

## Wpływ wybranych kruszyw na właściwości betonu wysokowartościowego

### The effect of selected aggregates on the properties of high performance concrete

#### 1. Wprowadzenie

Właściwości kruszyw mają duży wpływ na klasę produkowanego betonu i z tego względu w przypadku betonów o dużej wytrzymałości i trwałości stosuje się z reguły granitowe i bazaltowe kruszywa łamane. Jak wiadomo wpływ kruszywa na właściwości betonu jest związany nie tylko z właściwościami tego pierwszego, lecz także w pewnym stopniu z mikrostrukturą warstwy przejściowej i siłami adhezji łączącymi matrycę cementową z ziarnami kruszywa. Warstwa przejściowa kruszywo-zaczyn ma bowiem duży wpływ na przekazywanie naprężeń i tym samym na właściwości mechaniczne betonu pod obciążeniem. Aitcin (1) stwierdza, że w przypadku dużego stosunku w/c mikrostruktura zaczynu cementowego jest porowata, a strefa przejściowa ma znaczną grubość. W takim betonie stopień przekazywania naprężeń pomiędzy zaczynem a grubym kruszywem jest ograniczony, a właściwości mechaniczne grubego kruszywa mają mały wpływ na właściwości mechaniczne betonu (1).

Warstwa przejściowa w BWW, dzięki małemu stosunkowi w/c, ma mniejszą grubość i porowatość oraz zdecydowanie lepsze właściwości niż w betonach zwykłych. Dzięki zwiększonej adhezji matrycy cementowej do ziaren grubego kruszywa w BWW w większym stopniu bierze ono udział w przenoszeniu obciążeń, korzystnie wpływając na właściwości tych betonów. Grzeszczyk i Matuszek-Chmurowska (2, 3) wykazały, na podstawie badań BWW z łamanym kruszywem bazaltowym i naturalnym kwarcytowym, że na przyjmowanie naprężeń oraz odkształceń w strefie przejściowej ma wpływ adhezja (przyczepność) zaczynu do kruszywa, związana z szorstkością powierzchni jego ziaren. Ponadto wysuwane są hipotezy, że na mikrostrukturę warstwy przejściowej, a poprzez to na przyczepność zaczynu do kruszywa, może także wpływać skład mineralny kruszywa, jak to ma miejsce w przypadku kruszyw węglanowych (4 – 7).

W przeciwieństwie do wytrzymałości na ściskanie, która może w pewnych przypadkach dotyczyć betonu z mikrospekkaniami, moduł sprężystości jest związany ze stanem niezarysowanym, gdy odkształceniu, wprawdzie niejednorodnemu, ulega cała objętość

#### 1. Introduction

The aggregate properties have the significant influence on the produced concrete class and it is the reason that in the case of high performance concrete the granite and basalt aggregates are usually applied. However, the effect of aggregate on the properties of concrete is connected not only with the quality of the aggregate itself but also, to a certain degree, with the microstructure of the interfacial transition zone [ITZ] and the adhesion, linking cement paste to the aggregate grains. ITZ has a significant influence on the transmission of the stresses, which directly affects the mechanical properties of concrete under load.

Aitcin (1) has stated that in the case of high w/c ratio the cement matrix is porous and has important thickness. In such concrete the degree of stress transmission from cement matrix to coarse aggregate is limited and the strength of coarse aggregate have low influence on the mechanical properties of concrete (1).

Due to the low w/c ratio the ITZ in HPC has much lower porosity as well as the definitely better properties that in ordinary concrete. The increased adhesion of cement paste to the grains of coarse aggregate in HPC causes that it takes part in load transfer to a greater extend, which consequently affects the properties of this concrete. Grzeszczyk and Matuszek-Chmurowska (2, 3) have found that in HPC of basalt and quartzite gravel aggregates the adhesion of hardened cement paste to aggregate grains is associated with surface roughness of these grains and plays an important role in stress and strain transmission from cement paste. It should be noted, however, that the microstructure of ITZ and thus of paste-aggregate bond may also be affected by the mineral composition of the aggregate, which is well known in the case of carbonates (4-7).

On the contrary of compressive strength of concrete, which in some cases can concern concrete with microcracks, the modulus of elasticity is related to the non-cracked state, when the strains, although inhomogeneous, is embracing the entire volume of concrete, including the aggregates. Therefore the effect of aggregate

betonu, włącznie z kruszywem. Dlatego też wpływ właściwości kruszywa na beton, zaznacza się wyraźniej w wynikach badań odkształcalności, w tym modułu sprężystości (8, 9).

Bardzo dobrą właściwością do oceny jakości kruszywa grubego, a także oceny zakresu jego stosowania, jest wytrzymałość na miażdżenie. Jedynie za jej pomocą można także oceniać naturalne kruszywa żywowe, składające się z ziaren o zmiennym składzie petrograficznym i różnych właściwościach. Ta podstawowa właściwość mechaniczna jest związana z wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie oraz z modułem sprężystości kruszywa żywowego, a także z kształtem ziaren oraz zawartością ziaren słabych. Jak wykazują wyniki badań, wytrzymałość na miażdżenie kruszywa może wpływać nie tylko na wytrzymałość betonu, ale również na jego odkształcalność, w tym również na moduł sprężystości (10). Także w normie PN-86/B-06712 "Kruszywa mineralne do betonu", wytrzymałość na miażdżenie wykorzystano jako główne kryterium do oceny jakości kruszywa grubego, łącząc różne właściwości ze wskaźnikiem rozkruszenia.

