

prof. dr hab. inż. Jacek Golaszewski^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4110-5581

prof. dr hab. inż. Barbara Klemczak¹⁾

ORCID: 0000-0002-8102-894X

dr inż. Aneta Smolana¹⁾ ORCID: 0000-0002-6757-9841

dr inż. Małgorzata Golaszewska¹⁾

ORCID: 0000-0002-5249-2639

mgr inż. Grzegorz Cygan¹⁾ ORCID: 0000-0002-5534-704X

dr inż. Christoph Manke²⁾ ORCID: 0000-0001-8376-6156

dr inż. Ignacio Peralta^{2,3)} ORCID: 0000-0003-4316-9909

dr inż. Frank Röser⁴⁾ ORCID: 0000-0002-5926-1593

prof. dr inż. Eduardus A. B. Koenders²⁾ ORCID: 0000-0001-8664-2554

DOI: 10.15199/33.2022.06.07

Streszczenie. Możliwym rozwiązaniem problemu stabilności pianobetonów o małej gęstości oraz poprawy ich właściwości jest zastosowanie cementu CSA. W artykule przedstawiono wyniki badań pianobetonów o małej gęstości, w których zastosowano cement portlandzki CEM I 52,5R oraz alternatywnie cement CSA. Uzyskane wyniki pokazały, że pianobeton z cementem CSA charakteryzuje się większą wytrzymałością, mniejszym współczynnikiem przewodzenia ciepła i strukturą o mniejszych porach niż pianobeton z cementem CEM I.

Słowa kluczowe: pianobeton; cement siarczanoglinowy; cement portlandzki; wytrzymałość na ściskanie; przewodność cieplna.

Zastosowanie cementu CSA w pianobetonie o małej gęstości

Use of CSA cement in low-density foam concrete

Abstract. A possible solution to the problem of the stability of low-density foam concrete stability and improvement of its properties is the use of CSA cement. The article presents the results of tests of low-density foam concrete, produced with CEM I 52.5R Portland cement and, alternatively, CSA cement. The obtained results showed that foam concrete with CSA cement is characterized by higher strength, lower thermal conductivity, and a structure with smaller pores than foam concrete with CEM I cement.

Keywords: foamed concrete; calcium sulphoaluminate cement; OP cement; compressive strength; thermal conductivity.

Pianobeton jest materiałem konstrukcyjno-izolacyjnym wykorzystywanym w budownictwie mieszkaniowym i przemysłowym oraz podziemnym, głównie jako izolacja termiczna, lekkie wypełnienie lub zabezpieczenie pustych przestrzeni. Charakteryzuje się niewielkim ciężarem jednostkowym, dużą trwałością oraz bardzo dobrą odpornością ogniową i izolacyjnością cieplną [1]. Głównymi problemami jego powszechnego stosowania jest mała wytrzymałość oraz trudności dotyczące utrzymania stabilnej mieszanki pianobetonu w procesie produkcji [2]. Uzyskanie pianobetonu o pożądanych właściwościach, czyli odpowiedniej wytrzymałości i możliwie małej przewodności cieplnej sprawia wiele trudności.

Możliwym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie w pianobetonie **cementu siarczanoglinowego CSA**, który obecnie zyskuje na popularności ze

względem na mniejszą emisję CO₂ w procesie jego produkcji w porównaniu z cementem portlandzkim [3]. Związane jest to zarówno ze wsadem, ponieważ klinkier CSA produkowany jest w procesie wypalania kamienia wapiennego, skał boksytowych i gipsu, a nie kamienia wapiennego i margli, jak i samym wypalaniem, które prowadzone jest w temperaturze niższej niż w przypadku klinkieru portlandzkiego [4]. Różnica w procesie produkcji przekłada się na różnicę w składzie fazowym gotowego produktu. W odróżnieniu od cementu portlandzkiego, złożonego głównie z alitu C₃S, belitu C₂S i glinianu trójwapiennego C₃A, cement CSA składa się z yelemitu C₄A₃S̄, belitu C₂S i niewielkiej ilości siarczanu wapnia C̄S. Wynikiem hydratacji faz cementu portlandzkiego jest faza CSH oraz wodorotlenek wapnia CH, natomiast w przypadku cementów CSA – głównie etryngit i wodorotlenek glinu AH. Oznacza to różnicę we właściwościach cementu – cement CSA charakteryzuje się szybszym początkiem i końcem wiązania, większą wytrzymałością wczesną oraz mniejszym skurczem niż cement portlandzki [5, 6]. Wymienione właściwości cementu CSA mogą być atrakcyjne w produkcji pianobetonu oraz wpły-

