

Dr inż. Teresa Rucińska¹, Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki²

¹ Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

² Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Technologii Betonu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Właściwości mechaniczne betonu z kruszywem styropianowym i ich wzajemne zależności

Mechanical properties of concrete with foamed styrene aggregate

1. Wstęp

Badania dotyczące tytułowego materiału, zwanego styrobetonem rozpoczęły się w laboratoriach firmy BASF w latach 60. W pierwszej fazie badań ustalono najważniejsze jego właściwości, a następnie podjęto próbę ich normalizacji w powiązaniu z podstawową cechą tego materiału jaką jest jego gęstość. Odpowiednie proporcje składników oraz dobór gęstości objętościowej umożliwiają uzyskanie materiału i wyrobu o pożądanym parametrach technicznych, odpowiednich do przewidywanego zastosowania (1-4).

W Polsce styrobeton po raz pierwszy dopuszczono do stosowania w budownictwie Świadectwem ITB nr 301/77 z 1978 roku. Zgodnie z nim, jest to beton lekki, izolacyjny i izolacyjno-konstrukcyjny o klasie wytrzymałości: B 2.5, B 3.5 i B 5.0 oraz gęstości objętościowej $\leq 1100 \text{ kg/m}^3$ w stanie powietrzno-suchym. Styrobeton dopuszczono do wznoszenia nadziemnych ścian zewnętrznych w monolitycznych budynkach jednorodzinnych o wysokości do 2 kondygnacji. Obecnie jest on wykorzystywany do produkcji elementów murowych oraz jako izolująca cieplnie lub akustycznie warstwa na stropach drewnianych, warstwa wyrównująca pod wylewki podłogowe, wyrównanie powierzchni zabudowanych przewodów instalacji grzewczej, elektrycznej, wodociągowej, itp.

2. Charakterystyka stosowanych składników

Kruszywo (granulki) styropianowe – powstaje z porotwórczego granulatu spienianego podgrzaną parą, które po procesie spieniania ma gęstość nasypową w stanie luźnym od około 12 kg/m^3 do około 30 kg/m^3 , w zależności od średnicy spienionej granulki. Jamistość luźno usypanych granul wynosi około 45% objętości. Kruszywo styropianowe ma zamknięte pory, stąd nie jest nasiąkliwe. Jest bardzo elastyczne, a zatem wytrzymałość wytwarzanego kompozytu wynika przede wszystkim z budowy i wytrzymałości szkieletu zaprawy otaczającego granulki. Właściwości cieplne styrobetonu wynikają z wysokiej termoizolacji granulek styropianowych, które w zaprawie tworzą strukturę na wzór komórkowej.

1. Introduction

The studies on the foamed styrene aggregate have been commenced in 60-ties in BASF laboratories. The main properties of this material were examined as a first step and subsequently, the standardization of foamed styrene aggregate, based on the criterion of density, as a characteristic feature, was done. The proportions between the components and the assumed volume density allow to obtain the final product having the properties as required from the applicability point of view (1-4).

In Poland, the foamed styrene aggregate containing concrete was put into use for the first time according to the certificate issued in 1978 by the Institute of Building Technology. This material is classified as a lightweight, insulating concrete, class B 2.5, B 3.5 and B 5.0, with volume density $\leq 1100 \text{ kg/m}^3$ at dry state. The foamed styrene aggregate containing concrete was admitted for the situated on the ground outer walls in the two-storey monolithic buildings. Nowadays the foamed styrene aggregate is used in the production of wall elements, as well as the thermal or acoustic insulation layer of the wooden ceilings, leveling layer under the floors, boxing of thermal, electrical, water-supply systems.

2. Components

Foamed styrene aggregate (granulate) – is produced from the pore forming granulate foamed with hot water vapour. The bulk density at loose state is in the range from ca. 12 kg/m^3 to ca. 30 kg/m^3 , depending on the diameter of granules. The empty space ratio at loose state is ca. 45% by volume. The pores in foamed styrene aggregate are closed, that is why this material exhibits no absorbability. It is very flexible, therefore the strength of composite is affected mainly by the properties and structure of surrounding mortar matrix. Thermal properties of concrete with foamed styrene aggregate can be derived from the high insulating power of foamed styrene granules which form the "cellular" structure of concrete.