## 2. Materiały i metody

Badano cztery kruszywa łamane o frakcjach 2-8 i 8-16 mm. Kruszywa pochodziły z następujących złóż:

granit – kamieniołom Graniczna, Masyw Strzegom - Sobótka;

bazalt – kamieniołom Gracze, dolina Nysy Kłodzkiej;

dolomit dewoński z kamieniołomu Laskowa Góra, Góry Świętokrzyskie;

piaskowiec kwarcytowy, częściowo zmetamorfizowany (14), z kamieniołomu Wiśniówka, Góry Świętokrzyskie.

Równocześnie pobrano do badań duże okruchy skał z eksploatowanych ścian w tych kamieniołomach, z których pochodziły stosowane w badaniach kruszywa łamane.

Do oznaczenia składu mineralnego pobranych próbek skał zastosowano rentgenografię oraz zbadano ich podstawowe właściwości fizyczne. Wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości badano na próbkach o wymiarach 50x50x100 mm, a wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na kostkach 50x50x50 mm. Moduł sprężystości oznaczano, stosując tensometryczne pomiary odkształceń. Pomiary wytrzymałości przeprowadzono zawsze na sześciu próbkach.

W badaniach poszczególnych frakcji kruszywa oznaczono wskaźnik rozkruszenia (charakteryzujący wytrzymałość na miażdżenie), nasiąkliwość, zawartość ziaren nieforemnych i pyłów mineralnych, a także gęstość objętościową i właściwą, na podstawie których obliczono porowatość całkowitą.

Z każdego kruszywa grubego frakcji 2/16 mm wykonano betony, przyjmując jako zasadę zachowanie stałej objętości tego kruszywa. Stosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R, a stosunek w/c wynosił 0,28. Punkt piaskowy stosu okruszowego nie zmieniał się również i wynosił objętościowo 37%. W celu utrzymania stałej

properties on concrete is stronger marked in the strain measurements, including the modulus of elasticity (8, 9).

A good property for the coarse aggregate evaluation as well of defining the range of its application is the crushing resistance. Only by its measurement the gravel composed of the grains of different rocks and properties, can be evaluated. This basic mechanical property of aggregate is linked with the tensile and compressive strength and with the modulus of elasticity of gravel as well as with the shape of grains and the content of weak grains. As it is shown in the tests results, the crushing resistance of aggregate can not only influence on the concrete strength but also on its deformability, including the modulus of elasticity (10). Also in standard (11), the resistance of aggregate to crushing was used as the main criterion for evaluating the quality of coarse aggregate, linking different properties with the crushing coefficient.

## 2. Materials and methods

The following four crushed aggregates, in two fractions 2-8 and 8-16 mm were tested:

granite – Graniczna quarry, Strzegom Massif - Sobótka;

basalt - Gracze quarry, valley of Nysa Kłodzka;

dolomite - Devonian, Laskowa Góra quarry, Świętokrzyskie Mountains;

quartzite sandstone [quartzite partly metamorphosed (14)] - Wiśniówka quarry, Świętokrzyskie Mountains.

Simultaneously the big rock samples was taken from quarries in which crushed aggregates were produced. XRD was used for examination of the mineral composition of the rock samples. Some physical properties of the rock samples were examined. The rectangular prisms of dimensions of 50x50x100 mm were used for the compressive strength as well as elasticity modulus measurements and cubes of 50x50x50 mm for testing the splitting tensile strength. For strength measurements always 6 samples were used. The modulus of elasticity was tested using strain-gauge measurements.

For each fraction of aggregate, the crushing coefficient: crushing ratio, water absorption, content of irregular grains and mineral dust, as well as bulk and specific density, based on which the total porosity was calculated, were determined.

Four concretes were produced from coarse aggregate (2-16 mm) of each type, retaining the same volume of this aggregate. Portland cement CEM I 42.5 R was used and w/c ratio was 0.28. The sand volume content in aggregate was always 37%. In order to maintain constant consistency of concrete mixes, the polycarboxylate admixture was used. The composition of the concrete mixes is shown in Table 1.

The concrete compressive strength and concrete modulus of elasticity, were tested on cylinders of the dimensions 150x300 mm. The cubes 150x150x150 mm were cast for splitting tensile strength examination.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH, kg/m<sup>3</sup>

COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES

Składniki betonów Components of concretes	Rodzaj kruszywa grubego / Type of coarse aggregate			
	bazalt / basalt	granit / granite	dolomit / dolomite	kwarcyt / quartzite
Cement / Cement, kg/m <sup>3</sup>	479			
Piasek / Sand, kg/m <sup>3</sup>	699			
Kruszywo grube / Coarse aggregate, kg/m <sup>3</sup>	1258	1151	1229	1160
Woda* / Water*, kg/m <sup>3</sup>	128			
Superplastyfikator / Superplasticizer, kg/m <sup>3</sup>	10,5	10,5	10,5	10,5

\*(w + w<sub>sp</sub>)/c = 0,28

konsystencji mieszanek betonowych stosowano superplastyfikator polikarboksyłanowy. Składy mieszanek betonowych podano w tablicy 1.

Wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości betonu oznaczano na próbkach walcowych 150x300 mm, a do badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu kostki o długości krawędzi 150 mm.

