

*Study on polymer-based concrete pavement for high-capacity roads***Badania nawierzchni betonowej na bazie polimerów dla dróg o dużej przepustowości**

DOI: 10.15199/62.2025.2.3

Mokry cement drogowy zmieszano z pyłem krzemionkowym i, mieszając, wylano do formy, ubito, zeszkrobano i przykryto wilgotną tkaniną, a po 24 h wyjęto z formy, umieszczono w zbiorniku hydratacyjnym i utwardzono do określonego stopnia. Następnie zbadano właściwości mechaniczne, trwałość i zwartość otrzymanego materiału. Gdy do mieszanki betonowej dodano sam pył krzemionkowy, wytrzymałość na ściskanie materiału na bazie geopolimeru wzrosła o 23,2% w porównaniu z wytrzymałością materiału na bazie czystego cementu. Gdy ilość cementu zastąpionego geopolimerem wynosiła 25%, takie parametry jak wytrzymałość, wartość płynięcia i gęstość nawierzchni betonowej na mokro, wytworzonej na bazie geopolimeru, spełniały wymagania jakościowe podłoża i nasypu podbudowy drogowej autostrady wysokiego poziomu.

**Słowa kluczowe:** geopolimer, cement drogowy, beton, włosowate kryształy, właściwości

*Wet road cement was mixed with silica fume by stirring and poured into a mold, tamped, scrapped, covered with a damp cloth, demolded after 24 h, placed in a hydration tank, cured to the specified age, and then studied for mech. properties, durability and impermeability. When silica fume was added alone, the compressive strength of the pavement polymer-based material was increased by 23.2% compared with that of the pure cement-based material. When the proportion of cement replaced by the pavement polymer was 25% to make concrete, the strength, flow value and wet d. of the polymer-based concrete pavement satisfied the requirements of the bed and embankment of the road base of the high level highway.*

**Keywords:** geopolymer, road cement, concrete, whiskers, properties

Dzięki ciągłym inwestycjom w dziedzinie chińskiej infrastruktury krajowej, a także rozwojowi i ulepszaniu budowy sieci drogowej, pianobeton jest coraz częściej stosowany w inżynierii drogowej ze względu na takie zalety, jak mała gęstość, łatwa regulacja gęstości i wytrzymałości oraz wygodne stosowanie. Pianobeton jest stosowany w celu zmniejszenia obciążenia lub nacisku na ziemię i może być szeroko wykorzystywany w inżynierii drogowej. Zastosowano go m.in. jako wypełnienie tylnej części przyczółka mostu, do rozbudowy i naprawy dróg, wypełniania stromych odcinków dróg na obszarach górskich, a także m.in. do wymiany głowicy starego mostu drogowego<sup>1-3</sup>. Przeprowadzono wiele badań nad właściwościami pianobetonu<sup>4-7</sup> i jego zastosowaniami inżynieryjnymi<sup>8-10</sup>. Na obecnym etapie państwo chińskie energicznie opowiada się za promowaniem zielonego rozwoju. Produkcja cementu jest energochłonna i stosowanie dużych ilości cementu nie jest zgodne z polityką kraju, zakładającą oszczędzanie energii, obniżanie emisji i ochronę środowiska naturalnego. Surowcowe wykorzystanie odpadów przemysłowych (geopolimerów) powinno zapewnić oszczędność energii,

*With the continuous investment in the field of China national infrastructure as well as the development and improvement of road network construction, foam concrete is used more and more frequently in road engineering due to its advantages of low density, easy adjustment of density and strength, and convenient application. The foam is used to reduce the load or earth pressure as a substitute for filling, and can be widely used in the field of road engineering such as filling the back of bridge abutment with soft foundation, road expansion, filling of steep road sections in mountainous areas, road extension, old road bridge head replacement, and refilling of the roadbed of the bridge head of the old road<sup>1-3</sup>. There have been many results on the research of foam concrete's own characteristics<sup>4-7</sup> and its engineering application<sup>8-10</sup>. At this stage, the China State is vigorously advocating the promotion of green development. Cement production is a high energy-consuming industry but the use of large quantities of cement is not in line with energy saving, emission reduction and protection of the ecological environment of the country's major policy. The resourceful use of industrial waste (geopolymers) should be adapted to energy saving, emission reduction and protection of the ecological environment. The resource utilisation of geopolymers has emerged<sup>11</sup>. The concept of geopolymer was firstly proposed by French Joseph Davidovits. It was*

\* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

College of Art and Design, Zaozhuang University, Zaozhuang Shandong, 277000; e-mail: zhangbiao8899@hotmail.com

zmniejszenie emisji i ochronę środowiska naturalnego. Pojawiła się koncepcja wykorzystania zasobów geopolimerów<sup>11)</sup>. Koncepcja ta została po raz pierwszy zaproponowana przez Francuza Josepha Davidovitsa. Chodziło tu o nieorganiczny polimer składający się z 4-płaszczyznowych jednostek strukturalnych  $AlO_4$  i  $SiO_4$  o trójwymiarowej strukturze siatki. Gdy zwykły cement krzemianowy twardnieje, niewielka ilość NaOH może mieć działanie katalityczne, promując rozpuszczanie związków krzemu i glinu w cemencie oraz przyspieszając reakcję z  $Ca(OH)_2$  i utworzenie krzemianu wapnia i glinianu wapnia, a następnie utwardzając cement w celu regeneracji NaOH. Jest to proces znany jako „aktywacja alkaliczna”<sup>12-15)</sup>.