Cement – do wytwarzania styrobetonu mogą być stosowane cementy portlandzkie z dodatkami i bez dodatków jak i cement hutniczy. Przy wyborze należy jednak uwzględnić to, że zbyt duże ciepło hydratacji cementu może doprowadzić do nadmiernego wzrostu temperatury wewnątrz stwardniałego styrobetonu i w konsekwencji deformacje granul styropianowych oraz zawartych w nich porów, a także kształtu elementu.

Piasek – do wykonywania styrobetonów można stosować wszystkie naturalne i sztuczne, ciężkie i lekkie piaski. Przy gęstości betonu do 1000 kg/m³ możliwe jest zastosowanie uziarnionej mieszanki kruszyw naturalnych i sztucznych o średnicach do 16 mm.

Domieszki chemiczne – ich znaczenie w technologii styrobetonu jest podobne jak w przypadku betonu zwykłego. Poza superplastyfikatorami, poprawiającymi urabialność mieszanki, stosuje się również stabilizatory zapobiegające segregacji granulatu.

3. Warunki wykonywania i dojrzewania próbek

Do przeprowadzenia podstawowych badań wytrzymałościowych przyjęto zalecenia Instrukcji ITB Nr 194/98. Zaprojektowano mieszanki o stosunku wodno-cementowym w/c = 0,34, z cementu CEM III/A 32,5 NA oraz o zróżnicowanej zawartości granul styropianowych i naturalnego piasku. Do mieszanek stosowano domieszki chemiczne w postaci superplastyfikatora oraz stabilizatora. Zróżnicowanie proporcji granul styropianowych oraz piasku w poszczególnych mieszankach umożliwiło uzyskanie betonów o różnej gęstości objętościowej. Badane próbki betonu zagęszczano w formach metodą sztychowania, a następnie, z uwagi na wydłużony czas wiązania cementu hutniczego, przechowywano w formach przez 3 dni. Do czasu badania próbki twardniały w temperaturze 20 ± 2°C pod przykryciem z folii. Wstępne badania styrobetonów ograniczono do oznaczenia ich gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach twardnienia. Na tej podstawie do dalszych badań wytypowano 3 mieszanki styrobetonu (S1, S2

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD BADANYCH STYROBETONÓW

COMPOSITION OF CONCRETES

Składniki / Components	Beton / Sample		
	S1	S2	S3
Granulki styropianowe $\varnothing \leq 3\text{mm}$ wraz z jamami międzyziarnowymi, Foamed styrene aggregate granules $\varnothing \leq 3\text{mm}$ together with cavities between them, dm ³ /m ³	900	800	650
Cement hutniczy / Metallurgical cement CEM III/A 32,5NA, kg/m ³	450		
Piasek, Sand, kg/m ³	502	650	880
Woda, Water, dm ³ /m ³	153		
Stabilizator, Stabilizer, kg/m ³	1,8		
Superplastyfikator, Superplasticizer, kg/m ³	2,25	2,25	4.5
w/c	0,34		
Gęstość objętościowa styrobetonu po 28 dniach twardnienia w stanie powietrzno-suchym, Density of concrete with foamed styrene aggregate after 28-day hardening at dry state, kg/m ³	1080	1220	1450
Odmiana gęstości objętościowej w stanie suchym zgodnie z PN-EN 206-1:2003, Change of density according to PN-EN 206-1:2003, kg/m ³	1.2	1.4	1.6

Cement - the concrete with foamed styrene aggregate can be produced using Portland cement, blended Portland cement or slag cement. The selection of cement must take into account the heat of hydration; intensive heat evolution can result in too high temperature inside the concrete and, as a consequence, in deformation of foamed styrene aggregate granules, as well as the pores inside them. Finally, the shape of concrete element can be affected.

Sand - the concrete with foamed styrene aggregate can be produced using all types of sand, that is naturally occurred, artificial, heavy and lightweight ones. At assumed density of concrete not exceeding 1000 kg/m³ it is possible to use a mixture of natural and artificial aggregates with grains less than 16 mm.

Chemical admixtures - their role in the concrete with foamed styrene aggregate is similar as in normal concrete. Beside of the superplasticizers modifying the workability of mixture, the stabilizers used to prevent the segregation are added.

