

prof. dr hab. inż. Marta Kadela, prof. Instytutu<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-2127-0061

prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-5229-7884

# The impact of defects on the compressive strength of foamed concrete

## Wpływ uszkodzeń na wytrzymałość pianobetonu na ściskanie

DOI: 10.15199/33.2024.12.07

**Abstract.** The aim of the article was to present the defects that may occur in foamed concrete at the construction stage and how it can affect the compressive strength. The tests of the compressive strength of foamed concrete were carried out on core samples taken from the insulation layer of the flat roof structure of the selected investment, in which foamed concrete was used. The effect of foamed concrete defects (shrinkage cracks, cracks, losses, delamination of layers, etc.) on the compressive strength and the image of sample destruction were assessed. Based on the analysis of laboratory test results, types of foamed concrete defects and its impact on the compressive strength were developed, as well as the method of their elimination and/or protecting against such damage.

**Keywords:** lightweight concrete; cellular concrete; shrinkage cracks; cracks; voids; compressive strength.

**Streszczenie.** W artykule omówiono uszkodzenia, jakie mogą wystąpić w pianobetonie na etapie wykonawstwa oraz jak mogą one wpłynąć na wartość wytrzymałości na ściskanie. Badania wytrzymałości na ściskanie pianobetonu przeprowadzono na próbkach rdzeniowych pobranych z warstwy ociepleniowej stropodachu wybranej inwestycji, w której to w warstwie izolacyjnej zastosowano pianobeton. Oceniono wpływ wad pianobetonu (rysy skurczowych, spękań, ubytków, delaminacji warstw itp.) na wytrzymałość na ściskanie oraz schemat zniszczenia próbek. Na podstawie analizy wyników badań laboratoryjnych opracowano podział uszkodzeń pianobetonu i ich wpływ na wytrzymałość na ściskanie, jak również sposób ich eliminacji i/lub zabezpieczenia przed takimi uszkodzeniami.

**Słowa kluczowe:** lekki beton; beton komórkowy; rysy skurczowe; pęknięcia; ubytki; wytrzymałość na ściskanie.

Foamed concrete is a special cement composite containing air voids, generated mechanically, in a minimum amount of 20% by volume [1]. Foamed concrete technology was patented over 100 years ago [1, 2], but this product is still not widely used. The use of foamed concrete is primarily associated with road engineering and the accompanying infrastructure [3 – 6]. In building construction, foamed concrete is used less frequently [7 – 11]. Foamed concrete is most often used in a leveling or leveling-insulating layer under concrete floors [12], and recently also in the construction of flat roofs [13, 14]. The use of foamed concrete is related to its properties [2, 15 – 17], such as density, which is equal to 50 – 2000 kg/m<sup>3</sup> [18 – 20], compressive strength 0.1 – 43.0 MPa [18, 19, 21] and thermal conductivity coefficients 0.02 – 0.7 W/(m·K) [22 – 24] depending on the composition of the foamed concrete mix [1, 15, 17, 25]. In order to widely use foamed concrete, it is necessary to know the degradation processes and the possibility of potential defect. This may be the reason for potential reluctance to use foamed concrete by investors, especially since no repair methods or repair measures have been developed that could be used in the case of foamed concrete, as is the case with other cement composites [26, 27].

Pianobeton to specjalny kompozyt cementowy o zawartości porów powietrznych, wytworzonych w sposób mechaniczny, w minimalnej ilości 20% obj. [1]. Technologia pianobetonu została opatentowana przeszło 100 lat temu [1, 2], ale wciąż ten wyrób nie jest powszechnie wykorzystywany, a jego stosowanie kojarzy się przede wszystkim z inżynierią drogową i towarzyszącą jej infrastrukturą [3 – 6]. W budownictwie kubaturowym pianobeton stosowany jest rzadziej [7 – 11], najczęściej w warstwie wyrównawczej lub wyrównawczo-izolacyjnej pod posadzki betonowe [12] a w ostatnim okresie również w konstrukcji stropodachów [13, 14]. Zastosowanie pianobetonu związane jest z jego właściwościami [2, 15 – 17], takimi jak gęstość objętościowa, która wynosi 50 – 2000 kg/m<sup>3</sup> [18 – 20], wytrzymałość na ściskanie 0,1 – 43,0 MPa [18, 19, 21] i współczynnik przewodzenia ciepła 0,02 – 0,7 W/(m·K) [22 – 24] w zależności od składu mieszanki pianobetonowej [1, 15, 17, 25]. Aby powszechnie stosować pianobeton, niezbędna jest znajomość procesów degradacyjnych oraz możliwości wystąpienia potencjalnych uszkodzeń. Może to bowiem warunkować potencjalną niechęć stosowania pianobetonu przez inwestorów, szczególnie że nie zostały opracowane sposoby naprawy, czy środki naprawcze, które mogłyby być stosowane w przypadku pianobetonu, podobnie jak to ma miejsce w przypadku innych kompozytów cementowych [26, 27].