wać na poprawę jego właściwości. Dotychczasowe próby używania cementu CSA w pianobetonach sprowadzały się do wykorzystania go jako zamiennika części cementu portlandzkiego. Badania Jonesa i in. [7] wykazały, że stabilność mieszanki pianobetonowej o małej gęstości jest większa w przypadku wprowadzenia CSA niż cementu portlandzkiego.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zastosowanego cementu na wytrzymałość na ściskanie oraz współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonów o gęstości 200, 300 i 380 kg/m³. Porównano efekty stosowania cementu portlandzkiego CEM I 52,5R oraz cementu CSA. Badania przeprowadzono w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, w ramach projektu EU Horyzont 2020 pt.: *Integrated Porous Cementitious Nanocomposites In Non-Residential Building Envelopes For Green Active/Passive Energy Storage (NRG-STORAGE)*.

Badania

Pianobeton wykonywano dwuetapowo – najpierw przygotowano zaczyn o w/c = 0,4, który następnie mieszano mieszarką elektryczną z pianą wytwo-

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

²⁾ Institute of Construction and Building Materials;

Technical University of Darmstadt, Germany

³⁾ Laboratorio de Flujiometría (FLOW); Facultad

Regional Santa Fe (FRSF); Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Argentina

⁴⁾ Wilhelm Roser Sohne GMBH CO. KG (RIB),

Germany

^{*}) Adres do korespondencji:

jacek.golaszewski@polsl.pl

rzoną z zastosowaniem syntetycznego środka spieniającego. Pianobeton składał się z cementu, metakaolinu i wody w stosunku objętościowym 3 : 1 : 4,3 oraz domieszek. Superplastyfikator na bazie eterów polikarboksylowych (gęstość: 1,05 g/cm³; barwa jasnobrązowa), domieszkę przyspieszającą wiązanie na bazie azotanu wapnia (gęstość: 1,4 g/cm³; bezbarwna) i organiczną domieszkę stabilizującą (gęstość: 1,1 g/cm³, barwa żółta) zastosowano w ilości odpowiednio 0,5, 2, i 2,9% objętości zaczynu. Wykorzystano komercyjnie dostępny cement portlandzki CEM I 52.5R (OPC), cement CSA oraz metakaolin (MC). Składy spoiw przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład spoiw

Table 1. Composition of binders

Rodzaj spoiwa	Skład chemiczny [% masowy]						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O
Cement CEM I 52.5 R (OPC)	20,1	4,5	3,3	64,9	1,4	2,8	0,93
Cement CSA	9,2	28,1	1,52	39,2	3,5	11,4	0,43
Metakaolin (MK)	52,1	41	4,32	0,07	0,19	0	0,89

Pianę przygotowywano w agregacie pianotwórczym (fotografia 1). Do jej wytworzenia użyto syntetycznego środka pianotwórczego, w ilości 2% w stosunku do objętości wody w pianie. Pianę o stale kontrolowanej gęstości, ok. 70 kg/m³, stopniowo dodawano do zaczynu i mieszano przez 2 – 5 min, aż do otrzymania jednorodnej mieszanki. Odpowiednią gęstość pianobetonu uzyskiwano, zmniejszając ilość dodawanej piany do zaczynu. W przypadku pianobetonu gęstości 200 – 380 kg/m³ dodawano pianę w ilości 89 – 81% objętości mieszanki pianobetonu. Mieszankę umieszczano w formach 100 x 100 x 100 mm³ oraz 100 x 100 x 300 mm³. Nie zagęszczano jej ze względu na płynną konsystencję i możliwość utarty przez nią stabilności.