3. Preparation and curing of concrete mixtures

The strength measurements were performed according to the Institute of Building Technology directive no 194/98. The mixtures were prepared at w/c = 0.34 with cement CEM III/A 32.5 NA and different foamed styrene aggregate granules, as well as natural sand content. The superplasticizing and stabilizing admixtures were used. Different proportions between the foamed styrene aggregate granules and natural sand resulted in the production of concrete with varied bulk density. The concrete samples were compacted in the moulds by rodding and subsequently, because of the slow slag cement setting, stored in the moulds during 3 days. The samples were then matured at temperature 20 ± 2°C under the polyethylene foil cover. The measurements of density and compressive strength after 28-day hardening were carried out as preliminary tests. Basing on these results the 3 concrete mixtures with foamed styrene aggregate (S1, S2 and S3 - Table

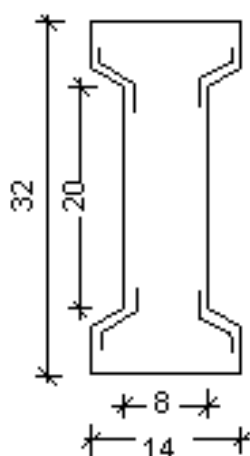
i S3 – tablica 1), które charakteryzowała stosunkowo niska gęstość i jednocześnie najwyższa wytrzymałość.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowo przekrój próbki styrobetonu S2 po zniszczeniu, ukazujący jego makrostrukturę.

Zakres badań obejmował:

- oznaczenie wytrzymałości na ściskanie na próbkach sześciennych 15 x 15 x 15 cm oraz na próbkach walcowych o średnicy 15 cm i wysokości 30 cm;
- oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie na próbkach o przewężonym przekroju 8 x 8 cm (rys. 2);
- oznaczenie modułu sprężystości na próbkach walcowych o średnicy 15 cm i wysokości 30 cm.

Średnie wartości poszczególnych właściwości betonu wyznaczano na podstawie badań co najmniej 3 próbek.



Rys. 2. Kształt i wymiary próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie

Fig. 2. Shape and dimensions of samples subjected to the direct flexural strength tests

4. Wyniki badań

Średnie wartości wyników badań analizowanych betonów po 28 dniach twardnienia zestawiono w tablicy 2.

5. Związki między właściwościami mechanicznymi styrobetonu

5.1. Wytrzymałość na ściskanie i gęstość

Na rysunku 3 przedstawiono określoną doświadczalnie zależność wytrzymałości na ściskanie styrobetonu od jego gęstości objętościowej w stanie powietrzno-suchym. Jak widać zależność ta ma charakter liniowy.



Rys. 1. Przełam próbki styrobetonowej

Fig. 1. Fractured surface of concrete with foamed styrene aggregate

1), of relatively low density and highest strength were selected to the further investigations.

In Fig. 1 the structure of fractured surface of concrete sample S2 after the compressive strength determination is shown.

The following investigations were carried out:

- compressive strength determination on the 15 x 15 x 15 cm concrete cubes and on the cylindrical samples (diameter - 15 cm; height - 30 cm);
- flexural strength on the samples 8 x 8 cm with narrowed cross section (Fig. 2);
- determination of the modulus of elasticity on the cylindrical samples (diameter - 15 cm; height - 30 cm).

The mean values of parameters for particular concrete mixtures were calculated basing on at least 3 measurements.

4. Results

Mean values of results for particular series of 28 days matured concrete samples are given in Table 2.

5. Relationship between mechanical properties of concrete with foamed styrene aggregate

5.1. Compressive strength and density

In Fig. 3 the relationship between the experimentally determined compressive strength of concrete with foamed styrene aggregate and bulk density at dry state is plotted. As one can see this dependence is of linear character.

5.2. Compressive strength determined on the specimens of different shape

The compressive strength determined on the 15 x 15 x 15 cm concrete cubes $f_{cm,cube}$ vs. the compressive strength measured on the cylindrical samples $f_{cm,cyl}$ is shown in Fig. 4. This relationship is curvilinear. The effect of shape diminishes with increasing compressive strength.