Nie ma wielu badań i przykładów inżynierskiego stosowania pianobetonu na bazie geopolimerów jako wypełniacza nawierzchni drogowych, a proporcje składników, wydajność i właściwości drogowe takiego pianobetonu nie są jeszcze dobrze poznane, więc należało je dogłębnie przestudiować i zbadać w praktyce. W celu utworzenia nawierzchniowego pianobetonu na bazie geopolimeru zastosowano popiół lotny i proszek mineralny jako surowe materiały geopolimerowe i w celu wytworzenia mieszanki betonowej zastąpiono nimi część cementu. Przebadano właściwości drogowe otrzymanego materiału za pomocą testów wewnętrznych. Pianobeton uzyskany przez zastąpienie 25% cementu geopolimerem wybrano do wypełnienia odcinka testowego fundamentu autostrady i oceniono właściwości drogowe tego pianobetonu poprzez analizy numeryczne i analizy porównawcze rzeczywistych pomiarów.

## Część teoretyczna

Cząstki stałe, takie jak pył krzemionkowy, łatwo ulegają aglomeracji, zwłaszcza nanocząstki drobnego proszku, a aglomerowane cząstki lub aglomeraty zawierają więcej niż 2 cząstki. Każda granula ma inny stopień siły wiązania i aby rozdzielić ją na pojedyncze cząstki, należy zastosować siłę zewnętrzną. Dodatkowo, aby rozproszyć medium dyspersyjne, należy zastosować odpowiednią technologię dyspergowania. Z termodynamicznego punktu widzenia siła oddziaływania między cząstkami jest opisana wzorem (1):

$$F_d(a^T, b^T) = d^T \log \frac{a^T}{b^T} - \frac{\partial T_d^a}{\partial T_d^b} = - \frac{T}{\log(T_d^a \cdot T_d^b)} \frac{d^T}{a^T + b^T} \quad (1)$$

w którym  $F_d$  jest proporcjonalne do średnicy cząstki  $d$ ,  $T$  oznacza czas opadania cząstki,  $a^T$  i  $b^T$  porowatość cząstek pyłu krzemionkowego; siła grawitacji działająca na cząstkę jest proporcjonalna do  $T_d$ , więc gdy  $d$  zmniejsza się do pewnej wartości, musi istnieć siła większa niż siła oddziaływania.

Gdy temperatura wodnego roztworu siarczanu wapnia osiągnie określoną wartość, rozpoczyna się proces zarodkowania i następuje wykrystalizowanie soli. Zależność między rozmiarem zarodkowania cząstek  $d$  a stałą dielektryczną roztworu  $\varepsilon$  można opisać wzorem (2):

*an inorganic polymer composed of  $AlO_4$  and  $SiO_4$  4-planar structural units with 3-dimensional mesh structure. When ordinary silicate cement hardens, a small amount of NaOH can have a catalytic effect, promoting the dissolution of Si and Al compounds in the cement, and accelerating the reaction with  $Ca(OH)_2$  to form calcium silicate and calcium aluminate minerals, and then hardening the cement to regenerate NaOH. This is known as “alkali activation”<sup>12-15)</sup>.*

*There are not many studies and engineering examples of pavement polymer-based foam concrete as roadbed filler; and the proportion and road performance of pavement polymer-based foam concrete and the road properties of pavement polymer-based foam concrete are not yet known, so the proportion, performance and road properties of pavement polymer-based foam concrete need to be studied in depth and examined in practice. Based on this, this study adopts fly ash and mineral powder as the raw geopolymer materials to replace part of the cement dosage to formulate pavement polymer-based foam concrete, and tests its road performance through indoor tests, and selects the foam concrete made by replacing 25% of cement with the geopolymer to be used for filling the test section of highway foundation, and evaluates the road performance of the pavement polymer-based foam concrete through numerical analyses and comparative analyses of actual measurements.*

## Fundamentals

*Particulate matter like silica fume is easy to agglomerate, especially nano-sized fine powder, and agglomerated particles or agglomerates contain more than two particles. Each pellet has a different degree of binding strength, and to separate it into individual particles, an external force must be applied. In addition to the dispersion of the dispersion medium, it must also apply its dispersion technology. From the thermodynamic point of view, the interaction of particles is described by the formula (1):*

$$F_d(a^T, b^T) = d^T \log \frac{a^T}{b^T} - \frac{\partial T_d^a}{\partial T_d^b} = - \frac{T}{\log(T_d^a \cdot T_d^b)} \frac{d^T}{a^T + b^T} \quad (1)$$

*where  $F_d$  is proportional to the particle diameter  $d$ ,  $T$  is the slump time,  $a^T$  and  $b^T$  are the porosity of 2 silica fumes, and the gravity of the particle is proportional to  $T_d$ , so when  $d$  decreases to a certain value, there it must be more functional force bigger than the interaction.*

*In aqueous solution, when the temperature is higher than a certain level, the calcium sulfate will nucleate and crystallize out. When the relationship between the particle nucleation size  $d$  and the solution dielectric constant  $\varepsilon$  is deduced, the following formula (2) is obtained:*

$$\frac{1}{d} = \frac{aT\rho}{2b\gamma} \log d + \frac{\varepsilon(T\rho + \gamma)}{2\pi b\rho\varepsilon(r_a + r_b)} \quad (2)$$

$$\frac{1}{d} = \frac{aT\rho}{2b\gamma} \log d + \frac{\varepsilon(T\rho + \gamma)}{2\pi b\rho\varepsilon(r_a + r_b)} \quad (2)$$