Celem artykułu jest określenie uszkodzeń pianobetonu, które mogą wystąpić na etapie wykonawstwa i ich wpływu na wytrzymałość na ściskanie. W tym celu określono wytrzyma-

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>\*</sup>) Correspondence address: m.kadela@itb.pl

The article aims to determine the defect in foamed concrete that may occur during implementation and their impact on compressive strength. For this purpose, the compressive strength of foamed concrete core samples  $\varnothing$  100 with the designed composition and properties (density of  $400 \text{ kg/m}^3$  and compressive strength of 0.6 MPa) taken from the insulation layer of the flat roof of the selected investment was determined. Due to the slopes in the insulation layer of the flat roof, the thickness of this layer was 50 – 140 mm. The flat roof and the properties of the foamed concrete mix, the flat roof was divided into 16 fields, in which the foamed concrete mix was then laid. Photo 1 shows sample photos of the laying of the foamed concrete mix on a flat roof.



**Photo. 1. Laying the foamed concrete mix on the flat roof: a) [13]; b) [14]**  
 Fot. 1. Układanie mieszanki pianobetonowej na dachu płaskim: a) [13]; b) [14]

### Visual assessment of defect to the foamed concrete layer

Defects such as shrinkage cracks, cracks (e.g. in the expansion joints of the building structure below), loss of surface, delamination of layers and minor damage to the surface of the layer (Photo 2) were observed during the inventory of the insulation layer of the flat roof made of foamed concrete. Separation of the foamed concrete mix was also observed, which is the most common defect associated with the production of foamed concrete. This phenomenon may be less visible when laying foamed concrete on a concrete substrate, as is the case with the insulation layer of the flat roof, because then the drainage of water into the substrate is limited.

### Determination of foamed concrete properties

**Material.** Foamed concrete samples were taken from the insulation layer of the flat roof in accordance with the standard PN-EN 12504-1:2019-08/AC:2021-01 *Testing concrete in structures – Part 1: Cored specimens – Taking, examining and testing in compression*. From each field, separated on the surface of the flat roof, from places with a minimum layer thickness of 110 mm, three core samples with a diameter of 100 mm were taken. Core drilling was performed in places where defect was observed.

łość na ściskanie próbek rdzeniowych pianobetonu  $\varnothing$  100 o uprzednio zaprojektowanym składzie i właściwościach (gęstości objętościowej  $400 \text{ kg/m}^3$  i wytrzymałości na ściskanie 0,6 MPa), pobranych z warstwy izolacyjnej konstrukcji stropodachu wybranej inwestycji. Z uwagi na wykonanie spadków w warstwie izolacyjnej konstrukcji stropodachu, grubość tej warstwy wynosiła 50 – 140 mm. Z powodu dużej powierzchni i zagospodarowania stropodachu oraz właściwości mieszanki pianobetonowej, stropodach został podzielony na 16 pól, w których była następnie układana mieszanka pianobetonowa. Przykładowe zdjęcia z układania mieszanki pianobetonowej na dachu płaskim przedstawiono na fotografii 1.

### Ocena wizualna uszkodzeń warstwy z pianobetonu

Podczas inwentaryzacji warstwy izolacyjnej stropodachu wykonanej z pianobetonu zaobserwowano występowanie uszkodzeń, takich jak rysy skurczowe, pęknięcia (np. w miejscach dylatacji niżej położonej konstrukcji), ubytki, delaminacja warstwy oraz drobne uszkodzenia jej powierzchni (fotografia 2). Zaobserwowano również lokalne rozsegregowanie mieszanki pianobetonowej, które jest najczęściej obserwowanym uszkodzeniem związanym z wykonawstwem warstwy z pianobetonu. Zjawisko to może być mniej widoczne przy układaniu pianobetonu na podłożu betonowym, jak to ma miejsce w przypadku warstwy izolacyjnej tego stropodachu, gdyż wówczas odpływ wody w głąb podłoża jest ograniczony.

### Ocena właściwości pianobetonu

**Material.** Próbkę pianobetonu pobrano z wykonanej warstwy izolacyjnej stropodachu zgodnie z normą PN-EN 12504-1:2019-08/AC:2021-01 *Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Próbkę rdzeniowe – Pobieranie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie*. Z każdego pola, wydzielonego na powierzchni stropodachu, z miejsc o minimalnej grubości warstwy 110 mm pobrano trzy próbki rdzeniowe o średnicy 100 mm. Odwierty rdzeniowe zostały wykonane w miejscach, gdzie zaobserwowano uszkodzenia.