Średnie wartości badanych właściwości Mean values of particular features	Beton / Sample		
	S1	S2	S3
Gęstość objętościowa w stanie powietrzno-suchym, kg/m ³ i przypisana klasa gęstości wg PN-EN 206-1:200 Density at dry state, kg/m ³ and class of density according to PN-EN 206-1:200	1080 D1.2	1220 D1.4	1450 D1.6
Wytrzymałość na ściskanie, MPa / Compressive strength, MPa: - badania na próbkach kostkowych 15 x 15 x 15 cm, $f_{cm,cube}$ - determination on 15 x 15 x 15 cm concrete cubes, $f_{cm,cube}$ - badania na próbkach walcowych 15/30 cm, $f_{cm,cyl}$ - on cylindrical samples 15/30 cm, $f_{cm,cyl}$	8,3 6,5	12,9 9,5	18,8 16,9
Wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie f_{tm} , Direct flexural strength f_{tm} , MPa	1,20	1,75	2,20
Moduł sprężystości E / Modulus of elasticity E , MPa	5140	10620	14250

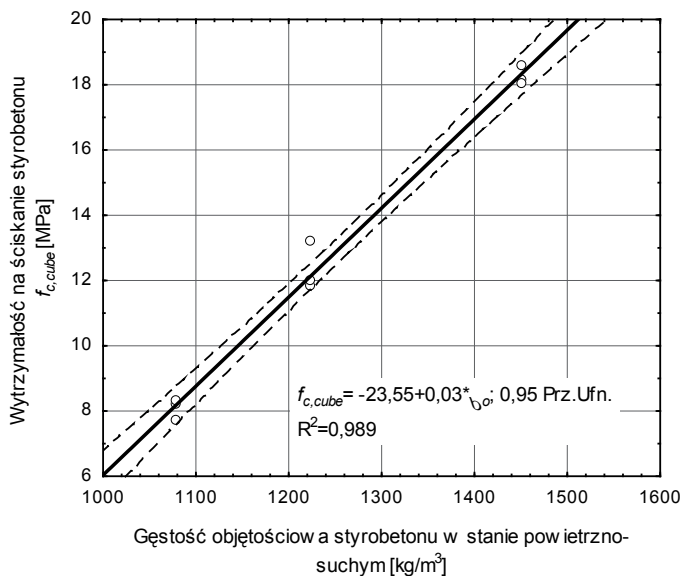
Basing on the compressive strength class notation according to the PN-EN 206-1 standard, in which for every class the $f_{c,cyl,150/300\text{ mm}}$ and $f_{c,cube\ 150\text{ mm}}$ the characteristic (warranted) values are given, one can assume that between the strength values produced for given concrete composition on the specimens of different shape the following dependence occurs:

for lightweight concrete (BL):

$$f_{c,cube} \approx 1,125 f_{c,cyl} \quad [1]$$

for normal concrete (BZ):

$$f_{c,cube} \approx 1,25 f_{c,cyl} \quad [2]$$



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie styrobetonu w funkcji gęstości objętościowej w stanie powietrzno-suchym

Fig. 3. Compressive strength of concrete with foamed styrene aggregate vs. bulk density at dry state

5.2. Wytrzymałość na ściskanie określana na próbkach o różnych kształtach

Zależność wytrzymałości kostkowej na ściskanie $f_{cm,cube}$ od wytrzymałości walcowej $f_{cm,cyl}$ przedstawia rysunek 4. Zależność ta ma charakter krzywoliniowy. W miarę wzrastającej wytrzymałości na ściskanie wpływ kształtu próbek maleje.

Ze stosowanych w PN-EN 206-1 zapisów symboli klas wytrzymałości, w których dla danej klasy podawane są charakterystyczne (gwarantowane) wartości $f_{c,cyl,150/300\text{ mm}}$ i $f_{c,cube\ 150\text{ mm}}$, można przyjąć, że między wartościami wytrzymałości określanymi na próbkach obydwu kształtów istnieje związek:

w odniesieniu do betonów lekkich (BL):

In Fig. 5, these dependencies for concrete with foamed styrene aggregate are plotted together with the experimental data illustrated in Fig. 4.

The results indicate that in case of concrete with foamed styrene aggregate this relationship is not of linear character but it is better expressed by a square polynomial. It is worthwhile to find that this relationship becomes very close to the standard one, for lightweight concrete, as the compressive strength increases.

5.3. Compressive strength and direct flexural strength

In Figs 6 and 7 the direct flexural strength of concrete with foamed styrene aggregate f_{tm} vs. their compressive strength determined on concrete cubes and cylinders is visualized.