w którym  $r_a$  i  $r_b$  są średnicami 2 klasycznych cząstek modelowych o wymiarach geometrycznych  $a$  i  $b$ , a  $\rho$  jest gęstością modelu pyłu krzemionkowego. Zgodnie z klasycznym modelem, cement zmieszany z pyłem krzemionkowym może być traktowany jako układ binarny. Maksymalny współczynnik wypełnienia układu binarnego i ułamek objętościowy cząstek o mniejszym wymiarze można obliczyć z wzorów (3) i (4):

$$\gamma_d = \phi_d T + \frac{\varepsilon}{r_a + r_b} \frac{(1 + a^T)(1 - \varepsilon_a)}{(1 + b^T)(1 - \varepsilon_b)} \quad (3)$$

$$\phi_d = \frac{r_a(1 - \varepsilon_a)}{r_b(1 - \varepsilon_b)} \quad (4)$$

w których  $\phi_d$  oznacza maksymalny współczynnik wypełnienia układu binarnego,  $T$  ułamek objętościowy mniejszych cząstek przy maksymalnym współczynniku wypełnienia,  $\varepsilon_a$  średnią średnicę mniejszych cząstek,  $a^T$  średnią średnicę większych cząstek, a  $b^T$  porowatość większych cząstek, gdy składnik jest ułożony w stos. Zależność między opadaniem materiałów na bazie cementu a granicą plastyczności jest podana w postaci wzorów (5) i (6):

$$\tau_a = \frac{\rho}{\phi_a} (1 - \gamma_d) \quad (5)$$

$$\tau_b = \frac{\rho}{\phi_b} (1 - \gamma_d) \quad (6)$$

w których  $\tau_a$  i  $\tau_b$  oznaczają wartości granicy plastyczności,  $\gamma_d$  jest parametrem związanym z opadaniem cząstek, a  $\phi_a$  i  $\phi_b$  to lepkości cząstek.

## Część doświadczalna

### Materiały

Surowce użyte do przygotowania pianobetonu na bazie geopolimerów miały standardową jakość. Zastosowano cement zwykły krzemianowy klasy P-O 42,5. Geopolimer składał się z popiołu lotnego klasy I i proszku żużla wielkopieczowego klasy S95, a jego działanie było zgodne z przepisami „Popiół lotny stosowany w cemencie i betonie” (GB/T1596) i „Granulowany proszek żużla wielkopieczowego stosowany w cemencie i betonie” (GB/T18046). Właściwości surowców podano w tabelach 1–3.

### Metodyka badań

Stosowano próbki pasty cementowej o wymiarach 50 mm × 50 mm × 200 mm (rys. 1). Cement był najpierw mieszany z wodą w ilości zgodnej z ilością dodanych pyłów krzemionkowych (w proporcji mieszania), a następnie, mieszając, do mieszaniny pyłów krzemionkowych

where  $r_a$  and  $r_b$  are diameters of 2 classical model particles with geometric dimensions of  $a$  and  $b$  perceptively, and  $\rho$  is density of silica fume model. According to the classical model, cement mixed with silica fume can be regarded as a binary system. The maximum filling rate of the binary system and the volume fraction of particles with smaller size at this time can be calculated according to the following formulas (3) and (4):

$$\gamma_d = \phi_d T + \frac{\varepsilon}{r_a + r_b} \frac{(1 + a^T)(1 - \varepsilon_a)}{(1 + b^T)(1 - \varepsilon_b)} \quad (3)$$

$$\phi_d = \frac{r_a(1 - \varepsilon_a)}{r_b(1 - \varepsilon_b)} \quad (4)$$

where  $\phi_d$  is the maximum filling rate of the binary system,  $T$  is the volume fraction of the smaller particles at the maximum filling rate,  $\varepsilon_a$  is the average diameter of the smaller particles,  $a^T$  is the average diameter of the larger particles,  $b^T$  is the porosity of larger particles when the component is stacked. The relationship between the slump of cement-based materials and the yield stress is given by formulas (5) and (6):

$$\tau_a = \frac{\rho}{\phi_a} (1 - \gamma_d) \quad (5)$$

$$\tau_b = \frac{\rho}{\phi_b} (1 - \gamma_d) \quad (6)$$

where  $\tau_a$  is the yield stress value,  $\tau_b$  is the yield stress value,  $\gamma_d$  is the slump value,  $\phi_a$  and  $\phi_b$  are the model viscosities.

## Experimental

### Materials

The raw materials used for the preparation of geopolymer-based foam concrete had standard quality. The cement adopted P-O 42.5 grade ordinary silicate cement. The geopolymer consisted of Grade I fly ash and Grade S95 blast furnace slag powder, and its performance was in accordance with the provisions of “Fly Ash Used in Cement and Concrete” (GB/T1596) and “Granulated Blast Furnace Slag Powder Used in Cement and Concrete” (GB/T18046), respectively. The properties of the geopolymer were collected in Tables 1–3.

