsze podstawowe właściwości mechaniczne cementu granulowanego. W porównaniu z wynikami uzyskanymi dla grup kontrolnych zmodyfikowany cement granulowany wykazywał lepsze właściwości niż materiał wyjściowy. W szczególności znacznie poprawiły się wytrzymałość na ściskanie i zginanie oraz odporność cementu granulowanego na pękanie. Nanomodyfikowany cement może być stosowany w budynkach i ścianach przeciwpożarowych.

Podziękowania

Badanie zostało sfinansowane w ramach projektu „Podnoszenie podstawowych zdolności badawczych młodych pracowników naukowych na uniwersytetach w Guangxi w 2021 r.”, projektu „Zastosowanie procesu artystycznego emaliowania kolorowego w badaniach nad ceramiką z Guangxi” oraz projektu „Nauki humanistyczne i społeczne”, nr 2021KY0327.

Received/Otrzymano: 19-06-2025

Accepted/Zaakceptowano: 19-08-2026

and could promote the hydration of granular cement, the higher the proportion of the modified material, the higher the strength of the material under normal temperature conditions. Because aerogel composites in nano-modified materials contained a large amount of fibers, high temperature resulted in larger pores and reduction of the probability of bursting of the modified material, which could then improve the basic mechanics of the modified material performance.

As the amount of nano-materials gradually increased, the quality loss of the test piece gradually increased, and the Sichuan Tianfu fireproof material test piece had the largest mass loss. After high temperature treatment, UHTCC specimens bursted and produced pungent gases, but the other 2 comparative materials did not produce significant pungent gases at high temperatures. In general, as the temperature of the environment rose, the interior of the material was thermally decomposed and absorbed energy, so the material with more mass loss had stronger heat dissipation effect.

Conclusions

The cement particles were mixed with nano-modified aerogel, a superplasticizer and a poly(vinyl alcohol) fibers to improve their basic mechanical properties (compression and bending tests). It was proved through comparison that the basic mechanical properties of the granular cement were the best after the nano-modified materials were incorporated. After comparison with results in control groups, the modified granular cement had better properties than the initial one. In particular, the compression and bending performance and the crack resistance of granular cement were greatly improved. The nano-modified cement can be used in buildings and firewalls.

Acknowledgments

The study was supported by project of improvement of basic ability of scientific researching in young mentors in GuangXi's universities in 2021, Enameled color art process in applied research in GuangXi earthenware, Humanities and social science 2021KY0327.

Reviewed/Zrecenzowano: 30-09-2025

Published/Opublikowano: 17-09-2026

REFERENCES/LITERATURA

- [1] H. Rui, Y. Zhe, Z. Jiali, Ch. Huaxin, *J. Chang'an Univ. Nat. Sci. Ed.* 2019, **39**, No. 2, 19.
- [2] F. Yusi, L. Shuoqiong, L. Huiting, J. Jianzhou, Y. Yongjin, *Drill. Fluid Complet. Fluid* 2018, **35**, No. 6, 93.
- [3] X. Xiaoqian, L. Yang, Z. Jinglin, Z. Qingen, W. Pan, *Constr. Sci. Technol.* 2018, No. 19, 49.
- [4] Q. Zhigang, Z. Xiaomin, L. Zijie, Ch. Fei, L. Xuanjun, W. Shaoxian, *Drill. Prod. Technol.* 2018, **41**, No. 5, 85.
- [5] S. Tao, Z. Min, L. Zexin, G. Chunping, *J. Composites* 2018, **35**, No. 5, 1033.
- [6] L. Jing, L. Xiaoyan, Z. Yazhou, T. Tian, A. Ting, *Concrete Cement Prod.* 2018, No. 1, 54.
- [7] Z. Xiuzhi, L. Mingle, D. Xiaohan, Y. Xiangzi, Z. Zonghui, *Mater. Rev.* 2017, **31**, No. 24, 50.
- [8] P. Ruizhi, Z. Shupeng, Z. Dapeng, C. Hongzhi, L. Dongxu, *Mater. Rev.* 2017, **31**, No. 19, 97.
- [9] N. Xiaowei, W. Yongwei, L. Qiang, A. Fengwei, W. Wenfeng, H. Chao, *Highway* 2017, **62**, No. 1, 174.
- [10] P. Xiaoyan, Z. Guangxing, Z. Yanqing, G. Yongliang, *J. Building Mater.* 2017, **20**, No. 2, 255.