According to the Eurocode 2-1 and PN-B-03264:2002 standard in case of normal concrete the dependence between the flexural and compressive strength is determined by the Raphael's equation:

$$f_{tm} = \beta \cdot \sqrt[3]{f_{cm}^2} = 0,3 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad [3]$$

while according to the PN-B-03263:2002 standard, for the lightweight concrete the effect of bulk density is additionally taken into account:

$$f_{tm} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}^2} \cdot \left(0,40 + 0,6 \cdot \frac{\rho_o}{2200} \right) \quad [4]$$

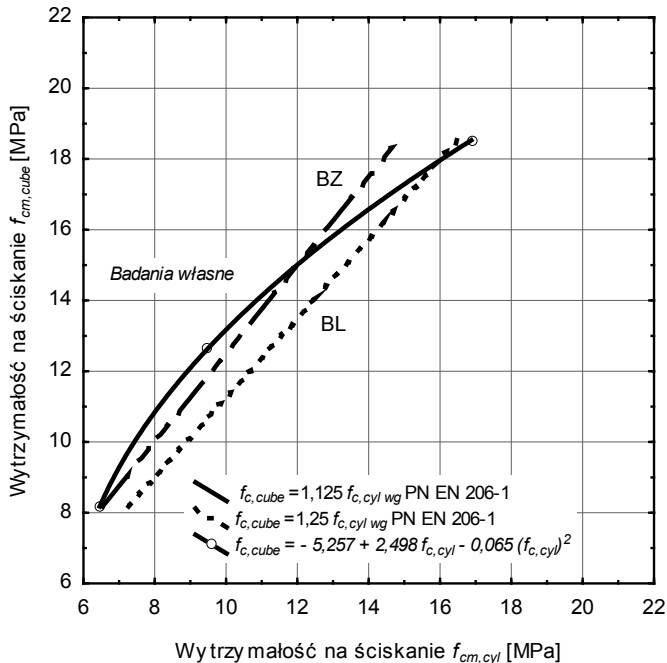
In Fig. 8 the dependencies given above are plotted together with the relationship found for the concrete with foamed styrene aggregate. Basing on the Eurocode 2-1 and PN-B-03264:2002 standard directives, the dependence between the flexural and characteristic compressive strength was estimated by the Gauss-Newton linear method, applying the equation $f_{tm} = a \cdot f_{cm}^b$. Finally, basing upon the

$$f_{c,cube} \approx 1,125 f_{c,cyl} \quad [1]$$

w odniesieniu do betonów zwykłych (BZ):

$$f_{c,cube} \approx 1,25 f_{c,cyl} \quad [2]$$

Na rysunku 5, na tle tych zależności, przedstawiono związek ustalony dla styrobetonu (patrz rysunek 4).



Rys. 5. Zależność kostkowej wytrzymałości na ściskanie styrobetonów $f_{cm,cube}$ od wytrzymałości walcowej $f_{cm,cyl}$ na tle orientacyjnych zależności przyjętych w PN-EN-206-1

Fig. 5. The compressive strength determined on concrete cubes $f_{cm,cube}$ vs. the compressive strength determined on cylindrical samples $f_{cm,cyl}$ together with the plots produced basing on the PN-EN-206-1 standard calculations

Wyniki badań wskazują, że w przypadku styrobetonu zależność ta nie jest liniowa. Związek ten lepiej opisuje krzywa wyrażona wielomianem drugiego stopnia. Warto zauważyć, iż miarę wzrostu wytrzymałości styrobetonu zależność ta zbliżona jest do normalowej - określonej dla betonów lekkich.

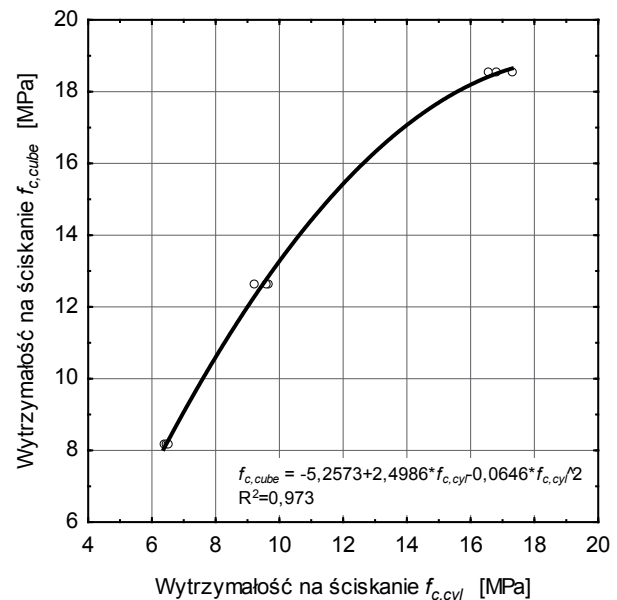
5.3. Wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednio

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono zależności wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednio f_{tm} styrobetonów od ich wytrzymałości na ściskanie określanej na próbkach kostkowych i walcowych.