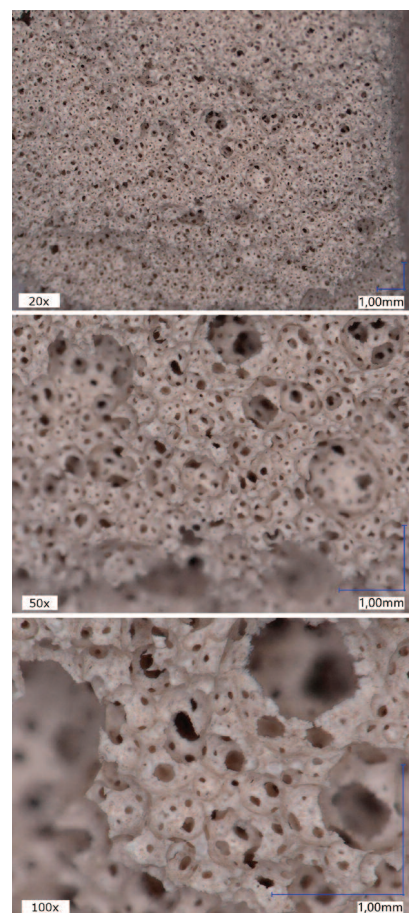
Fot. 1. Generator piany
Photo. 1. Foam generator

Przez pierwsze 24 h próbki przechowywano w formach, a następnie, po rozformowaniu, dojrzewały przez 28 dni w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 60%. Wytrzymałość na ściskanie badano na co najmniej 3 próbkach 100 x 100 x 100 mm³, po 28 dniach dojrzewania pianobetonu. Pomiar przewodności cieplnej wykonywano aparatem Isomet 2114 [8], w którym wykorzystywana jest dynamiczna metoda pomiaru właściwości termicznych. W badaniach stosowano sondę powierzchniową, w zakresie pomiarowym 0,04 – 0,3 Wm⁻¹K⁻¹. W przypadku każdej gęstości wykonano 9 pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła.

Wyniki badań

Zdjęcia mikroskopowe próbek pianobetonu o gęstości 200 kg/m³ przedstawiono na fotografiach 2 i 3. Różnice w strukturze pianobetonu wykonanego na bazie cementu portlandzkiego CEM I (OPC) i cementu CSA są bardzo wyraźne. Struktura pianobetonu z cementem portlandzkim CEM I jest niejednolita (fotografia 3), z licznymi nieregularnymi, dużymi zamkniętymi porami powietrznymi (1 – 1,5 mm) oraz mniejszą liczbą małych zamkniętych porów powietrznych (0,2 – 0,5 mm). Zastosowanie cementu CSA zdecydowanie poprawiło strukturę pianobetonu (fotografia 2). Dominują w niej bardzo małe pory o regularnym kształcie i średnicy 0,2 – 0,4 mm. Towarzyszy im stosunkowo niewielka liczba losowo rozmieszczonych większych porów powietrznych, o średnicy nie większej niż 1 mm.

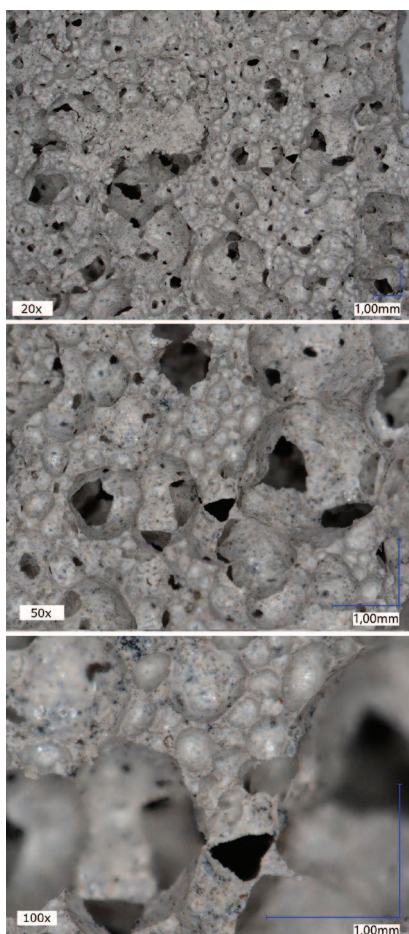
Opisane różnice w strukturze pianobetonów mogą być związane z szybkim początkiem wiązania cementu CSA, które następuje przed rozpoczęciem deterioracji piany, objawiającej się m.in. powiększeniem porów ze względu na stopniowe zmniejszanie się napięcia powierzchniowego. Teoria ta została opisana przez Jonesa i in. [9]. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie pia-



