

Wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie betonów zwykłych i wysokowartościowych z różnymi kruszywami łamanymi

Compressive and splitting tensile strength of ordinary and high performance concretes with various crushed aggregates

1. Wprowadzenie

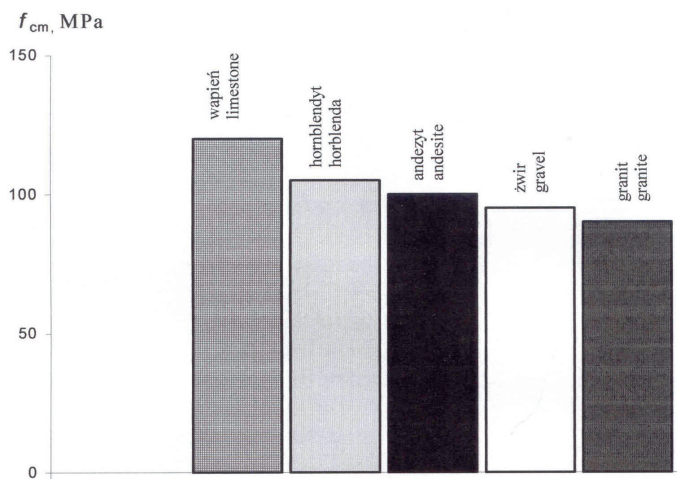
Powszechnie do betonów konstrukcyjnych wysokiej wytrzymałości stosuje się kruszywa ze skał pochodzenia wulkanicznego, głównie bazaltowe i granitowe, natomiast kruszywa ze skał węglanowych (złożonych z kalcytu i dolomitu w różnych proporcjach) wykorzystuje się w niewielkim stopniu. W niektórych publikacjach (1) i normach ogranicza się ten rodzaj kruszyw do zastosowania głównie w zwykłych betonach średnich i niższych klas. Przykładowo w normie PN-S-10040: 1999 dotyczącej wymagań dla betonowych obiektów mostowych są zalecane wyłącznie kruszywa granitowe i bazaltowe. Także w inżynierskiej praktyce budownictwa betonowego, szczególnie w Polsce, odczuwalny jest ogólny brak zaufania do kruszyw węglanowych. Wynika to między innymi z ogólnie znanej małej twardości i dużej ścieralności skał węglanowych (eliminującej je ze stosowania do nawierzchni komunikacyjnych), a także z dużej zmienności właściwości fizycznych tych skał z różnych złóż. Nietrafnie uogólnia się fakt, że w niektórych złożach (głównie jurajskich) porowatość tych skał jest duża (często ponad 10%), czemu towarzyszy zwykle niezadowalająca wytrzymałość. Jednak w dość licznych złożach (przeważnie dewońskich) występują skały węglanowe o porowatości mniejszej od 5%, a nawet od 3%, choć i wówczas ich wytrzymałość jest niższa niż bazaltów. Możliwa jest także szkodliwa reakcja rozkładu dolomitu, natomiast towarzysząca temu procesowi ekspansja dotyczy tych skał, które zawierają również minerały ilaste (2). Jednak zagrożenia tego można uniknąć, stosując cementy o małej zawartości alkaliów ($\text{Na}_2\text{O} < 0,6$).

Natomiast w wielu zagranicznych opracowaniach naukowych, a także nielicznych krajowych (3) uzasadnia się możliwość stosowania kruszyw węglanowych dobrej jakości do betonów wysokich wytrzymałości. Znajduje to także odzwierciedlenie w praktyce. W USA wśród kruszyw łamanych zużywanych do produkcji różnorodnych betonów kruszywa węglanowe stanowią prawie 70% (4), a w Polsce tylko 20%.