Według Eurokodu 2-1 oraz PN-B-03264:2002 w przypadku betonów zwykłych związek między wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie określa znana zależność Raphael'a:

$$f_{tm} = \beta \cdot \sqrt[3]{f_{cm}^2} = 0,3 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad [3]$$

natomiast wg PN-B-03263:2002 w przypadku betonów lekkich dodatkowo uwzględniono wpływ ich gęstości objętościowej:



Rys. 4. Zależność wytrzymałości kostkowej $f_{c,cube}$ od wytrzymałości walcowej $f_{c,cyl}$

Fig. 4. The compressive strength determined on concrete cubes $f_{c,cube}$ vs. the compressive strength determined on cylindrical samples $f_{c,cyl}$

authors' experimental data the equation in the following form was produced: $f_{tm} = 0,46 \times f_{cm}^{0,56}$.

The authors' investigations of concrete with foamed styrene aggregate indicate that the brittleness ratio given as f_{tm}/f_{cm} reveals the following values, depending on the bulk density class: D1.2 – 0.15; D1.4 – 0.14 and D1.6 – 0.12 respectively. As one can see these values decrease with higher compressive strength. The normal concretes exhibit the brittleness ratio about 0.10, while the high strength concretes - even 0.05 (5).

5.4. Compressive strength and modulus of elasticity

In Fig. 9 the mean values of modulus of elasticity E vs. compressive strength determined on concrete cubes $f_{cm,cube}$ is plotted. As one can see the concretes with foamed styrene aggregate show clearly lower modulus of elasticity, as compared with the normal concrete of similar class and as in case of normal concrete this dependence is linear.

6. Summary

The composite with relatively low bulk density and high strength class can be produced using the materials commonly available, such as: slag cement, sand, foamed styrene aggregate granulate, as well as superplasticizers and stabilizers. Therefore the concrete with foamed styrene aggregate can be taken into account in civil engineering not only as an insulating material but also as both a structural and insulating material. In case of the application of the concrete with foamed styrene aggregate for structural and insulating purposes, the better understanding of its mechanical properties is required. The studies on the concrete with foamed

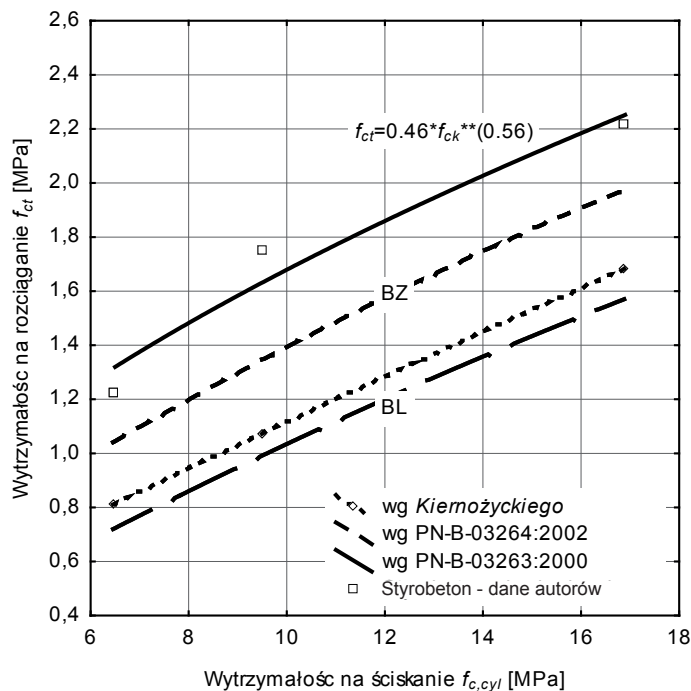
$$f_{tm} = 0.3 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}^2} \cdot \left(0.40 + 0.6 \cdot \frac{\rho_o}{2200} \right) \quad [4]$$