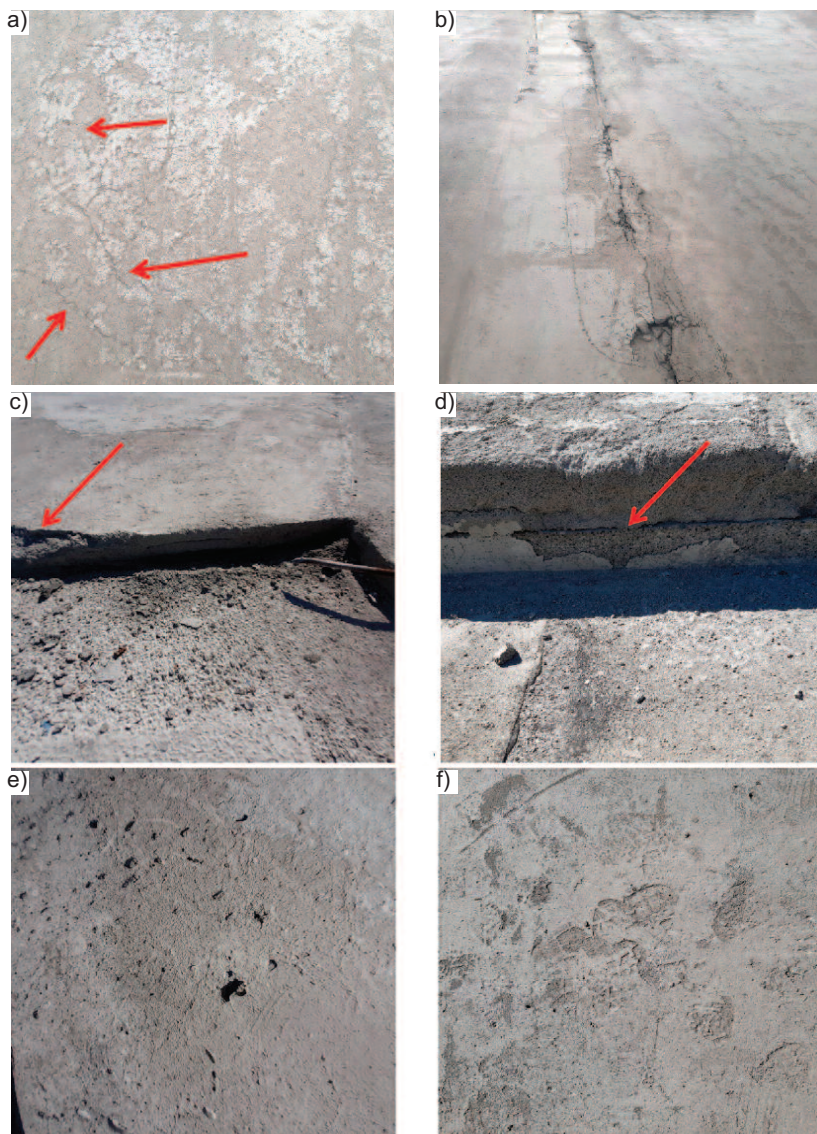
**Test methods and results.** The compressive strength test of foamed concrete samples was carried out in accordance with the standard PN-EN 12390-3:2019-07 *Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens*. The density test was conducted in accordance with PN-EN 206+A1:2016-12 *Concrete – Specification, performance, production and conformity – National Annex to PN-EN 206+A1:2016-12*. Each time, samples of 100 mm in diameter and 100 mm in height were tested in an air-dry (natural) state. The results are presented as an average of three core samples taken from a given field separated on the surface of the flat roof.

Based on the visual assessment of defect to foamed concrete samples (Photo 3), it was found that shrinkage cracks were the most common, while cracks caused sample destruction. In addition, single large air pores (air voids or caverns) were observed in the microstructure of hardened foamed concrete (Photo 3a).

The determined average density of foamed concrete in individual fields was 430 – 485 kg/m<sup>3</sup> (Figure 1), and the compressive strength of core samples was 0.69 – 1.28 MPa (Figure 2).

### Discussion of results

Based on the results of the tests, it was found that for core samples taken from the insulation layer of the flat roof from each test field, the density and compressive strength of foamed concrete were higher than the designed density and compressive strength, equal to 400 kg/m<sup>3</sup> (Figure 1) and 0.6 MPa (Figure 2), respectively. The increase in density was approx. 15%. A significant dispersion of compressive strength



**Photo 2. Damages of the foamed concrete layer: a) shrinkage cracks; b) cracks; c) loss of surface; d) delamination of the layer; e) voids (caverns); f) minor damage to the layer surface**

*Fot. 2. Uszkodzenia warstwy z pianobetonu: a) rysy skurczowe; b) pęknięcia; c) ubytki; d) delaminacja warstwy; e) pustki (kawerny); f) drobne uszkodzenia powierzchni*

wiodowały spękania. Ponadto w mikrostrukturze stwardniałego pianobetonu zaobserwowano pojedyncze duże pory powietrzne, tzw. pustki lub kawerny (fotografia 3c).

Średnia gęstość objętościowa pianobetonu wynosiła w poszczególnych polach 430 – 485 kg/m<sup>3</sup> (rysunek 1), a wytrzymałość na ściskanie próbek rdzeniowych 0,69 – 1,28 MPa (rysunek 2).