1. Introduction

High quality concretes are usually made of coarse aggregate from volcanic rocks, while the carbonate aggregates (from limestone or limestone-dolomite rocks; usually the mixture of calcite and dolomite) are used reluctantly. In some standard specifications and even in scientific publications (1), the carbonate aggregates are not recommended for hpc and they are limited to be applied only to concretes of low and medium strength. For instance, according to the standard PN-S-10040: 1999 (2), which deals with concrete bridge structures, coarse aggregate from granite or basalt should be exclusively used. There is some general distrust of the carbonate aggregates in concrete engineering practice in Poland as well. It results among other things from generally well known low hardness and high grindability of carbonate rocks (that preclude them unfortunately from applying in pavements) and moreover the variability of physical properties of rocks from various deposits is considerable. The fact that the porosity of carbonate rocks in some deposits (chiefly Jurassic) is high, even above 10%, and then their strength is too low is inappropriately generalized. However, there are plenty deposits (mostly Devonian) of porosity lower than 5%, and even below 3%. But even then the strength of carbonate rocks is lower than that of basalt. Also their dedolomitization is possible when aggregate and concrete are of high water absorbability and content of sodium and potassium in cement used is really high (2). But it is possible to eliminate this impendence totally using low alkali cements ($\text{Na}_2\text{O}_e < 0.6$), aggregates of low porosity (e.g. $p < 3\%$), lignosulfonates as superplasticizers and keeping the water permeability of concrete as low as possible (e.g. as at w/c -ratio < 0.45).

However, it has been proved in many foreign and some Polish experiments and stated in scientific works (3) that it is possible to use successfully the high quality carbonate aggregates for hpc. It can be also seen in the practice. The share of the carbonate



Rys. 1. Wytrzymałość betonów wysokowartościowych na ściskanie z różnymi kruszywami (8)

Fig. 1. Compressive strength of hpc with various aggregates (8)

Mimo że jest to niedoceniane, wśród kruszyw łamanych ze skał zbitych wyróżniają się kruszywa węglanowe o małej porowatości nie przekraczającej 3%. Fizykochemiczne oddziaływanie węglanu wapniowego i zaczynu cementowego przynosi korzystne zmiany warstwy kontaktowej (5, 6), między innymi w wyniku powstawania monokarboglinianu, zmniejszenia porowatości i wzrostu wytrzymałości tej warstwy. W większości przypadków powoduje to zwiększenie wytrzymałości i modułu sprężystości betonu. Powszechnie wiadomo (4, 7), że poprawa właściwości betonu z kruszywa węglanowego jest tym większa, im dłuższy jest czas jej dojrzewania. Jednak ze względu na wytrzymałość skał węglanowych, zwykle niższą niż bazaltu, diorytu, granitu, czy kwarcytu, kruszywa węglanowe są niezbyt chętnie stosowane do wytwarzania betonów wysokowartościowych pomimo, że stwarzają one możliwość uzyskania betonów o wytrzymałości na ściskanie f_{cm} wynoszącej nawet 120 MPa (8) (rysunek 1).

2. Charakterystyka badanych betonów

W celu określenia wpływu rodzaju łamanych kruszyw grubych na wytrzymałość badaniom poddano sześć betonów podzielonych na 2 grupy: betony zwykłe (BI) o $w/c=0,45$ i betony wysokowartościowe (BII) o $w/c = 0,28$. Betony BI i BII wykonano z trzech różnych grubych kruszyw łamanych (2÷16 mm): bazaltowego z kamieniołomu Gracze (B), dolomitowego z Laskowej Góry (D), granitowego z Granicznej koło Strzegomia (GR) oraz piasku naturalnego płukanego (0÷2 mm) z Suwałk. We wszystkich badanych betonach zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5N HSR NA oraz superplastyfikator zawierający lignosulfonian z dodatkiem sulfonowanego polikondensatu melaminy z formaldehydem. W każdej grupie betonów (BI i BII) przyjęto zasadę zachowania tej samej objętości kruszywa grubego. Stosy okruszowe poszczególnych kruszyw utworzono z wydzielonych frakcji 2÷4, 4÷8, 8÷16 mm (uwzględniając różne gęstości objętościowe bazaltu, dolomitu i granitu), tak aby zawartość objętościowa poszczególnych frakcji kruszywa w porównywanych betonach była taka sama (w zakresie każdej grupy oddzielnie). Procentowo wyrażona zawartość

agregatów w całkowitej ilości kruszywa grubego, która jest stosowana w produkcji betonu w USA, jest aż do 70% (4), natomiast w Polsce jest mniejsza niż 20%.