### 3. Wyniki badań próbek skał i kruszyw oraz ich omówienie

#### 3.1. Wyniki badań próbek skał

Bazalt składał się głównie z zasadowych plagioklazów zbliżonych do anortytu oraz z piroksenów reprezentowanych przez augit i zawierał niewielkie ilości oliwinu. Ponadto w próbkach bazaltu występował biotyt, będący głównym składnikiem miki.

Natomiast w granicie dominującym minerałem był kwarc, a obok niego dwa skalenie - ortoklaz i albit.

Tablica 2 / Table 2

ŚREDNIE WYNIKI ORAZ WSKAŹNIKI ZMIENNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE I NA ROZCIĄGANIE ORAZ MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI PRÓBEK SKAŁ

MEAN RESULTS AND COEFFICIENTS OF VARIATION OF COMPRESSIVE STRENGTH, TENSILE STRENGTH AND THE MODULUS OF ELASTICITY OF THE ROCK SAMPLES

Właściwość / Property	Rodzaj skały / Type of rock			
	bazalt / basalt	granit / granite	dolomit / dolomite	kwarcyt / quartzite
wytrzymałość na ściskanie f <sub>cm</sub> <sup>sk</sup> , MPa (wskaźnik zmienności, %) compressive strength f <sub>cm</sub> <sup>sk</sup> , MPa (coefficient of variation, %)	215,8 (8,4)	106,8 (7,9)	103,1 (7,2)	110,9 (10,2)
wytrzymałość na rozciąganie f <sub>tm</sub> <sup>sk</sup> , MPa (wskaźnik zmienności, %) tensile strength f <sub>tm</sub> <sup>sk</sup> , MPa (coefficient of variation, %)	12,50 (11,7)	5,24 (14,5)	10,80 (13,9)	12,04 (10,0)
moduł sprężystości skał E <sub>m</sub> <sup>sk</sup> , GPa (wskaźnik zmienności, %) modulus of elasticity E <sub>m</sub> <sup>sk</sup> , GPa (coefficient of variation, %)	100,8 (2,8)	28,0 (16,4)	74,2 (14,6)	63,8 (12,1)

### 3. The test results and discussion

#### 3.1. Test results of rock samples

Basalt was composed of basic plagioclases, close to anorthite, and of pyroxenes in the form of augite and contained a very low quantity of olivine. In granite the dominant mineral was quartz, and also two feldspars - orthoclase and albite. On the basis of X-ray patterns of dolomite from Laskowa Góra dolomite, and beside this mineral, only traces of calcite and quartz was found. However, quartzite sandstone contains only quartz. On the X-ray patterns the peaks of other minerals were not found.

Mean values and coefficients of variation of strength and modulus of elasticity of rock samples were shown in Table 2. Due to relatively high coefficients of variation (higher than 10%), additionally the analysis of variance and test of the least significant difference (LSD) between mean values taking, into account the dispersion of results were calculated.

The compressive strength f<sub>cm</sub><sup>sk</sup> of basalt (215.8 MPa) was definitely the highest and differed significantly from other results (Table

Na podstawie dyfraktogramów stwierdzono, że w dolomicie z Łaskowej Góry występują, poza tym minerałem, nieznaczne zawartości kalcytu i kwarcu. Natomiast piaskowiec kwarcytowy zawiera wyłącznie kwarc. Refleksów pochodzących od innych minerałów na rentgenogramach nie stwierdzono.

Wartości średnie i wskaźniki zmienności wytrzymałości i modułu sprężystości próbek skał zestawiono w tablicy 2. Ze względu na stosunkowo duże wskaźniki zmienności (większe od 10%), dodatkowo obliczono wariancję i najmniejsze istotne różnice (NIR), pomiędzy wartościami średnimi, przy uwzględnieniu rozrzutu wyników.

Największą wytrzymałość na ściskanie miał bazalt (215,8 MPa) i zgodnie z danymi statystycznymi (test NIR) różniła się ona istotnie od pozostałych wyników (tablica 2). Wytrzymałości na ściskanie granitu, dolomitu i kwarcytu wynosiły od 103,1 do 110,9 MPa i nie różniły się istotnie. Najmniejszą wytrzymałość na rozciąganie [5,24 MPa] miał granit. Była ona dwukrotnie mniejsza niż wytrzymałość bazaltu. Zgodnie z testami NIR w przypadku wytrzymałości na rozciąganie istotna różnica nie występowała tylko pomiędzy bazaltem a kwarcytem.

Moduł sprężystości próbek skał był bardzo zróżnicowany. Statystycznie istotne różnice, potwierdzone przez NIR, dotyczyły modułów wszystkich próbek skał. Jak należało przypuszczać, największy moduł sprężystości miał bazalt – jego średnia wartość wynosiła 100,8 GPa. Duży moduł sprężystości miał także dolomit – średnia wartość wynosiła 74,2 GPa, a niewiele mniejszą miał kwarcyt, 63,8 GPa. Moduł sprężystości granitu był najmniejszy i wynosił tylko 28,0 GPa, czyli ponad trzykrotnie mniej niż bazaltu i dolomitu. Uzyskane wyniki były zgodne z podanymi przez Pinińską (12). W tablicy 3 zestawiono wyniki badań właściwości fizycznych próbek skał.