### Dyskusja wyników

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przypadku próbek rdzeniowych pobranych z warstwy izolacyjnej stropodachu uzyskano w każdym polu badawczym większą gęstość objętościową i wytrzymałość na ściskanie niż założone na etapie projektowania, równe odpowiednio 400 kg/m<sup>3</sup> (rysunek 1) i 0,6 MPa (rysunek 2). W przypadku gęsto-

**Metody i wyniki badań.** Badania wytrzymałości na ściskanie próbek pianobetonu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*, a badanie gęstości objętościowej zgodnie z normą PN-EN 206+A1:2016-12 *Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*. Każdorazowo badaniu poddano próbki o średnicy 100 i wysokości 100 mm w stanie powietrzno-suchym (naturalnym). Wyniki przedstawiono jako średnią z trzech próbek rdzeniowych pobranych z danego pola wydzielonego na powierzchni stropodachu.

Na podstawie przeprowadzonej oceny wizualnej uszkodzeń próbek pianobetonu (fotografia 3) stwierdzono, że w analizowanym przypadku najczęściej występowały rysy skurczowe, natomiast zniszczenie próbek powodowały spękania.

results was found, with almost 100% difference in compressive strength. The density of foamed concrete samples from test fields III and XV is the same, while the compressive strength of the samples differs by almost 40%. A similar situation was observed in the case of samples from test fields VI and XVI. This shows that not only density determines compressive strength. In the analyzed case, the obtained results were also affected by defect to the samples. This confirmed the qualitative impact of defect on compressive strength. It is difficult to determine the quantitative impact, because the investor did not agree to take reference samples (without defect). It was observed that lower compressive strength was obtained for samples in which cracks reaching up to about half the height of the sample or large-width cracks occurred (Figure 3 and Photo 3b). This is related to the fact that the initiation of destruction occurs in an existing crack (Photo 4). In addition, the voids (caverns) occurring in the microstructure of foamed concrete could have contributed to the reduction in compressive strength.

It should be emphasized that the lowest compressive strength of foamed concrete was 0.69 MPa, and therefore was close to the designed compressive strength – 0.6 MPa. However, after analyzing the results, it was found that the reduction in strength in this case resulted from dela-

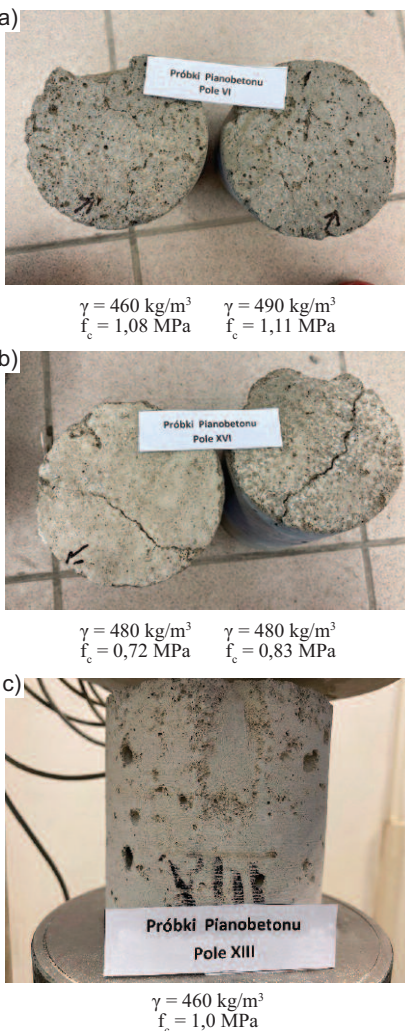


Photo 3. Photos of degradation of selected samples: a) shrinkage cracks; b) cracks; c) voids

Fot. 3. Przykładowe uszkodzenia próbek pianobetonu: a) rysy skurczowe; b) pęknięcia; c) pustki

ści objętościowej wzrost ten wyniósł ok. 15%, natomiast w przypadku wytrzymałości na ściskanie stwierdzono istotny rozrzut wyników wytrzymałości o prawie 100% różnicy wytrzymałości. Próbki pianobetonu z pól badawczych III i XV mają wprawdzie tę samą gęstość objętościową, ale ich wytrzymałość na ściskanie różni się o prawie 40%. Podobną sytuację zaobserwowano w przypadku próbek z pól badawczych VI i XVI. Wynika z tego, że o wytrzymałości na ściskanie decyduje nie tylko gęstość objętościowa. W analizowanym przypadku na otrzymane wyniki wpłynęły również uszkodzenia próbek. Potwierdzono w ten sposób jakościowy wpływ uszkodzeń na wytrzymałość na ściskanie, przy czym trudno określić wpływ ilościowy, gdyż inwestor nie zgodził się na pobranie próbek referencyjnych (bez uszkodzeń). Zauważono, że mniejszą wartość wytrzymałości na ściskanie uzyskano w przypadku próbek, w których występowały pęknięcia sięgające do ok. połowy wysokości próbek lub pęknięcia o dużej szerokości (rysunek 3 i fotografia 3b). Jest to związane z tym, że inicjacja zniszczenia następuje w istniejącej rysie (fotografia 4). Ponadto do zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie mogły się przyczynić dodatkowo pustki (kawerny) występujące w mikrostrukturze pianobetonu.