Choć jest to niedoceniane, agregaty węglanowe o porowatości mniejszej niż 3% są wyróżnialne wśród kruszyw zbitych. Reakcje chemiczne i fizykochemiczne między węglanem wapnia a pastą cementową mogą występować. Reakcje te są przyczyną korzystnych zmian w strefie styku (5, 6), na przykład: powstanie monokarboglinianu; dezorientacja kryształów portlanditu, zmniejszenie wielkości porów i porowatości. Ogólnym rezultatem jest zwykle obserwowane zwiększenie wytrzymałości i modułu sprężystości. Jest to powszechnie wiadomo (4, 7), że im dłuższy jest czas hydratowania, tym większe jest zwiększenie wytrzymałości betonu z agregatem węglanowym. Ponieważ wytrzymałość skał węglanowych jest zwykle nieco niższa niż w przypadku skał bazaltowych, granitowych, diorytowych, gabbrowych czy kwarcytowych, agregaty węglanowe jako wypełniacz betonu są oceniane w inżynierii budowlanej nieco gorzej niż inne, mimo niektórych wyników eksperymentalnych, które potwierdzają ich przydatność do hpc o wytrzymałości f_{cm} do 120 MPa (8) (rysunek 1).

2. Specification of experimental concretes

Próbki, które służyły do określenia wpływu kruszywa grubego na wytrzymałość, zostały wykonane z sześciu mieszanek betonowych podzielonych na dwie grupy: zwykłe (BI) o $w/c = 0,45$ i wysokowartościowe (BII) o $w/c = 0,28$. Betony BI i BII wykonano z trzech różnych kruszyw łamanych (2–16 mm): bazaltu z Gracze (B), dolomitu z Laskowej Góry (D) i granitu z Granicznej koło Strzegomia (GR) oraz naturalnego piasku (0–2 mm) z Suwałk. Cementem użytym do wykonania betonu był CEM I 42,5 HSR NA. Do mieszanek dodano lignosulfonian z dodatkiem sulfonowanego melaminy i formaldehydu jako superplastyfikator. W każdej grupie betonów (BI i BII) przyjęto zasadę zachowania tej samej objętości kruszywa grubego. Stosy okruszowe poszczególnych kruszyw utworzono z wydzielonych frakcji 2–4, 4–8 i 8–16 mm (uwzględniając różne gęstości objętościowe bazaltu, dolomitu i granitu), tak aby zawartość objętościowa poszczególnych frakcji kruszywa w porównywanych betonach była taka sama (w zakresie każdej grupy oddzielnie). Procentowo wyrażona zawartość

agregatów w całkowitej ilości kruszywa grubego, która jest stosowana w produkcji betonu w USA, jest aż do 70% (4), natomiast w Polsce jest mniejsza niż 20%.

Both the mix compositions were designed experimentally at the slump from 7 to 12 cm (i. e. the traditional semi-liquid mix and the consistency class S2/S3 ac. to PN-EN 206-1). Using the proper superplasticizer it was possible to maintain the rheological properties of the concrete mixes for 1-1.5 hour. The samples were cured for 28 days under laboratory conditions. Before tests, the bases of cylinder samples were ground to make them completely parallel.

The mix compositions and main physical properties of concretes BI and BII are presented in Tables 1 and 2, respectively.

The following standard samples were made of each mix: 12 cylinders ($d = 150$ mm, $h = 300$ mm) and 6 cubes ($b = 150$ mm). The number of samples of each concrete in each single strength test (cylinder, cube compressive strength and splitting tensile strength)

frakcji 0–2 mm w całej objętości stosu okruszowego w każdym przypadku wynosiła 35,7%. Jamistość wszystkich stosów okruszowych mieściła się w granicach 23–25%. W celu ustalenia wpływu kruszywa na rozpatrywane właściwości betonów zrezygnowano z dodatku pyłów krzemionkowych, kierując się wartością w/c, ilością cementu i konsystencją.

Ostateczne składy mieszanek betonowych BI i BII ustalono doświadczalnie przy założeniu klasy konsystencji odpowiadającej tradycyjnej konsystencji półcieklej. Wskaźnik stopnia ciekłości mieszanek mieścił się w granicach od 7 do 12cm opadu stożka, co odpowiada klasom konsystencji S2/S3 zgodnie z PN-EN 206-1. Zastosowanie efektywnej domieszki upłynniającej pozwoliło na utrzymywanie właściwości reologicznych mieszanek betonowych przez okres 1-1,5 h.