### 3.2. Wyniki badań kruszyw

Podane w tablicy 4 wyniki badań wykazują, że największa różnica dotyczy wskaźnika rozkruszenia  $X_{rm}$  kruszywa granitowego, wynoszącego 15%, bowiem wskaźniki pozostałych kruszyw są znacznie mniejsze i mieszczą się w przedziale od 4,0% do 7,0%.

2). The compressive strength of granite, dolomite and quartzite ranged from 103.1 to 110.9 MPa and did not differ significantly. The lowest tensile strength had granite: 5.24 MPa. It was twice lower than the strength of basalt. According to the LSD in the case of tensile strength no significant difference between basalt and quartzite was found.

The modulus of elasticity of the rock samples was extremely diverse. Statistically significant differences proved by LSD between the modulus of all rock samples have occurred. As it should be assumed, the highest modulus of elasticity only in the case of basalt was found; its mean value was 100.8 GPa. High modulus of elasticity had dolomite – the mean value was 74.2 GPa, and not much lower quartzite - 63.8 GPa. The modulus of granite was definitely the lowest, equal to 28.0 GPa. That is three times less than the modulus of basalt. The determined results are consistent with the data of Pinińska (12). The physical properties of the rock samples are presented in Table 3.

### 3.2. Test results of aggregates

Among the test results presented in Table 4, the highest difference occurs between the crushing index  $X_{m}$  of granite aggregate, which amounts to 15%, while the indexes of other aggregates, are much lower, in the range from 4.0% to 7.0%. All aggregates are of the highest quality within their petrographic class (11). The exception is granite which, due to its low resistance to crushing, should be classified to the lowest class 20. The results of water absorption, content of irregular grains and mineral dust, only in the case of finer fractions of basalt (at  $n_w$ ) and quartzite (at  $z_p$ ) the standardized limit value was exceeded. In comparison with water absorption of the rock samples, the results of aggregates were higher. Two basic factors should to be considered. Aggregate is a crushed material, with a higher specific surface area compared to rock samples thus, more surface retained water, as confirmed by the test of fine and coarse fraction (Table 4). Additionally, the pores saturation with water in fine aggregate grains is of higher possibility particularly the difficult accessible in the case of a large rock sample.

The total porosity of aggregates does not exceed 3.0%, and basalt, quartzite and granite was even less than 2.0%. No relation between

Tablica 3 / Table 3

#### WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE PRÓBEK SKAŁ

#### PHYSICAL PROPERTIES OF THE ROCK SAMPLES

Właściwość / Property	Rodzaj skały / Type of rock			
	bazalt / basalt	granit / granite	dolomit / dolomite	kwarcyt / quartzite
gęstość pozorna, kg/dm <sup>3</sup> bulk density, kg/dm <sup>3</sup>	3,00	2,61	2,79	2,64
gęstość właściwa, kg/dm <sup>3</sup> specific density, kg/dm <sup>3</sup>	3,06	2,68	2,87	2,69
porowatość całkowita, % total porosity, %	1,96	2,61	2,79	1,86
nasiąkliwość, % water absorption by mass, %	0,5	0,8	0,2	0,3
nasiąkliwość objętościowa, % water absorption by volume, %	1,5	2,1	0,6	0,8

Wszystkie kruszywa są najwyższej jakości, w swojej klasie petrograficznej (11). Wyjątek stanowi granit, który ze względu na małą wytrzymałość na miażdżenie zaklasyfikować należy do najniższej klasy 20. Natomiast odnośnie do wyników badań nasiąkliwości, zawartości ziaren nieforemnych oraz pyłów mineralnych, jedynie w przypadku drobniejszych frakcji bazaltu (przy  $n_w$ ) i kwarcytu (przy  $z_p$ ) przekroczona została graniczna wartość normowa.

W porównaniu z nasiąkliwością próbek skał wyniki badań nasiąkliwości odpowiednich kruszyw były większe. Należy uwzględnić dwa podstawowe czynniki. Kruszywo łamane jest materiałem o większej powierzchni właściwej ziaren w porównaniu do próbek skały, stąd większa pozostałość wody powierzchniowej, co potwierdzają wyniki badań frakcji drobnej i grubej (tablica 4). Ponadto w drobnych ziarnach kruszywa jest większa możliwość nasycenia wodą porów, trudno dostępnych w dużej próbce skały. Porowatość całkowita kruszyw nie przekraczała 3,0%, a bazaltu, kwarcytu oraz granitu była mniejsza od 2,0%. Nie stwierdzono zależności pomiędzy porowatością a właściwościami mechanicznymi próbek skał i wytrzymałością na miażdżenie kruszywa. Nie stwierdzono także korelacji pomiędzy nasiąkliwością kruszywa a porowatością, co jest związane prawdopodobnie z tym, że o nasiąkliwości decyduje porowatość otwarta i rozkład wielkości porów, a w badaniach oznaczono tylko porowatość całkowitą.