Należy podkreślić, że najmniejsza wytrzymałość pianobetonu na ściskanie wynosiła 0,69 MPa, a zatem była bliska wytrzymałości na ściskanie założonej na etapie projektowania – 0,6 MPa. Po analizie wyników stwierdzono jednak, że zmniejszenie wytrzymałości wynikało w tym przypadku z delamina-

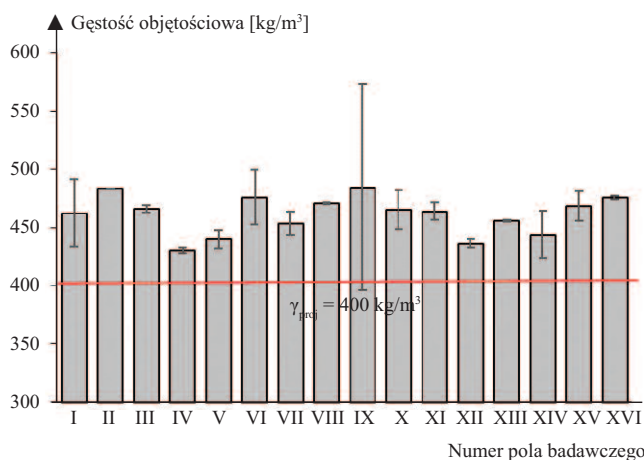


Fig. 1. The average results of dry density of foamed concrete samples, the red line indicates the density of foamed concrete used at the design stage  $\gamma_{proj}$

Rys. 1. Średnia gęstość objętościowa próbek pianobetonu, czerwoną linią zaznaczono gęstość objętościową pianobetonu założoną na etapie projektowania  $\gamma_{proj}$

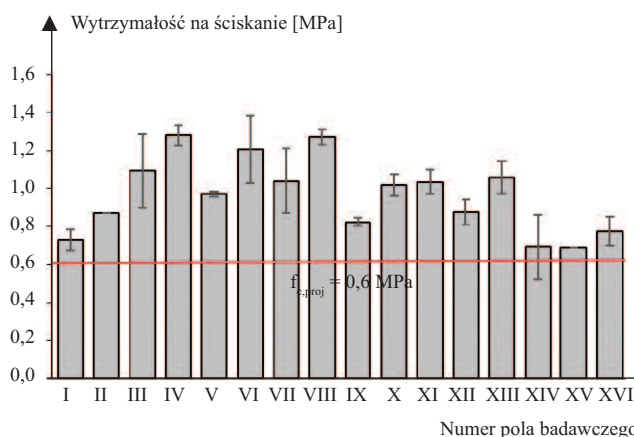
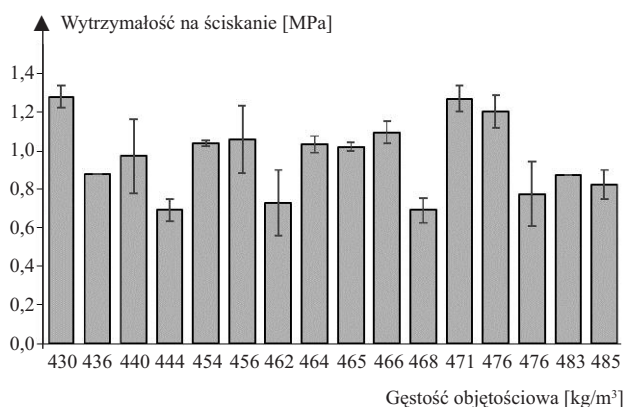


Fig. 2. The average results of compressive strength of foamed concrete samples, the red line indicates the compressive strength of foamed concrete used at the design stage  $f_{c,proj}$

Rys. 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek pianobetonu, czerwoną linią zaznaczono wytrzymałość na ściskanie pianobetonu założoną na etapie projektowania  $f_{c,proj}$



mination of layers made of two batches (Photo 2d). The samples were most often subject to separation. When delamination of layers was not observed, the destruction occurred in the layer of the sample that was characterized by lower compressive strength (Photo 5). Thus, the table presents the author's developed impact of defect on the compressive strength of foamed concrete and the method of eliminating and/or protecting against such defect.

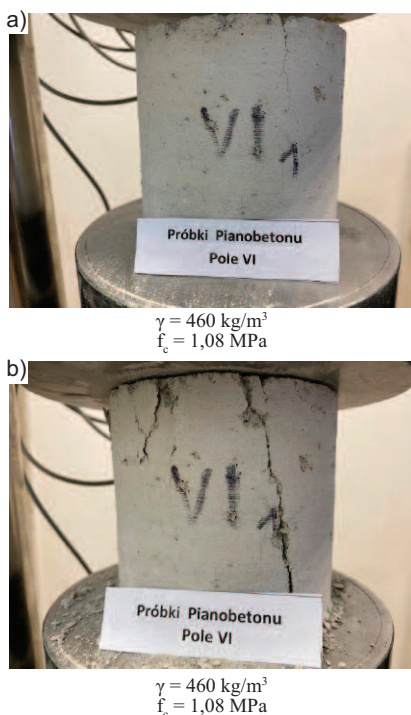


**Fig. 3. The average results of compressive strength of core foamed concrete samples depending on density**  
*Rys. 3. Średnia wytrzymałość na ściskanie rdzeniowych próbek pianobetonu w zależności od gęstości objętościowej*

cji próbki występującej na styku połączenia warstw pianobetonu, wykonanych z dwóch zarobów (fotografia 2d). Wówczas próbki najczęściej ulegały separacji, a gdy nie zaobserwowano delaminacji warstw, to zniszczenie następowało w tej warstwie próbki, która charakteryzowała się mniejszą wytrzymałością na ściskanie (fotografia 5). Mając to na uwadze, w tabeli przedstawiono opracowany autorski wpływ uszkodzeń na wytrzymałość na ściskanie pianobetonu oraz sposób eliminacji i/lub zabezpieczenia przed takim uszkodzeniem.