Na rysunku 8 pokazano graficzną postać powyższych zależności, a na ich tle relację określoną dla styrobetonu podczas badań własnych. Odnosząc się do ustaleń podanych w Eurokodzie 2-1 oraz w normie PN-B-03264:2002, zależność określającą wytrzymałość na rozciąganie styrobetonów w funkcji wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie poszukiwano metodą estymacji nieliniowej *Gaussa-Newtona*, stosując równanie $f_{tm} = a \times f_{cm}^b$. W wyniku przeprowadzonych analiz, na podstawie wyników badań ostatecznie uzyskano postać równania $f_{tm} = 0,46 \times f_{cm}^{0,56}$.

Wyniki badań własnych styrobetonów wykazują ponadto, że współczynnik kruchości tego materiału wyrażony ilorazem f_{tm}/f_{cm} , przyjmuje wartości odpowiednio w klasie gęstości: D1.2 – 0,15, D1.4 – 0,14 i D1.6 – 0,12. Jak widać maleje on wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie. Betony zwykle charakteryzuje współczynnik kruchości zwykle ok. 0,10 a betony wysokiej wytrzymałości nawet 0,05 (5).

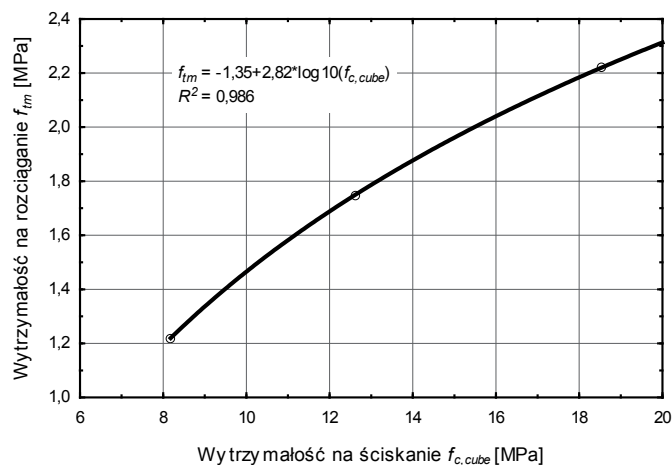
5.4. Wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości

Na rysunku 9 pokazano zależność średniej wartości modułu sprężystości E od kostkowej wytrzymałości na ściskanie $f_{cm,cube}$. Jak widać, badane styrobetony charakteryzują wyraźnie mniejsze moduły sprężystości w porównaniu z betonem zwykłym porównywalnych klas. Podobnie jednak jak w przypadku betonów zwykłych związek ten nie jest liniowy.



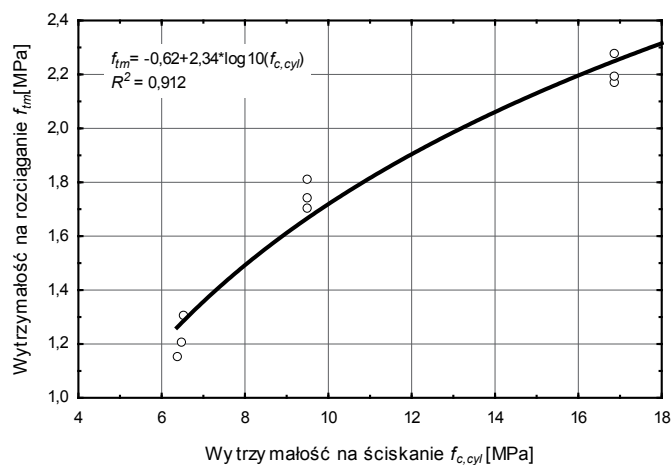
Rys. 8. Zależność wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie f_{tm} styrobetonów od wytrzymałości walcowej na ściskanie $f_{cm,cyl}$ na tle zależności przyjętych w PN-B-03263:2000 i PN-B-03264:2002

Fig. 8. The direct flexural strength f_{tm} vs. compressive strength determined on concrete cylinders $f_{c,cyl}$ together with the plots from the calculations based on the PN-B-03263:2000 and PN-B-03264:2002 standards