### 3.3. Wpływ wytrzymałości na zginanie próbek skał na wytrzymałość wykonanych z nich kruszyw

Zależność wytrzymałości kruszyw na miażdżenie, wyrażonej jako zawartość ziaren nierozkruszonych [100% -  $X_{rm}$ ], od wytrzymałości próbek skał na rozciąganie, z których zostały one uzyskane (rysunek 1) pokazuje bardzo dobrą korelację tych właściwości

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ KRUSZYW ŁAMANYCH

TESTS RESULTS OF CRUSHED AGGREGATES

Właściwość / Properties	Fracja kruszywa / Fraction of aggregate							
	bazalt / basalt (Gracze)		granit / granite (Graniczna)		dolomit / dolomite (Laskowa Góra)		kwarcyt / quartzite (Wiśniówka)	
	2+8 mm	8+16 mm	2+8 mm	8+16 mm	2+8 mm	8+16 mm	2+8 mm	8+16 mm
1	2	3	4	5	6	7	8	9
wytrzymałość na miażdżenie - wskaźnik rozkruszenia, % crushing strength – crushing index, %	3,9	4,0	14,5	15,3	6,6	7,0	6,5	4,3
graniczna wartość wg PN-86/B-06712 limit value according to PN-86/B-06712	do 8% (marka 50) up to 8% (brand 50)		do 16% (marka 20) up to 16%		do 8% (marka 50) up to 8% (brand 50)		do 8% (marka 50) up to 8% (brand 50)	
nasiąkliwość masowa, % / water absorption, %	1,0	0,6	1,1	0,7	0,8	0,7	0,9	0,5
graniczna wartość wg PN-86/B-06712 limit value according to PN-86/B-06712	do 0,8% up to 0,8%		do 3,0% up to 3,0%		do 2,0% up to 2,0%		do 3,0% up to 3,0%	
zawartość ziaren nieforemnych, % content of mineral dust, %	8,1	7,9	8,5	8,2	9,2	8,5	8,2	5,6
graniczna wartość wg PN-86/B-06712 limit value according to PN-86/B-06712	do 10% up to 10%		do 25% up to 25%		do 10% up to 10%		do 20,0% up to 20,0%	
zawartość pyłów mineralnych, %	0,5	0,3	0,9	0,3	0,4	0,3	1,9	1,1
graniczna wartość wg PN-86/B-06712 limit value according to PN-86/B-06712	do 1,0% up to 1,0%		do 3,0% up to 3,0%		do 1,5% up to 1,5%		do 1,5% up to 1,5%	

the porosity and mechanical properties of the rock samples and the crushing strength of aggregates were found. Also no correlation between water absorption of aggregates and their porosity was found; probably the absorption is governed by open porosity and the structure of pores size, and in the tests only the total porosity was determined.

### 3.3. The relationship between tensile strength of the rock samples and crushing strength of aggregates

The crushing strength of aggregates expressed as the content of uncrushed grains 100% -  $X_{rm}$  and the splitting tensile strength of the rock samples shows a strong correlation confirmed by the correlation coefficient  $R=99\%$ . The lowest crushing strength of granite aggregate was correlated with the lowest tensile strength of granite sample and the highest crushing strength of basalt and quartzite aggregates with the highest tensile strength of these rock samples.

## 4. Comparison of the effect of the rock samples properties and aggregates on the properties of concretes

In order to verify the influence of the rock samples and aggregates mechanical properties [Table 4] on the compressive strength of HPC, produced of these aggregates, the compressive and tensile strength of rock samples [Figs. 2, 3] and crushing strength of aggregates [Fig. 1] were compared. There is an evident effect of the crushing strength of aggregates [Fig. 1] and of flexural strength of rock samples [Fig. 3] on the HPC compressive strength. The highest compressive strength of HPC with basalt and quartzite is

(współczynnik korelacji  $R = 99,5\%$ ). Najmniejsza wytrzymałość na miażdżenie kruszywa granitowego wiąże się dobrze z najmniejszą wytrzymałością granitu na rozciąganie, natomiast największa wytrzymałość na miażdżenie kruszywa bazaltowego i kwarcytowego z dużą wytrzymałością tych skał na rozciąganie.

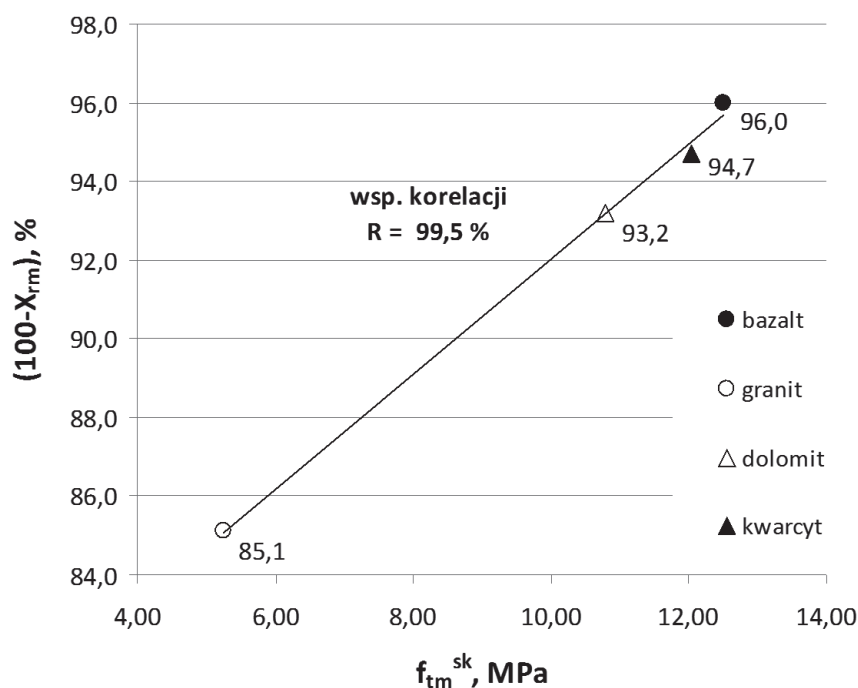
#### 4. Porównanie wpływu właściwości próbek skał i kruszyw na właściwości betonów