**Summary**

The use of foamed concrete is often limited, especially due to the lack of knowledge about its degradation and repair measures. Therefore, the aim of the article was to analyze the defect that may occur at the stage of making a layer of foamed concrete on a concrete substrate and its effect on compressive strength. The analysis concerned a selected investment in which foamed concrete with appropriate physical properties was used in the insulation layer of the flat roof.



**Photo 4. Destruction of foamed concrete samples due to initiation of destruction in a crack: a) before the test; b) after the test**  
*Fot. 4. Zniszczenie próbek pianobetonu wskutek inicjacji zniszczenia w rysie: a) przed badaniem; b) po badaniu*



**Photo 5. Image of destruction of foamed concrete samples made of two batches of foamed concrete mix**  
*Fot. 5. Obraz zniszczenia próbek pianobetonu wykonanych z dwóch zarobów mieszanki pianobetonowej*

Based on the visual assessment of the foamed concrete layer, the following defects was found: shrinkage cracks; cracks; loss of surface and segregation of the mix and delamination of layers. Significant losses of surface and cracks in foamed concrete, due to the lack of continuity, cause the destruction of the insulation layer. To assess the effect of the remaining defect on the compressive strength, core samples with a diameter of 100 mm and a minimum thickness of 110 mm were taken from the places where the defect occurred. In the case of foamed concrete with the same density, significant differences in compressive strength were obtained (up to 100% difference in strength). This confirms that

Na podstawie oceny wizualnej warstwy z pianobetonu stwierdzono następujące uszkodzenia: rysy skurczowe; pęknięcia; ubytki oraz rozsegregowanie mieszanki i separację warstwy. Znaczne ubytki i spękania pianobetonu wskutek braku ciągłości powodują destrukcję warstwy izolacyjnej. Do oceny wpływu pozostałych uszkodzeń na wytrzymałość na ściskanie pobrano w miejscach ich występowania próbki rdzeniowe o średnicy 100 mm i minimalnej grubości 110 mm. W przypadku pianobetonu o tej samej gęstości objętościowej uzyskano istotne różnice wartości wytrzymałości na ściskanie (sięgające nawet 100% różnicy wytrzymałości), co potwierdza, że wytrzymałość na ści-

**Podsumowanie**

Stosowanie pianobetonu jest często limitowane, szczególnie ze względu na brak wiedzy dotyczącej jego degradacji i środków naprawczych. Mając na uwadze przybliżenie tego zagadnienia, celem artykułu była analiza uszkodzeń, jakie mogą wystąpić na etapie wykonywania warstwy z pianobetonu na podłożu betonowym i ich wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Analiza dotyczyła wybranej inwestycji, w której pianobeton o odpowiednich parametrach fizycznych został zastosowany w warstwie izolacyjnej stropodachu.