### Methods

The specimen size of cement paste is designed as 50 mm × 50 mm × 200 mm (Fig. 1). In the processes, the cement was firstly mixed with water according to the amount of silica fume added in the blending ratio, and then the metered water was incorporated with the mixture of silica fume and cement while stirring. After stirring well, it was poured into the mold, tamping, scraping, covering with a damp cloth, and demolding after 24 h. The specimen was

Table 1. Physical and mechanical properties of cement

Tabela 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne cementu

Sieve residual rate (0.08 mm)/Wskaźnik resztkowy sита (0,08 mm), %	Condensation time/Czas zestalania, min		Flexural strength/Wytrzymałość na zginanie, MPa			Compressive strength/Wytrzymałość na ściskanie, MPa		
	initial/początek	final/koniec	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
5.00	103	225	3.52	4.17	7.01	15.47	26.39	36.47

Table 2. Physical properties of silica fume

Tabela 2. Właściwości fizyczne pyłów krzemionkowych

Density/Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	Melting temperature/ Temperatura topnienia, °C	Average particle size/Średni rozmiar cząstek, μm	Specific surface area/ Powierzchnia właściwa, m <sup>2</sup> /kg
200–250	>1600	0.15–0.20	1500–2000

Table 3. Physical and chemical properties of calcium sulfate whisker

Tabela 3. Właściwości fizyczne i chemiczne wiskerów siarczanu wapnia

Item/Właściwość	Unit/Jednostka	Value/Wartość
Density/Gęstość	g/cm <sup>3</sup>	2.87
Length/Długość	μm	60–250
Melting point/Temperatura topnienia	°C	1445
Tensile modulus/Moduł rozciągania	GPa	181
Water soluble/Rozpuszczalne w wodzie (22°C)	ppm	< 1100
Calcium sulfate content/Zawartość siarczanu wapnia	%	≥ 97
pH	-	7–8
Bulk density/Gęstość nasypowa	g/cm <sup>3</sup>	0.1–0.5
Diameter/Średnica	μm	0.5–4.5
Tensile strength/Wytrzymałość na rozciąganie	GPa	20.35
Refractive index/Współczynnik załamania światła	-	1.386
Mohs hardness/Twardość w skali Mohsa	-	3–4
Whiteness/Biel	%	≥ 90
Water content/Zawartość wody	%	< 1.25

i cementu była dodawana odmierzona ilość wody. Po dokładnym wymieszaniu całość wlewano do formy, ubijano, zeszkrobywano, przykrywano wilgotną tkaniną i po 24 h wyjmowano z formy. Próbkę umieszczano w zbiorniku hydratacyjnym i utwardzano do określonego stopnia, a następnie badano jej właściwości.

Wytrzymałość na zginanie badano za pomocą sterowanej mikrokomputerem uniwersalnej maszyny do testowania materiałów i oprzyrządowania do zginania próbek cementu. Szybkość obciążenia ustawiono na 0,50 mm/min, a wytrzymałość na ściskanie badano po 1, 3, 7 i 28 dniach. Wytrzymałość na ściskanie była oznaczana przez łamanie próbki po teście zginania, a uniwersalna maszyna do testowania materiałów i uchwyt do ściskania cementu były kontrolowane przez mikrokomputer. Szybkość obciążenia ustawiono na 1,20 mm/min. Zarówno w testach wytrzymałości na zginanie, jak i w testach na ściskanie wykorzystano 2 płaskie powierzchnie bloku testowego zaprawy jako płaszczyznę obciążenia.

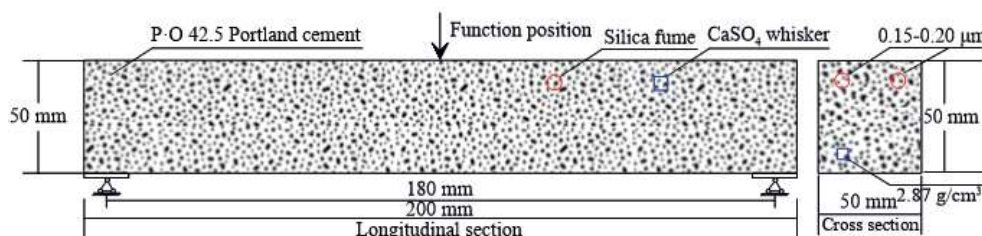


Fig. 1. Experimental model

Rys. 1. Model doświadczalny

placed in the hydration tank and was cured to the specified age, and then was performed property test.

The flexural strength was controlled by a microcomputer-controlled universal material testing machine and a cement flexure fixture. The loading rate is set to 0.50 mm/min, and the compressive strengths of 1, 3, 7, 28 days are tested respectively. The compressive strength is the test piece that is broken after the flexure test and the universal material testing machine and the cement compressive fixture are controlled by a microcomputer. The loading rate is set to 1.20 mm/min. Both the flexural and compressive strength tests use the two flat surfaces of the mortar test block as the load plane.

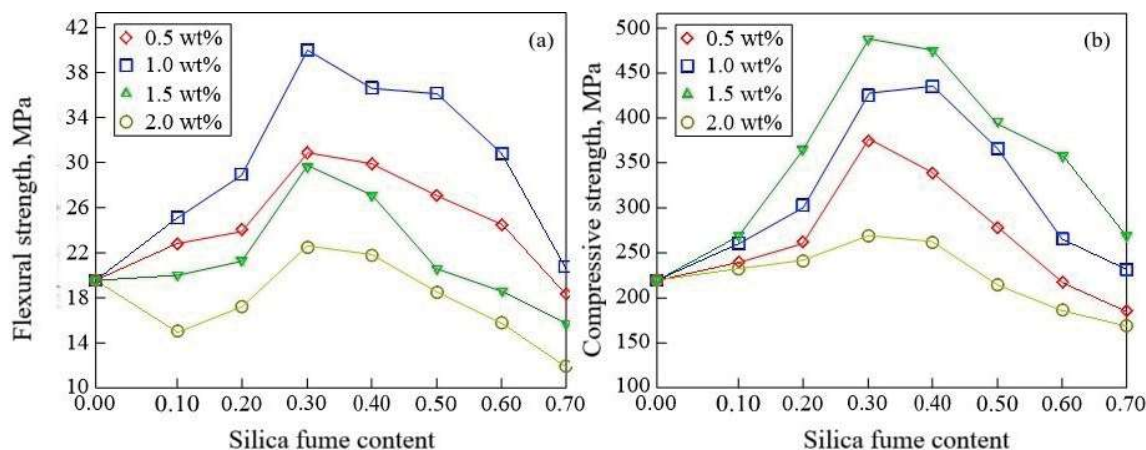


Fig. 2. Effect of silica fume and calcium sulfate whisker content on flexural strength (a) and compressive strength (b)