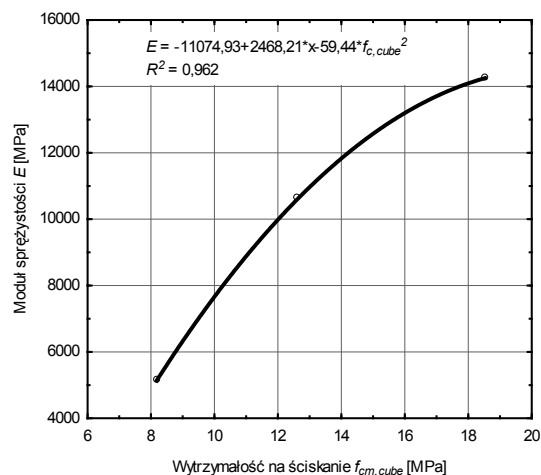
Rys. 6. Zależność wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie f_{tm} od kostkowej wytrzymałości na ściskanie $f_{c,cube}$

Fig. 6. The direct flexural strength f_{tm} vs. compressive strength determined on concrete cubes $f_{c,cube}$



Rys. 7. Zależność wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie f_{tm} od walcowej wytrzymałości na ściskanie $f_{c,cyl}$

Fig. 7. The direct flexural strength f_{tm} vs. compressive strength determined on concrete cylinders $f_{c,cyl}$



Rys. 9. Zależność modułu sprężystości E od wytrzymałości kostkowej na ściskanie $f_{cm,cube}$

Fig. 9. Modulus of elasticity E vs. compressive strength determined on concrete cubes $f_{cm,cube}$

6. Podsumowanie

Stosując ogólnie dostępne materiały: cement hutniczy, piasek, granulki styropianowe oraz superplastyfikatory i stabilizatory, uzyskać można kompozyt o stosunkowo niskiej klasie gęstości oraz stosunkowo wysokiej klasie wytrzymałości. Wskazuje to na możliwości stosowania styrobetonów w budownictwie, jako materiału o właściwościach nie tylko izolacyjnych, ale również konstrukcyjno-izolacyjnych. Stosowanie styrobetonu o właściwościach konstrukcyjno-izolacyjnych wymaga lepszego poznania jego właściwości mechanicznych. Wyniki przeprowadzonych badań styrobetonów pozwalają na stwierdzenie, że – jak można się było spodziewać – związki między ich właściwościami mechanicznymi są inne niż znane z literatury określone podczas badań betonów zwykłych. Styrobeton charakteryzuje się nieco mniejszą kruchością niż beton zwykły. Wartość stosunku f_{tr}/f_{cm} zawiera się w granicach od 0,12 do 0,15 i podobnie jak w przypadku betonów zwykłych, maleje w miarę wzrostu wytrzymałości na ściskanie. Analizowane tu styrobetony posiadają wyraźnie mniejsze moduły sprężystości w porównaniu z betonem zwykłym porównywalnych klas.

styrene aggregate allow, as one could expect, to find that the dependencies between some parameters characterizing the mechanical properties differ from those for the normal concretes. The concrete with foamed styrene aggregate shows lower brittleness. The brittleness ratio f_{tr}/f_{cm} is in the range from 0,12 to 0,15 and, as in case of normal concretes, it decreases with higher compressive strength. The concretes with foamed styrene aggregate analyzed in this work exhibit clearly lower modulus of elasticity, as compared with the normal concrete of similar class.

Literatura / References

1. M. Bołtryk, D. Dworzańczyk, Lelusz M.: Kompozyt betonowy z wypełniaczem styropianowym. „Warstwy” nr 3 (2000).
2. Gunther Hund: Ein ökologischer und energiesparender Baustoff. Eco-Therm. Dortmund 1993.
3. F. Hohwiller: Leichtbeton aus EPS – Recyclate eine wirtschaftliche Alternative Teil 1 und 2 – JSSVE 9 (1992).
4. M. Muravljov, D. Jevtič, V. Radosavljevič: Primena EPS betona armiranog polipropilenskim vlaknima kao materijala za proizvodnju montažnih elemenata. IX Kongres Saveza Društava Gradevinskih Konstruktera Jugoslavije. Cavtat, kwiecień 1991.
5. Budownictwo ogólne. Materiały i wyroby budowlane. Tom 1. Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. dr hab. inż. B. Stefańczyka, Arkady 2005.