## Types of defects and their effect on the compressive strength of the foamed concrete

Rodzaje uszkodzeń i ich wpływ na wytrzymałość na ściskanie pianobetonu

Own work

Opracowanie własne

| Defect type/Typ uszkodzenia   | Impact on the compressive strength of foamed concrete/<br>Wpływ na wytrzymałość na ściskanie pianobetonu  | Proposal of a method for eliminating defect<br>and/or protecting against defect/<br>Propozycja eliminacji uszkodzeń i/lub<br>zabezpieczenia przed uszkodzeniem  |
|---|---|---|
| 1) Shrinkage cracks [samples: I-III, VI, VIII-XV]/<br>1) Rysy skurczowe [próbki: I-III, VI, VIII-XV]  | slight reduction in compressive strength/<br>nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie   | ensuring proper curing conditions of foamed<br>concrete/zapewnienie odpowiedniej pielęgnacji<br>pianobetonu   |
| 2) Cracks [samples: III-V, XI, XII, XIV, XVI]/<br>2) Pęknięcia [próbki: III-V, XI, XII, XIV, XVI]   | slight reduction in compressive strength in the case of shallow<br>cracks up to destruction due to lack of continuity/nieznaczne<br>zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie w przypadku<br>płytłych pęknięć, aż do destrukcji wskutek braku ciągłości   | designing expansion joints, protecting the foamed<br>concrete layer against damage/zaprojektowanie<br>dylatacji, zabezpieczenie warstwy z pianobetonu<br>przed uszkodzeniem   |
| 3) Separation of foamed concrete mix [samples:<br>III, VIII, XII, XIV, XV]/<br>3) Rozsegregowanie mieszanki pianobetonowej<br>[próbki: III, VIII, XII, XIV, XV] | significant reduction in compressive strength/znaczne<br>zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie  | appropriately selected composition, production<br>method and technology of laying the foamed<br>concrete mix/odpowiednio dobrany skład, sposób<br>produkcji oraz technologia układania mieszanki<br>pianobetonowej  |
| 4) Foamed concrete layer separation [samples: III,<br>XV, XVI]/<br>4) Separacja warstwy pianobetonu [próbki: III,<br>XV, XVI]                                   | different failure patterns, from sample destruction to a slight<br>reduction in compressive strength, depending on the adhesion<br>strength of the layers and the mechanical properties of the<br>foamed concrete in a given layer/różny schemat zniszczenia – od<br>rozpadu próbki po nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości na<br>ściskanie w zależności od siły adhezji warstw oraz właściwości<br>mechanicznych pianobetonu w danej warstwie | it is recommended to make a layer of foamed<br>concrete from one batch/rekomenduje się<br>wykonanie warstwy pianobetonu z jednego<br>zarobu   |
| 5) Loss of surface<br>[samples: I-VI,<br>VIII, IX, XI-XV]/<br>5) Ubytki [próbki:<br>I-VI, VIII, IX,<br>XI-XV]   | a) by voids (cavities) [sam-<br>ples: I-VI, VIII, XI-XV]/<br>a) pustki (kawerny) [próbki:<br>I-VI, VIII, XI-XV]<br>b) detachments, mechanical def-<br>ects [samples: VI, IX, XII-XV]/<br>b) odspojenia, ubytki<br>mechaniczne [próbki: VI, IX,<br>XII-XV]   | reduction of compressive strength depending on the number<br>and size of voids (cavities)/zmniejszenie wytrzymałości na<br>ściskanie w zależności od liczby i wielkości pustek (kawern)   |
|   | reduction of compressive strength depending on the area of<br>defects/zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie w zależności<br>od powierzchni ubytków  | appropriately selected composition of the foamed<br>concrete mix/odpowiednio dobrany skład<br>mieszanki pianobetonowej<br><br>protection of the foamed concrete layer against<br>mechanical damage/zabezpieczenie warstwy<br>z pianobetonu przed uszkodzeniem<br>mechanicznym |

compressive strength does not depend solely on density, but also on sample defect.

Similarly to other cement composites, low compressive strength was obtained in the case of samples with various types of defects (cracks, cavities, delamination of layers, etc.). The lowest strength was observed in samples with cracks reaching a depth of approximately half the layer thickness or large cracks, as well as in the case of poor quality contact zone of foamed concrete layers made of two batches. In the case where no delamination of layers was observed, the sample was destroyed in the layer that was characterized by lower compressive strength. The reduction in compressive strength was not additionally impacted by voids (cavities) occurring in the microstructure of foamed concrete. Due to the lack of reference samples (without defect), the quantitative effect of defect on compressive strength was not determined. The conducted research confirms the necessity of proper design of technology for laying the mix and curing foamed concrete, as well as the possible implementation of expansion joints in the foamed concrete layer.

skanie nie zależy wyłącznie od gęstości objętościowej, ale również od uszkodzenia próbek.

Analogicznie jak w przypadku innych kompozytów cementowych, małą wytrzymałość na ściskanie uzyskano w przypadku próbek, w których występowały różnego rodzaju wady (pęknięcia, ubytki, delaminacja warstw itp.), a najmniejszą miały próbki charakteryzujące się pęknięciami sięgającymi głębokości ok. połowy grubości warstwy lub pęknięcia o dużej szerokości, jak również w przypadku złej jakości strefy kontaktowej warstw pianobetonu, wykonanych z dwóch zarobów. W przypadku, gdy nie zaobserwowano delaminacji warstw, zniszczenie próbki następowało w tej warstwie, która charakteryzowała się mniejszą wytrzymałością na ściskanie. Na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie wpłynęły dodatkowo pustki (kawerny) występujące w mikrostrukturze pianobetonu. Ze względu na brak próbek referencyjnych (bez uszkodzeń) trudno określić ilościowy wpływ uszkodzeń na wytrzymałość na ściskanie. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają konieczność właściwego zaprojektowania technologii układania mieszanki pianobetonowej i pielęgnowania pianobetonu, a także ewentualne wykonanie dylatacji w warstwie wykonanej z pianobetonu.