Składy badanych betonów BI i BII oraz podstawowe właściwości fizyczne podano w tablicach 1 i 2.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANEK BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH BII I ICH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE
COMPOSITIONS OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE MIXES BII AND THEIR PHYSICAL PROPERTIES

składniki betonów BI components of concretes BI (w + w _{sp})/c = 0,28	beton / concrete (rodzaj kruszywa grubego / kind of coarse aggregate)		
	BII-B (bazalt / basalt)	BII-D (dolomit / dolomite)	BII-GR (granit / granite)
cement, kg/m ³	479	479	479
piasek / sand (0+2 mm), kg/m ³	699	699	699
kruszywo grube / coarse aggregate (2+4 mm), kg/m ³	136	125	117
kruszywo grube / coarse aggregate (4+8 mm), kg/m ³	408	376	356
kruszywo grube / coarse aggregate (8+16 mm), kg/m ³	817	752	703
woda / water, dm ³ /m ³	128	128	128
superplastyfikator / superplasticizer	9,6	9,6	9,6
właściwości fizyczne betonu / physical properties of concretes			
gęstość / density, kg/dm ³	2,93	2,79	2,70
gęstość objętościowa / volumetric density, kg/dm ³	2,66	2,54	2,46
porowatość całkowita / total porosity, %	9,22	8,96	8,89

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONÓW ZWYKŁYCH BI I ICH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE
COMPOSITIONS OF NORMAL CONCRETE MIXES BI AND THEIR PHYSICAL PROPERTIES

składniki betonów BI components of concretes BI (w + w _{sp})/c = 0,45	beton / concrete (rodzaj kruszywa grubego / kind of coarse aggregate)		
	BI-B (bazalt / basalt)	BI-D (dolomit / dolomite)	BI-GR (granit / granite)
cement, kg/m ³	371	371	371
piasek / sand (0+2 mm), kg/m ³	701	701	701
kruszywo grube / coarse aggregate (2+4 mm), kg/m ³	137	126	118
kruszywo grube / coarse aggregate (4+8 mm), kg/m ³	409	377	353
kruszywo grube / coarse aggregate (8+16 mm), kg/m ³	819	754	706
woda / water, dm ³ /m ³	166	166	166
superplastyfikator / superplasticizer (0,7% C), kg/m ³	2,6	2,6	2,6
właściwości fizyczne betonu / physical properties of concretes			
gęstość / density, kg/dm ³	2,87	2,74	2,63
gęstość objętościowa / volumetric density, kg/dm ³	2,60	2,47	2,40
porowatość całkowita / total porosity, %	9,41	9,85	8,74

*Gęstość betonu została określona metodą piknometryczną, a jego gęstość objętościowa metodą hydrostatyczną.

*The density was determined with a pycnometer and the volumetric density with a hydrostatic method.

was determined and calculated with the use of the t-distribution at $\alpha = 0,05$ (9, 10). The sufficient number of sample was as high 4 or 5. Finally, 6 samples of each concrete in each single strength test were used to ensure the result reliability. The tests of compressive strength were made for the standard cylinder and cube samples (altogether 12 samples of each concrete) to find any relations and support them with the two types of samples. Splitting tensile strength was tested with the use of the same type of cylinder samples.

3. Strength test results and their analysis

All the strength test results were subjected to the one-way analysis of variance (ANOVA) and to the multiple comparison with the lowest significant difference (LSD) at the significance level 0.05. The statistical analyses applied allow us to state the significance of the influence of the factor on experimental results at the significance level assumed (10, 11). The

Wystarczająca liczba próbek w każdym badaniu betonu (kostkowa i walcowa wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie badana przez rozłupywanie próbek walcowych) była ustalana na podstawie wyników wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta (9, 10), według którego przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ liczba ta wynosiła 4 lub 5 próbek. Ostatecznie każde badanie przeprowadzono na 6 próbkach w celu zagwarantowania wiarygodności wyników. Badania wytrzymałości na ściskanie celowo przeprowadzono na normowych próbkach kostkowych i walcowych (łącznie 12 sztuk dla każdego rodzaju betonu), aby jednoznacznie ustalić występujące korelacje i potwierdzić je na dwóch typach próbek. Wytrzymałość na rozciąganie badano na tym samym typie próbek walcowych. Tym samym z każdej z sześciu mieszanek betonowych wykonano po 12 próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm oraz 6 próbek kostkowych o długości krawędzi 150 mm. Badania przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek w warunkach laboratoryjnych.