W celu wyjaśnienia wpływu właściwości mechanicznych próbek skał i kruszyw na wytrzymałość na ściskanie BWW, uzyskanych z tych kruszyw, porównano wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie próbek skał [rysunki 2, 3], i na miażdżenie kruszyw [rysunek 1]. Występuje wyraźny wpływ wytrzymałości kruszyw na miażdżenie [rysunek 1] oraz wytrzymałości próbek skał na rozciąganie [rysunek 3], na wytrzymałość BWW na ściskanie. Największa wytrzymałość na ściskanie BWW z kruszywem bazaltowym i kwarcytowym jest zgodna z największą wytrzymałością na miażdżenie tych kruszyw oraz największą wytrzymałością na rozciąganie próbek tych skał [rysunek 3].

Duża różnica modułów sprężystości próbek skał bazaltowej i granitowej znajduje odbicie w dużym zróżnicowaniu tych modułów w przypadku BWW [rysunek 4]. Przeciętny moduł sprężystości betonu z kruszywa kwarcytowego oraz bardzo dobry z dolomitowego jest prawdopodobnie spowodowany różnicą w przyczepności zaczynu cementowego do tych kruszyw (16, 17).

Z uzyskanych wyników doświadczalnych widać, że pomiędzy średnimi wartościami wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek skał  $f_{tm}^{sk}$  oraz betonów  $f_{ctm}$ , wykonanych z kruszyw z tych skał, występuje ogólna zgodność, o ile pominiemy wyniki badań dolomitu [rysunek 4]. Najwyraźniej wpływ wytrzymałości na rozciąganie próbek skał na wytrzymałość betonu jest widoczny na przykładzie granitu, kwarcytu i bazaltu. Jedynie w przypadku największej wytrzymałości na rozciąganie betonu z kruszywa dolomitowego brak tej zależności, w związku z przeciętną wytrzymałością dolomitu na rozciąganie. I w tym przypadku jest to prawdopodobnie związane z dobrą przyczepnością zaczynu cementowego do tego kruszywa. Ponadto beton z kruszywa węglanowego ma znaczną odporność na mikrozarzysowania skurczowe, które, jak podkreśla Aitcin (18) mogą powstawać w warstwie przejściowej betonu, w związku z dużym skurczem autogenicznym na początku twardnienia BWW, jeżeli nie jest on prawidłowo pielęgnowany.

Pomimo, że największa bezwzględna różnica wytrzymałości na rozciąganie badanych BWW wynosi jedynie 1,0 MPa, to ma ona duże znaczenie w przypadku betonów konstrukcyjnych



Rys. 1. Korelacja wytrzymałości kruszyw na miażdżenie (zawartość ziaren nierozkruszonych) i wytrzymałości próbek skał na rozciąganie

Fig. 1. Relationship between the crushing strength of aggregates (the content of non-crushed grains) and flexural strength of the rock samples

correlated with the highest crushing strength of these aggregates and with the highest flexural strength of the rock samples [Fig. 3]. The lowest compressive strength of concrete made of granite aggregate [Fig. 4] is consistent with the lowest crushing strength of this aggregate and tensile strength of granite [Tables 2 and 4].

The high differences of the modulus of elasticity of the rocks of basalt and granite samples is correlated with the big difference between the modulus of elasticity of concretes of these aggregates (Fig. 4). The average modulus of elasticity of concrete from quartzite aggregate and very good from dolomite aggregate is probably due to the difference of adhesion of cement paste to these aggregates (16, 17). From the experimental results it is shown that between the mean splitting bending strength of rock samples  $f_{tm}^{sk}$  and of concretes  $f_{ctm}$ , produced of these aggregates, the general conformity is existing, if the results of dolomite [Fig. 4] is excluded. A good example of the influence of tensile strength of rock samples on the concrete strength are granite, quartzite and basalt aggregates. Only in the case of the highest strength of concrete from dolomite aggregate this influence is lacking, in the connection of rather mean tensile strength of dolomite. Also in this case it is probably caused by the good adhesion of cement paste to this aggregate. Additionally, the concrete from carbonate aggregate is highly resistant to shrinkage microcracks which, as Aitcin (18) is stating can be formed in the ITZ of concrete in relation to the high autogenic shrinkage on the hardening beginning of HPC, if it is not properly cured.