Received: 14.09.2024

Revised: 18.10.2024

Published: 20.12.2024

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.09.2024 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 18.10.2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

## Literature

- [1] Van Deijk S. Foam concrete, *Concr.* 1991; 25 (5): 49–54.
- [2] Jones MR, McCarthy A. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Mag. Concrete Res.* 2005; <https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.1.21>.
- [3] Cox LS. Major road and bridge projects with foam concrete. In: Dhir RK, Newlands MD., McCarthy A., editors. *Use of foamed concrete in construction*. London: Thomas Telford Publishing; 2005. pp. 105-112.
- [4] Kadela M, Drusa M. Foamed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers and Geotextile in Geotechnical Applications. In: Czarnecki L, Garbacz A, Wang R, Frigione M, Aguiar JB. *Concrete-Polymer Composites in Circular Economy. Proceedings of the 17th International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2023)*; <https://doi.org/10.1007/978-3-031-72955-3>.
- [5] Decký M, Drusa M, Zgútová K, Blaško M, Hájek M, Scherfel W. Foam concrete as new material in road constructions. *Proc. Eng.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.585>.
- [6] Kadela M, Babiak B. Pianobeton w budownictwie komunikacyjnym. *Materiały Budowlane* 2018; <https://doi.org/10.15199/33.2018.03.32>.
- [7] Pokorska I, Kysiak A. Technologia pianobetonu jako rozwiązanie problemu budownictwa socjalnego. *Zesz. Nauk. Pol. Częstoch. Bud.* 2012; 18: 205-210.
- [8] Pokorska-Silva I, Kadela M, Fedorowicz L. A reliable numerical model for assessing the thermal behavior of a dome building. *J. Build. Eng.* 2010; <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101706>.
- [9] Mydin MAO, Wang Y. Structural performance of lightweight steel-foamed concrete – steel composite walling system under compression. *Thin-Wall. Struct.* 2011; <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.08.007>.
- [10] Hulimka J, Krzywoń R, Knoppik-Wróbel A. Use of foamed concrete in the structure of passive house foundation slab. In: *Proceedings of 7th International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures AMCM2011*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej; 2011. pp. 221-222.
- [11] Klemczak B, Koenders EAB, Jonkers H, Fachinotti V, Mankel Ch, Röser F, Dolado JS, Erkizia E, Dauvergne J-L, Ortega A, Zanoni F, Červenka J, Dünfelder M, Stunz Ch, Zhilyaev D, Kolev VA. Ultralekki pianobeton z dodatkiem materiału zmiennofazowego do stosowania jako termoizolacja. *Materiały Budowlane*. 2024; <https://doi.org/10.15199/33.2024.02.09>.
- [12] Krzywoń R, Hulimka J, Jędrzejewska A. Techniczne możliwości zbrojenia pianobetonowych płyt fundamentowych. *Czasop. Inż. Łąd., Środ. Arch./J. Civ. Eng., Environ. Architect.* 2017; <https://doi.org/10.7862/rb.2017.127>.
- [13] [https://pianobeton.pl/\(data dostępu: 1.11.2024\)](https://pianobeton.pl/(data%20dost%C4%99pu%3A%201.11.2024)).
- [14] [www.cemex.pl/insularis-piano-pianobeton](http://www.cemex.pl/insularis-piano-pianobeton) (data dostępu: 1.11.2024).
- [15] Jones MR, McCarthy A. Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A., editors. *Use of foamed concrete in construction. Proceedings of International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*. London: Thomas Telford; 2005. pp. 61–88.
- [16] Ramamurthy K, Nambiar EK, Ranjani GIS. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2009; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>.
- [17] Kadela M, Winkler-Skalna A, Łoboda B, Kukielka A: PIANO-BETON – charakterystyka materiałowa oraz możliwości zastosowania. *Materiały Budowlane*. 2015; <https://doi.org/10.15199/33.2015.07.30>.
- [18] Cox LS., Van Deijk S. Foam concrete: a different kind of mix. *Concr.* 2002; 36 (2): 54 – 55.
- [19] Kearsley EP, Wainwright PJ. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cem. Concr. Res.* 2002; [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00665-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00665-2).
- [20] Nambiar EK, Ramamurthy K. Air-void characterization of foam concrete. *Cem. Concr. Res.* 2007; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.009>.
- [21] Kadela M, Kukielka A. Influence of foaming agent content in fresh concrete on elasticity modulus of hard foam concrete. In: *Brittle Matrix Composite (11) – Proceedings of the 11th International Symposium on Brittle Matrix Composites BMC 2015*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN; 2015. pp. 489 – 496.
- [22] Silva N, Mueller U, Malaga K, Hallingberg P, Cederqvist Ch. Foam concrete-aerogel composite for thermal insulation in lightweight sandwich facade elements. In: *Concrete 2015: Proceedings of the 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week „Construction Innovations, Research into Practice”*. Melbourne: Institute of Australia Australia; 2015. pp. 1355-1362.
- [23] Fu Y, Wang X, Wang L, Li Y. Foam concrete: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2020; <https://doi.org/10.1155/2020/6153602>.
- [24] Gołaszewski J, Klemczak B, Smolana A, Gołaszewska M, Cygan G, Mankel Ch, Peralta I, Röser F, Koenders EAB. Wpływ rodzaju środka pianotwórczego na właściwości pianobetonu o bardzo niskiej gęstości. *Materiały Budowlane*. 2002; <https://doi.org/10.15199/33.2022.07.08>.
- [25] Raj A, Sathyan D, Mini KM. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>.
- [26] Czarnecki L, Emmons PH. *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*. Kraków: Polski Cement; 2002.
- [27] Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A. *Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu*. Warszawa: PWN; 2016.