3. Wyniki badań wytrzymałości i ich analiza

Wszystkie wyniki badań wytrzymałości betonów BI oraz BII, poddano testom jednoczynnikowej analizy wariancji i najmniejszej istotnej różnicy (NIR) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (10, 11). Wpływ rodzaju kruszywa na walcową i kostkową wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu był analizowany dla betonów BI i oddzielnie dla betonów BII. W każdym przypadku liczba pomiarów w podgrupie była jednakowa i wynosiła 6. Zatem liczba stopni swobody między grupami wynosi 2, a w obrębie grup 15. Za pomocą statystyki F-Snedecora przetestowano hipotezy zerowe $H_0: m_1 = m_2 = m_3$ wobec hipotezy H_1 . Do porównania funkcji F_0 stosowanej do testowania posłużono się wartością krytyczną $F_\alpha = 3,68$, odczytaną z tablicy rozkładu *Fishera-Snedecora* dla występujących stopni swobody i poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Jeżeli w tak wykonanej analizie stwierdzano statystycznie istotny wpływ czynnika (kruszywa), to wówczas wobec ilości populacji większej

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ ŚREDNIA I WSPÓŁCZYNNIK ZMIENNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI BADANYCH BETONÓW
MEAN STRENGTH OF CONCRETES AND COEFFICIENT OF VARIATION

Właściwość Property	Beton Concrete	w/c = 0,45			w/c = 0,28		
		BI-B	BI-D	BI-GR	BII-B	BII-D	BII-GR
Wytrzymałość na ściskanie, walce Compressive strength, cylinders	$f_{cm, cyl}$ [MPa]	51,7	51,1	54,2	76,3	74,7	66,0
	v [%]	4,6	7,4	4,1	5,9	7,5	6,8
Wytrzymałość na ściskanie, kostki Compressive strength, cubes	$f_{cm, cube}$ [MPa]	61,8	60,0	61,2	88,3	85,3	76,7
	v [%]	8,3	7,7	3,6	7,1	4,5	5,0
Wytrzymałość na rozciąganie Splitting tensile strength	$f_{ctm, sp}$ [MPa]	3,50	3,80	3,35	4,60	4,80	4,25
	v [%]	6,6	5,0	5,1	5,9	6,3	4,5

variability source (factor of influence on concrete strength) analyzed statistically is the coarse aggregate (basalt – B, dolomite – D, granite – GR). The effect of aggregate on cylinder, cube compressive strength and splitting tensile strength was considered separately for concretes BI and BII. The number of strength measurements of any single concrete was 6 in any case. However the number of degrees of freedom between groups is 2 and within groups 15. The hypothesis $H_0: m_1 = m_2 = m_3$ (e.g. all the mean cube strength values are the same) was tested with the help of the *F-Snedecor's* statistics, contrary to the hypothesis H_1 (e.g. not all the means are the same). The value of test function F_0 was compared with the critical value $F_\alpha = 3,68$ (known from the *Fisher-Snedecor's* distribution for the existing degrees of freedom and at the significance level 0.05). When a significant influence of a factor (coarse aggregate) was found, then due to the population number higher than 2 (in any case strength values of 3 concretes were analyzed), the lowest significant difference (LSD) test was carried out to find which pair of means differs significantly from each other.

The mean values of concrete strength and coefficients of variation are presented in the Table 3.

Tablica 4 / Table 4

ANALIZY WARIANCJI $f_{c, cyl}$ BETONÓW ZWYKŁYCH BI
VARIANCE ANALYSIS OF $f_{c, cyl}$ FOR ORDINARY CONCRETES BI

Źródło zmienności Source of variability	Suma kwadratów Sum of squares	Stopnie swobody Degrees of freedom	Średni kwadrat Mean square	Funkcja F_0 F_0 -ratio	Wartość krytyczna F_α Critical value F_α
między grupami between groups	33.19	2	16.60	1.96	3.68
w obrębie grup within groups	127.10	15	8.47	—	—
razem together	160.29	17	—	—	—

niż 2 przeprowadzano próbę najmniejszej istotnej różnicy (NIR), aby stwierdzić, które z par średnich różnią się istotnie.