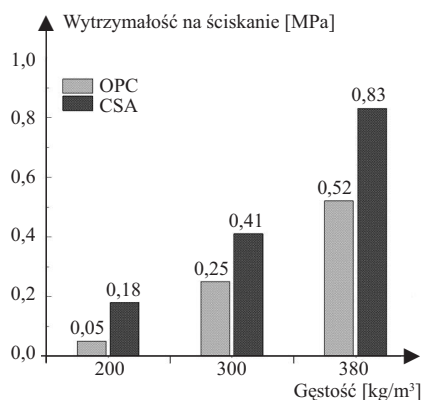
Fot. 2. Zdjęcia mikroskopowe pianobetonu o gęstości 200 kg/m³ z cementem CSA

Photo 2. Microscopic photographs of foam concrete of density 200 kg/m³ with cement CSA

nobetonu przedstawiono na rysunku 1. W przypadku wszystkich badanych pianobetonów wytrzymałość nie przekracza 1 MPa. Zgodnie z oczekiwaniami, wytrzymałość zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości pianobetonu, przy czym przyrost jest nieco większy w przypadku cementu portlandzkiego (OPC). Pianobeton z cementem CSA osiągnęły znacznie większą wytrzymałość niż pianobeton z cementem portlandzkim (OPC). W przypadku pianobetonów z CSA o gęstości 200 kg/m³ wytrzymałość jest ponad trzykrotnie większa niż pianobetonu z cementem portlandzkim (OPC). Różnice te nie są tak duże w przypadku gęstości 300 – 380 kg/m³. Pianobeton z cementem CSA charakteryzuje się o ok. 60% większą wytrzymałością w porównaniu z pianobetonem wykonanym na cementie portlandzkim. Większa wytrzymałość pianobetonów z cementem CSA wynika przede wszystkim z jego bardziej jednolitej struktury.

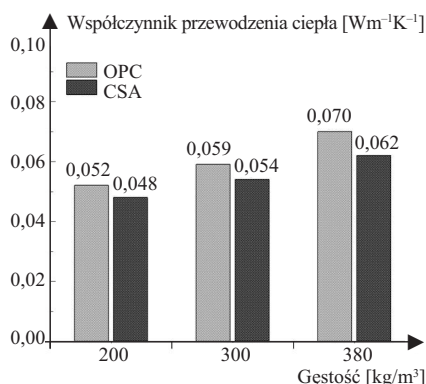


Fot. 3. Zdjęcia mikroskopowe pianobetonu o gęstości 200 kg/m³ z cementem CEM I (OPC)
 Photo 3. Microscopic photographs of foam concrete of density 200 kg/m³ with cement CEM I (OPC)



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie pianobetonów
 Fig. 1. Compressive strength of foam concrete

Wyniki badania przewodności cieplnej pianobetonów przedstawiono na rysunku 2. Potwierdzają one oczekiwane, znacznie lepsze właściwości termiczne pianobetonów w porównaniu z betonem zwykłym. Zmierzone współczynniki



Rys. 2. Współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonu
 Fig. 2. Thermal conductivity coefficient of foam concrete

niki przewodzenia ciepła wynoszą 0,048 ÷ 0,062 Wm⁻¹K⁻¹, czyli są tylko nieznacznie większe od styropianu (0,030 – 0,045 Wm⁻¹K⁻¹). Zgodnie z oczekiwaniami charakterystyka termiczna pianobetonów zależy od ich gęstości, ponieważ przewodność cieplna maleje wraz ze zmniejszaniem się liczby porów powietrznych.