Rys. 2. Wpływ zawartości pyłów krzemionkowych i siarczanu wapnia na wytrzymałość na zginanie (a) i ściskanie (b)

## Wyniki badań i ich omówienie

### Właściwości mechaniczne

Wartości wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia przy zerwaniu materiałów na bazie cementu z dodatkiem włosowatych kryształów siarczanu wapnia, zwanych whiskerami (*whiskers*), poddanych obróbce powierzchniowej, były wyższe niż w przypadku konwencjonalnych napelniaczy. Gdy zawartość whiskerów była mniejsza niż 1,67% mas., wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie przy zerwaniu materiału na bazie cementu rosły liniowo wraz ze wzrostem zawartości whiskerów. Gdy zawartość ta przekroczyła 1,67%, wytrzymałość na rozciąganie materiału na bazie cementu powoli spadała. Gdy zawartość whiskerów wynosiła 1,67%, wartość wytrzymałości na rozciąganie materiału na bazie cementu była największa (45,27 MPa) i większa niż w przypadku czystej matrycy. Wytrzymałość na rozciąganie wzrosła do 43,98% (rys. 2). Gdy zawartość whiskerów siarczanu wapnia była niewielka, lepkość była mała, i zanim układ nie został utwardzony whiskery siarczanu wapnia były równomiernie rozproszone w układzie. Po utwardzeniu materiału whiskery siarczanu wapnia odgrywały rolę wzmacniacza szkieletu w matrycy. Gdy materiał był rozciągany przez siły zewnętrzne, wokół whiskerów siarczanu wapnia w matrycy generowane były lokalne naprężenia oporowe, z których większość działała na whiskery, dzięki czemu odgrywały one rolę w przenoszeniu obciążeń. Gdy zawartość whiskerów była duża, ich rozproszenie było nierównomierne i łatwo były generowane defekty, takie jak pęcherzyki. Skutkowało to znacznym spadkiem wytrzymałości na rozciąganie materiałów na bazie cementu, gdy zawartość whiskerów siarczanu wapnia przekraczała 1,67%.

### Gęstość na mokro

Wpływ zawartości polimeru na gęstość nasypową na mokro pokazano na rys. 3. Wraz ze zwiększaniem ilości geopolimeru wartość tego parametru stopniowo spadała i utrzymywała się w zakresie 613–733 kg/m<sup>3</sup>, co spełniało

## Results and discussion

### Mechanical properties

The tensile strength and elongation at break of cement-based materials added with surface-treated calcium sulfate whiskers were higher than those of conventional additives. As the whisker content was less than 1.67% of mass fraction, the tensile strength and elongation at break of cement-based material increased with the increase of the whisker content, and the increase rate increased linearly. As the whisker content exceeded 1.67% fraction, the tensile strength of the cement-based material decreased slowly. When the whisker content was 1.67%, the tensile strength value of the cement-based material was the largest (45.27 MPa) and higher than that of the pure matrix. The tensile strength increased up to 43.98% (Fig. 2). When the content of calcium sulfate whiskers was small, the viscosity was low before the system was not cured, and the calcium sulfate whiskers were uniformly dispersed in the system. After the system was cured, the calcium sulfate whiskers played a role in strengthening the skeleton in the matrix. When the material was pulled by the outside world, local resistance strain would be generated around the calcium sulfate whiskers, so that most of the stress acted on the whiskers, so that the whiskers played a role in transmitting loads. When the content of whiskers was large, the permeability of the whiskers in the matrix became poor, and the dispersion was uneven, and defects such as bubbles were easily generated, resulting in the tensile strength of cement-based materials significantly decreased when the content of calcium sulfate whiskers exceeded 1.67% fraction.

### Wet density

The effect of geopolimer dosage on wet density was shown in Fig. 3. As the polymer dosage increased, the wet density gradually decreased, and the value varied from 613 to 733 kg/m<sup>3</sup>, which could meet the corresponding requirements of the specification. The density of ordinary