However, the highest absolute difference of tensile strength of produced HPC is only 1 MPa it is important in the case of construction

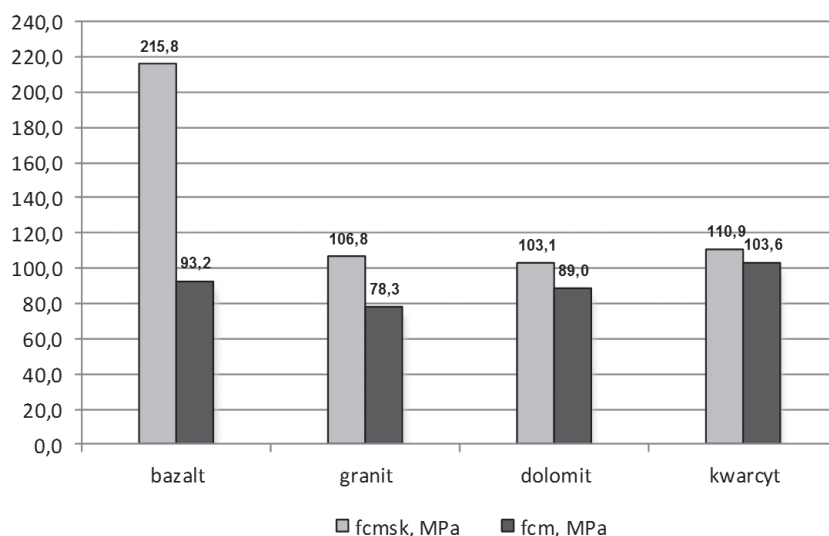
(14) i świadczy o wpływie rodzaju kruszywa na wytrzymałość  $f_{ctm}$  betonu. Zgodnie z normą EC2 (13), różnica wytrzymałości osiowej na rozciąganie różnych klas BWW wynosi tylko 0,2 MPa. Równocześnie trzeba przypomnieć, że zmierzona wytrzymałość betonów na ściskanie obejmuje 4 klasy betonu. Znaczny wpływ, pozornie niewielkich różnic wytrzymałości betonu na rozciąganie, na właściwości takich elementów betonowych jak płyty i belki żelbetowe opisali autorzy w jednej z prac (18).

## 5. Wnioski

1. Pomiedzy wytrzymałością na miażdżenie badanych kruszyw, określaną jako masa ziaren nierozkruszonych, a wytrzymałością próbek skał na rozciąganie występuje bardzo dobra korelacja.
2. Kompleksowa analiza wyników badań próbek skał, kruszywa i BWW wyraźnie potwierdza, że najgorsze właściwości betonu z kruszywa granitowego są związane z bardzo małymi wartościami modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie granitu, a także najmniejszą wytrzymałością kruszywa granitowego na miażdżenie.
3. Uzyskanie betonu wysokowartościowego, przy przeciętnych właściwościach zastosowanego kruszywa granitowego, było możliwe dzięki małemu stosunkowi w/c.
4. Największa wytrzymałość na rozciąganie i największy moduł sprężystości BWW z kruszywa dolomitowego, lepsze niż wynikałoby to z właściwości próbek skały i kruszywa, są związane z prawdopodobnie z dobrą przyczepnością zaczynu cementowego do tego kruszywa.
5. W badaniach wykazano, że przy doborze kruszywa do produkcji BWW, oprócz wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości próbek skały, ważne znaczenie ma wytrzymałość na miażdżenie kruszywa.

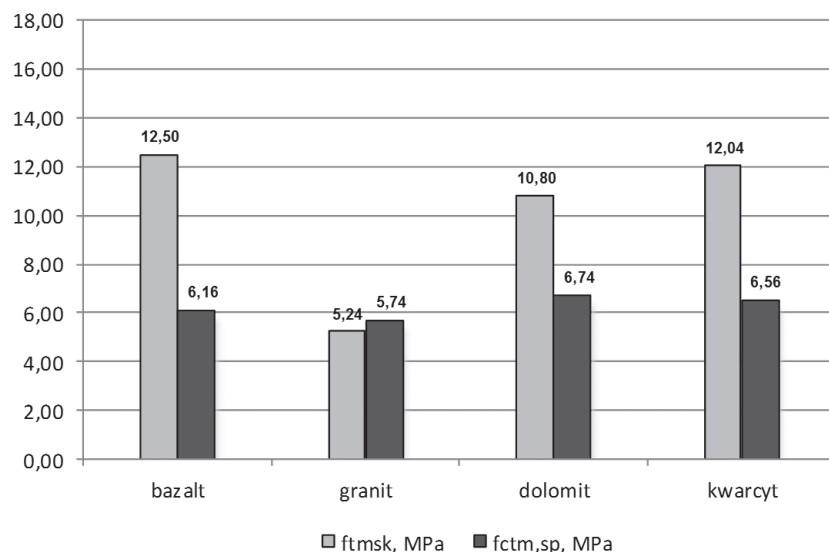
## Literatura / References

1. P. C. Aitcin, S. Mindess, Sustainability of Concrete, Taylor & Francis 2011.
2. S. Grzeszczyk, A. Matuszek-Chmurowska, Effect of basaltic sunburn scale on the durability of concrete, Cement Wapno Beton, **76**, 6, 277-281 (2009).
3. S. Grzeszczyk, A. Matuszek-Chmurowska, Wpływ rodzaju kruszywa na mikrostrukturę warstwy przejściowej i właściwości betonów wysokowartościowych, L Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, t. 3, s. 117-124, Warszawa-Krynica 2004.



Rys. 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek skał  $f_{cm}^{sk}$  oraz betonów z kruszyw wytwarzanych z tych skał  $f_{cm}$

Fig. 2. Comparison between mean values of compressive strength of the rocks  $f_{cm}^{sk}$  and concretes made from aggregates crushed of those rocks  $f_{cm}$



Rys. 3. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek skał  $f_{tm}^{sk}$  oraz betonów z kruszyw produkowanych z tych skał  $f_{ctm,sp}$

Fig. 3. Comparison between mean splitting tensile strength of rocks  $f_{tm}^{sk}$  and concretes  $f_{ctm,sp}$  made from aggregates crushed of these rocks

concrete (14) and is testifying of the kind of aggregate influence on the strength  $f_{ctm}$  of concrete. According to the standard EC2 (13) the difference of the axial tensile strength of different HPC class is equal 0.2 MPa. Simultaneously it should be reminded that measured compressive strength of concretes is covering 4 concrete classes. The high influence, of seemingly low differences of concrete tensile strength, on the properties of several concrete elements as panels, reinforced beams were presented by the authors (18).