Wyniki badań pokazują korzystny wpływ zastosowania cementu CSA na przewodność cieplną pianobetonu. W przypadku pianobetonów z cementem CSA wynosi ona 0,048 – 0,062 Wm⁻¹K⁻¹, a z cementem portlandzkim (OPC) 0,052 ÷ 0,07 Wm⁻¹K⁻¹ (rysunek 2). Podobnie jak w przypadku wytrzymałości, przyczyną jest różnica w strukturze badanych pianobetonów z cementem CSA i cementem portlandzkim (OPC). Mniejszą przewodność cieplną na bazie cementu CSA potwierdzają również badania Hunaga i in. [10], które wykazały mniejszą przewodność cieplną zapraw z cementem CSA.

Wnioski

Przedstawione wyniki badań pokazują wpływ zastosowania cementu CSA na właściwości ultralekkiego pianobetonu. Na ich podstawie można stwierdzić, że:

- w strukturze pianobetonu z cementem CSA dominują bardzo małe zamknięte pory powietrzne o regularnym kształcie, z niewielką liczbą losowo rozmieszczonych większych porów powietrznych. Struktura pianobetonów z cementem portlandzkim jest mniej jednolita i zawiera więcej porów powietrznych o nieregularnym kształcie i większych wymiarach;

- różnice w strukturze pianobetonów w istotny sposób wpływają na ich właściwości termiczne i mechaniczne;

- pianobetonu z cementem CSA mają większą wytrzymałość i lepsze właściwości termiczne w porównaniu z pianobetonem z cementem portlandzkim;

- pianobetonu z cementem CSA wykazują korzystniejsze właściwości pod kątem ich zastosowania jako materiału izolacyjnego.

Literatura

- [1] Falliano D, Restuccia L, Gugliandolo E. A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete. *Constr Build Mater.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121101>.
- [2] Ghorbani S, Ghorbani S, Tao Z, de Brito J, Tavakkolizadeh M. Effect of magnetized water on foam stability and compressive strength of foam concrete. *Constr Build Mater.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.160>.
- [3] Juenger MCG, Winnefeld F, Provis JL, Ideker JH. Advances in alternative cementitious binders. *Cem. Concr. Res.* 2011; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.
- [4] Biolzi L, Cattaneo S, Guerrini G, Afroughsabet V. Sustainable concretes for structural applications, in: *Res. Dev.*, 2020; https://doi.org/10.1007/978-3-030-33256-3_24.
- [5] Gołaszewski J, Gołaszewska M. Properties of mortars with calcium sulfoaluminate cements with the addition of Portland cement and limestone. *Arch. Civ. Eng.* 2021; <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137177>.
- [6] Batog M, Synowicz K. Cement i spoiwa specjalne zawierające klinkier siarczanogliniany, *Budownictwo, Technol. Archit.* 2017; 1: 59 – 64.
- [7] Jones MR, Zheng L, Ozlutas K. Stability and instability of foamed concrete, *Mag. Concr. Res.* 2016; <https://doi.org/10.1680/macrc.15.00097>.
- [8] Applied Precision Ltd, ISOMET 2114 Thermal properties analyzer User's Guide, Bratislava, Slovakia, 2011. https://www.appliedp.com/download/manual/isomet2114_ug_en.pdf.
- [9] Jones MR, Ozlutas K, Ouzoumidou A, Rathbone RF. Behaviour of PC-CSA-FA Blends in Foamed Concrete, *Conf. Proc. World Coal Ash Conf. Lexington, USA.* 1 (2013) 31.
- [10] Huang G, Pudasainee D, Gupta R, Liu WV. Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortars incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures, *Constr. Build. Mater.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122082>.

Przedstawione w artykule wyniki są częścią badań prowadzonych w ramach projektu europejskiego EU Horyzont 2020, nr GA 870114, pt. „Integrated Porous Cementitious Nanocomposites In Non-Residential Building Envelopes For Green Active/Passive Energy Storage (NRG-STORAGE).

Przyjęto do druku: 25.05.2022 r.