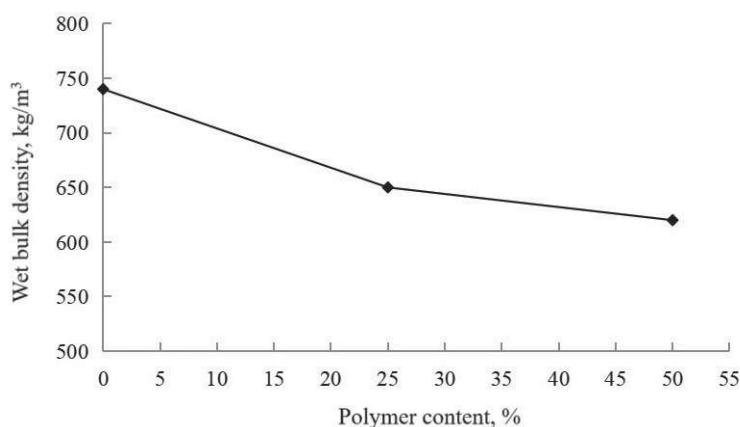


Fig. 3. Influence of geopolymer content on wet bulk density

Rys. 3. Wpływ zawartości geopolimeru na gęstość nasypową na mokro

odpowiednie wymagania jakościowe. Gęstość zwykłego cementu krzemianowego wynosiła  $3000 \text{ kg/m}^3$ , gęstość popiołu lotnego  $2650 \text{ kg/m}^3$ , a gęstość żużla  $2900 \text{ kg/m}^3$ . Z jednej strony gęstość geopolimeru była mniejsza niż gęstość cementu, a zastąpienie cementu taką samą ilością geopolimeru zwiększyłyby objętość, a zatem zwiększenie dawki geopolimeru przy tej samej jakości spowodowało spadek gęstości. Z drugiej strony, wielkość cząstek cementu i pęcherzyków powietrza wpływała na wartość gęstości. Ponieważ rozmiar cząstek cementu i pęcherzyków należał do tego samego rzędu wielkości, to gdy zawartość cementu była większa, pęcherzyki i cząstki cementu ścisnęły się nawzajem i pęcherzyki powietrza ulegały przebiciu, co powodowało wzrost szybkości odpieniania i sprawiało, że gęstość na mokro była stosunkowo większa. Dlatego wraz ze wzrostem dawki polimeru gęstość na mokro miała tendencję do zmniejszania się.

### Płynność

Wpływ dozowania geopolimeru na wartość płynięcia pokazano na rys. 4. Wraz ze wzrostem dawki geopolimeru wartość ta wykazywała tendencję spadkową, ale mieściła się w zakresie zaleceń specyfikacji (170–190 mm), i nie ulegała większym zmianom. Wpływ dozowania geopolimeru na wartość płynięcia nie był oczywisty. Wartość tego parametru była związana głównie z zawartością wody i zawartością pęcherzyków, a zawartość wody i ilość środka spieniającego w stosunku grup testowych były takie same, więc ich wpływ na wartość badanego parametru był niewielki. Gdy gęstość na mokro spełniała wymagania, wartość płynięcia wpływała tylko na wydajność konstrukcji, a wartości płynięcia w trzech grupach testów spełniały wymagania specyfikacji.

### Wytrzymałość mechaniczna

W przypadku dodania samego pyłu krzemionkowego, gdy jego udział wynosił 0,55%, wytrzymałość na ścislenie materiału na bazie cementu wzrosła o 23,14%

silicate cement was  $3,000 \text{ kg/m}^3$ , the density of fly ash was  $2,650 \text{ kg/m}^3$ , and the density of slag was  $2,900 \text{ kg/m}^3$ . On the one hand, the density of polymer was smaller than that of the cement, and the replacement of cement by equal amount of polymer would increase the volume, thus the increase of polymer dosage under the same quality resulted in the density decrease. On the other hand, the particle size of cement particles and air bubbles contributed to the increase of the density. As the particle size of cement particles and bubbles belong to the same order of magnitude, when the cement content is higher, the bubbles and cement particles squeezed and punctured each other, resulting in an increase in defoaming rate, which makes the wet density relatively larger. Therefore, with the increase of polymer dosage, the wet density tended to decrease.

### Flow value

The effect of geopolymer dosage on the flow value is shown in Fig. 4. With the increase of geopolymer dosage, the flow value showed a decreasing trend, and the values were within the range of specification recommendations (170 to 190 mm), which was not much changed. The effect of geopolymer dosage on the flow values was not obvious. The flowability was mainly related to the water content and bubble content, and the water content and the amount of blowing agent in the ratio of the test groups were the same, so the effect on the flowability was small. Under the condition that the wet density met the requirements, the flow value only affected the construction performance, and the flow values of the three groups of tests met the specification requirements.

### Mechanical strength

In the case of adding silica fume alone, when the silica fume volume fraction was 0.55%, the compressive strength of the cement-based material increased by 23.14%, compared with the pure cement-based material compressive strength. Single-mixed calcium sulfate whiskers could