4. P. J. M. Monteiro, P. K. Mehta, Interaction between Carbonate Rock and Cement Paste Interface, *Cem. Concr. Res.*, **16** (1986).

5. R. Zimbelmann, A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond, *Cem. Concr. Res.*, **15** (1985).

6. G. Prokopski, Badania wpływu warstwy stykowej kruszywo-zaprawa na odporność betonów na pękanie, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, **35**, 3-4 (1989).

7. A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, Odształcalność doraźna betonów wysokiej wytrzymałości, XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, t. 4, s. 5-12, Poznań-Krynica 1998.

8. P. C. Aitcin, P. K. Mehta, Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete, *ACI Mat. J.*, **87**, 2 (1990).

9. W. Piasta, W. Budzyński, J. Góra, Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odształcalność betonów zwykłych, *Przegląd Budowlany*, nr 7-8, s. 35-38 (2012).

10. W. Budzyński, J. Góra, W. Piasta, T. Turkiewicz, Moduł sprężystości betonów z kruszywami łamanymi z polskich i ukraińskich skał magmowych, 60 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Lublin-Krynica 2014.

11. J. Pinińska (red.), Właściwości wytrzymałościowe i odształceniowe skał. Część II. Skały magmowe, osadowe i metamorficzne regionu Sudeatów. Katalog, Tom 3, Uniwersytet Warszawski 1996.

12. PN-EN 206-1:2014-04 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

13. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

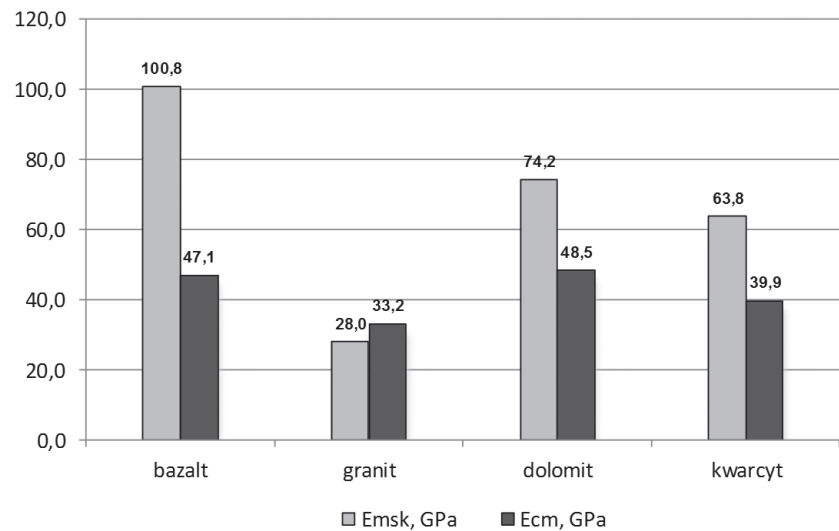
14. W. Piasta, W. Budzyński, J. Góra, The effect of coarse aggregate on the strains of high performance concrete under uniaxial compression, *Cement Wapno Beton*, **80**, 6, 378-386 (2013).

15. S. Kozłowski, Surowce skalne Polski, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1984.

16. K. Chmura, S. Lewowicki, Kwarcyty okolic Bolesławca, *Biul. Inst. Geol.*, nr 173 (1962).

17. P. C. Aitcin, The durability characteristics of high performance concrete: a review, *Cem. Concr. Comp.*, **25**, 409-420 (2003).

18. W. Budzyński, J. Góra, W. Piasta, Wpływ rodzaju kruszywa na ugięcie elementów żelbetowych obciążonych doraźnie. *Materiały Budowlane*, nr 11, s. 19-21 (2012).



Rys. 4. Zależność średnich wartościami modułów sprężystości betonów z różnych kruszyw oraz próbek skał  $E_{m}^{sk}$ , z których te kruszywa zostały uzyskane

Fig. 4. Relationship between means values of the modulus of elasticity of rocks  $E_{m}^{sk}$  and concretes  $E_{cm}$  made from aggregates crushed of respective rocks

## 5. Conclusions

1. A good correlation between the crushing strength of aggregates, defined as a mass of the uncrushed grains, and the tensile strength of the rock samples was found.
2. A complex analysis of the rock samples, aggregates and HPCs test results clearly confirms that the worst properties of concrete from granite aggregate are connected with very low modulus of elasticity and tensile strength of granite, as well as with the lowest crushing strength of granite aggregate.
3. The HPC production from granite aggregate of average properties was possible thanks to very low w/c ratio.
4. The highest tensile strength and the modulus of elasticity of HPC from dolomite aggregate, better than it would result from the properties of dolomite aggregate, are probably related with a good adhesion of cement paste to this aggregate.
5. The experimental examination of proper aggregate type for HPC production, apart of the strength and modulus of elasticity of the rock samples, it is significant to pay the attention to the crushing strength of aggregate.