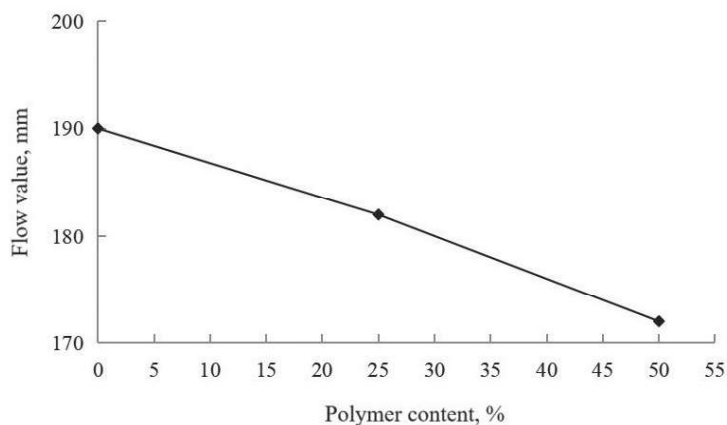


Fig. 4. Effect of geopolymer content on flow value

Rys. 4. Wpływ zawartości geopolimeru na płynność

w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie materiału na bazie czystego cementu. Dodatek do cementu tylko wiskerów siarczanu wapnia w ilości 1,54% mógł zwiększyć wytrzymałość na zginanie materiałów na bazie cementu o 27,19%, a gdy zawartość pojedynczo domieszanego pyłu krzemionkowego wynosiła 0,28%, wytrzymałość na zginanie materiałów na bazie cementu można było zwiększyć o 19,07%. Dodatek samego siarczanu wapnia miał silniejszy wpływ na wytrzymałość na ściskanie materiałów na bazie cementu niż pył krzemionkowy w postaci pojedynczej domieszki<sup>16–18</sup>). Gdy dodano jednocześnie wiskery siarczanu wapnia i pył krzemionkowy, wytrzymałość na zginanie materiałów na bazie cementu była zasadniczo mniejsza niż w przypadku czystych materiałów na bazie cementu. Tylko wówczas, gdy ilość wiskerów siarczanu wapnia wynosiła 0,62%, a zawartość krzemionki wynosiła 0,38%, wytrzymałość na zginanie materiału na bazie cementu osiągnęła maksymalną wartość 7,54 MPa i była ona o 3,97% większa niż w przypadku czystego materiału na bazie cementu. Gdy zawartość wiskerów siarczanu wapnia wynosiła 0,62%, a zawartość pyłu krzemionkowego wynosiła 0,27%, wytrzymałość na zginanie materiałów na bazie cementu osiągnęła minimalną wartość 4,92 MPa i była ona o 22,17% mniejsza niż w przypadku materiałów na bazie czystego cementu (rys. 5).

### Trwałość

Wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na zginanie materiałów na bazie cementu najpierw wzrosła, a następnie spadała wraz ze wzrostem ilości pyłów krzemionkowych. Zaobserwowano stosunkowo spójne zmiany w próbkach zmieszanych z 2 rodzajami pyłu krzemionkowego. Gdy dawka pyłu krzemionkowego mieściła się w zakresie 21,45–23,50%, wystąpiło maksimum wartości badanych parametrów przy zwiększaniu dawki, a następnie wytrzymałość stopniowo spadała. Maksymalna wytrzymałość na ściskanie próbek z pyłem krzemionkowym i nieprzetworzonym pyłem krzemionkowym wynosiła 254,27 MPa i 184,25 MPa, a maksymalna wytrzymałość na zginanie wynosiła odpowiednio 37,59 MPa i 29,42 MPa. Ponadto, wytrzymałość próbki domieszkowanej nieprzetworzonym pyłem krzemionkowym była największa przy dawce pyłu 15,75%, a w przypadku próbki domieszkowanej przetworzonym pyłem krzemionkowym było to 20,50%. Stwierdzono, że ten ostatni ma bardziej stabilne właściwości mechaniczne i większą wytrzymałość. Gdy ilość pyłu krzemion-

increase the flexural strength of cement-based materials by 27.19% when the amount was 1.54%, and when the single-mixed silica fume was 0.28%, the flexural strength of the cement-based materials could be increased by 19.07%. The single-doped calcium sulfate whiskers had then a stronger effect on the compressive strength of cement-based materials than single-doped silica fume<sup>16–18</sup>). When calcium sulfate whiskers and silica fume were added at the same time, the flexural strength of cement-based materials was basically lower than that of pure cement-based materials. Only when the amount of calcium sulfate whiskers was 0.62%, silicon content was 0.38%, and the flexural strength of the cement-based material reached a maximum value of 7.54 MPa, which was 3.97% higher than that of the pure cement-based material. When the content of calcium sulfate whiskers reached 0.62% and the content of silica fume was 0.27%, the flexural strength of cement-based materials reached a minimum value of 4.92 MPa, which was 22.17% lower than that of pure cement-based materials (Fig. 5).

### Durability

The compressive strength and flexural strength of cement-based materials increased first and then decreased as the amount of silica fume was increased. There were relatively consistent changes in the samples mixed with 2 silica fumes. When the silica fume dosage was in the range 21.45–23.50%, there was a highest point which continued to increase the dosage and the strength gradually decreased. The maximum compressive strength of the samples with silica fume and untreated silica fume was 254.27 MPa and 184.25 MPa, and the maximum flexural strength was 37.59 MPa and 29.42 MPa, respectively. In addition, the highest strength value of the sample doped with untreated silica fume appeared at the dosage of silica fume at 15.75%, while the sample doped with silica fume appeared at 20.50%. It was found that the latter had more stable mechanical properties and higher strength. When the amount of silica fume was 18.50%, the reduction ratio was 0.314, which was an increase of 46.38% compared with no silica fume, indicating that the appropriate amount of silica fume could significantly enhance the toughness

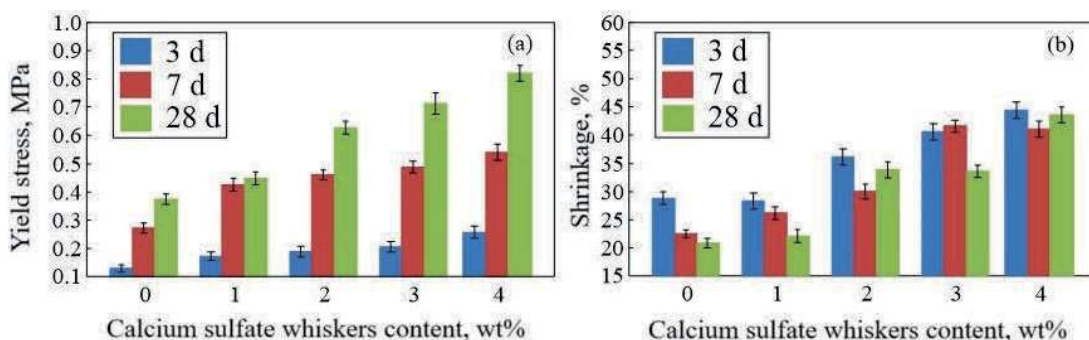


Fig. 5. Variation of yield stress (a) and shrinkage (b) with calcium sulfate whisker content

Rys. 5. Zmiana granicy plastyczności (a) i skurczu (b) w zależności od zawartości wiskerów siarczanu wapnia

kowego wynosiła 18,50%, spadek wytrzymałości wyniósł 0,314, co stanowiło wzrost o 46,38% w porównaniu z próbką bez pyłu krzemionkowego, i wskazuje, że odpowiednia ilość pyłu krzemionkowego może znacznie zwiększyć wytrzymałość materiału na bazie cementu. Współczynnik kompresji był ważnym wskaźnikiem do oceny wytrzymałości materiału. Wzrost współczynnika kompresji wskazywał, że dodatek pyłów krzemionkowych znacznie zwiększył plastyczność i wytrzymałość na rozciąganie materiału na bazie cementu<sup>19, 20</sup>).

## Wnioski

Zbadano właściwości mechaniczne, trwałość i zwartość materiałów betonowych na bazie polimerów, modyfikowanych i domieszkowanych pyłem krzemionkowym. Wyniki pokazują, że włączenie pyłu krzemionkowego poprawia wczesną wytrzymałość materiałów na bazie cementu i że rozwija się ona szybko, podczas gdy późniejsza wytrzymałość wzrasta powoli. Wskazuje to, że wpływ pyłu krzemionkowego jest znaczący dla wczesnej wytrzymałości, a wkład we wczesną wytrzymałość jest większy niż późniejsza wytrzymałość. Dlatego pył krzemionkowy znacznie poprawia właściwości mechaniczne i trwałość.

## Podziękowania

Badania uzyskały wsparcie ze strony programów *Analysis of Traffic Congestion in Old Town of Zaozhuang City* i *Research on Intelligent Control Methods (Zaozhuang University 11/1020704)*; *Research on the Integration of New Rural Community Construction Technologies Based on Local Characteristics (Zaozhuang University 35/63501231132)*.

*of the cement-base material. The compression ratio was an important indicator to evaluate the toughness of the material. The increase of the compression ratio indicated that the addition of silica fume significantly enhanced the ductility and tensile capacity of the cement-based material<sup>19, 20</sup>.*

## Conclusions

*The mechanical properties, durability and impermeability of pavement polymer-based concrete materials modified and admixed with silica fume were studied. The results show that the incorporation of silica fume improves the early strength of cement-based materials, and the early strength develops rapidly, while the later strength increases slowly, indicating that the early effects of silica fume is significant, and the contribution to the early strength is greater than the later strength. Therefore, silica fume significantly improve its mechanical properties and durability properties.*

## Acknowledgements

*This study was supported by Analysis of Traffic Congestion in the Old Town of Zaozhuang City and Research on Intelligent Control Methods (Zaozhuang University 11/1020704); Research on the Integration of New Rural Community Construction Technologies Based on Local Characteristics (Zaozhuang University 35/63501231132).*

Otrzymano: 03-10-2024

Zrecenzowano: 13-01-2025

Zaakceptowano: 27-01-2025

Opublikowano: 20-02-2025

## REFERENCES/LITERATURA

- [1] M.A.O. Mydin, P. Jagadesh, A. Bahrami, A. Dulaimi, Y.O. Özkiliç, M.M.A. Abdullah, R.P. Jaya, *J. Mater. Res. Technol.* 2023, **26**, 4405.
- [2] Y. Wang, X. He, Y. Su, J. Huang, B. Ma, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2017, **32**, 1108.
- [3] D. Yi. Lei, L.P. Guo, W. Sun, J. Liu, X. Shu, X.L. Guo, *Constr. Building Mater.* 2016, **115**, 716.
- [4] Z. He, L. Hu, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2018, **33**, 654.
- [5] M. Reisi, S.A. Dadvar, A. Sharif, *Mag. Concrete Res.* 2017, **69**, No. 23-24, 1.
- [6] H. Dai, S.P. Zhang, C.L. Ju, D.X. Li, *Key Eng. Mater.* 2016, **680**, 455.
- [7] W. Yuan, J. Cui, S. Xu, *J. Mater. Sci. Technol.* 2016, No. 12, 1352.
- [8] Y. Cai, P. Hou, X. Cheng, P. Du, Z. Ye, *Constr. Building Mater.* 2017, **148**, 770.
- [9] Zi-rou Qin, Yong-fu Xu, *Highway* 2020, **65**, No. 8, 95.
- [10] Sen-bao Wu, Qi Zong, Jun-guo Wang, *Bull. Chinese Ceramic Soc.* 2022, **41**, No. 1, 76.
- [11] Yu-qin Huang, Rui-yan Wabg, Tian-yan Long, *Chinese J. Underground Space Eng.* 2021, **17**, 603.
- [12] Hai-jian Uang, Neng-ping Gong, Chao-min Mu, *J. Building Mater.* 2020, **23**, No. 2, 466.
- [13] Qian-gui Cao, *Railway Eng.* 2022, **62**, No. 2, 141.
- [14] Hai-feng Wang, Jian-song Sheng, Chun-chun Wu, *Building Block Block Building* 2016, No. 1, 45.
- [15] Fang Xu, Gong-hui Gu, Xiao-ming Huang, *J. Building Mater.* 2020, **23**, No. 5, 1024.
- [16] B. Park, Y.C. Choi, *Constr. Building Mater.* 2018, **184**, 1.
- [17] J.N. Yang, S.B. Nie, *Polymer Degr. Stabil.* 2017, **144**, 270.
- [18] B. Park, Y.C. Choi, *Constr. Building Mater.* 2018, **184**, 1.
- [19] G. Sang, Y. Zhu, G. Yang, *Constr. Building Mater.* 2016, **112**, 648.
- [20] A.R. Suleiman, M.L. Nehdi, *Cement Concrete Res.* 2018, **111**, 208.