W tabelicy 3 zestawiono wyniki badań wytrzymałości betonów w postaci wartości średnich i współczynników zmienności.

Wyniki analiz statystycznych, umożliwiające wyciągnięcie wniosków na temat wpływu kruszyw na wytrzymałość betonów, przedstawiono na przykładach analiz wytrzymałości walcowej na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie betonów zwykłych BI (tablice 4 i 5). Uzyskane wyniki badań wytrzymałości walcowej betonów BI poddano jednoczynnikowej analizie wariancji, której rezultaty zamieszczono w tabelicy 4.

Porównując wartości F_0 oraz F_α nie stwierdzono statystycznie istotnego wpływu rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość na ściskanie walców z betonów BI.

W tabelicy 5 podano wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji, wyników badań wytrzymałości na rozciąganie betonów zwykłych BI.

Porównując wartości F_0 oraz F_α stwierdzono statystycznie istotny wpływ rodzaju kruszywa na wytrzymałość na rozciąganie betonów BI. W celu stwierdzenia, pomiędzy którymi średnimi wytrzymałościami występuje istotna różnica, przeprowadzona została próba NIR (tablica 6).

Test NIR wykazał statystycznie istotną różnicę średnich wartości $f_{ct,sp}$ pomiędzy betonem BI-D a betonami BI-B oraz BI-GR. Wyraźnie najwyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie osiągnął beton z kruszywem dolomitowym, natomiast różnica pomiędzy średnimi wytrzymałościami na rozciąganie betonów BI z kruszywem bazaltowym i granitowym jest nieistotna.

4. Dyskusja wyników badań

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Analizy wariancji wyników badań wytrzymałości walcowej i kostkowej na ściskanie betonów zwykłych BI (rysunek 2) wykazały brak statystycznie istotnych różnic związanych z różnym kruszywem grubym (bazaltowe, dolomitowe i granitowe).

Na podstawie wyników badań wytrzymałości na ściskanie obydwóch rodzajów próbek wszystkie trzy betony BI, bez względu na rodzaj stosowanego kruszywa, są zgodnie z normą (PN-EN 206-1) betonami zwykłymi klasy C45/55.

Przeprowadzone dwie analizy wariancji wykazały statystycznie istotny wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość walcową i kostkową na ściskanie betonów BII. Wykazano, że w obu przypad-

Tablica 5 / Table 5

ANALIZY WARIANCJI $f_{ct,sp}$ BETONÓW ZWYKŁYCH BI

THE VARIANCE ANALYSIS OF $f_{ct,sp}$ FOR ORDINARY CONCRETES BI

Źródło zmienności Source of variability	Suma kwadratów Sum of squares	Stopnie swobody Degrees of freedom	Średni kwadrat Mean square	Funkcja F_0 F_0 -ratio	Wartość krytyczna F_α Critical value F_α
między grupami between groups	0.62	2	0.311	7.70	3.68
w obrębie grup in groups	0.61	15	0.040	—	—
<i>razem</i> <i>together</i>	1.23	17	—	—	—

Tablica 6 / Table 6

WYNIKI p TESTU NIR DLA $f_{ct,sp}$ BETONÓW ZWYKŁYCH BI

THE p -VALUES FOR THE MULTIPLE COMPARISON WITH LSD OF $f_{ct,sp}$ FOR ORDINARY CONCRETES BI

Nazwa populacji Population	BI-B $f_{ctm,sp} = 3.50$ MPa	BI-D $f_{ctm,sp} = 3.80$ MPa	BI-GR $f_{ctm,sp} = 3.35$ MPa
BI-B	—	0.0155	0.2982
BI-D	0.0155	—	0.0017
BI-GR	0.2982	0.0017	—

influence of the coarse aggregate on the compressive strength of the ordinary concretes tested with the use of cylinder samples (Table 4).

The effects of variance analysis carried out for tensile strength of concretes BI are placed in Table 5. Comparing the values F_0 and F_α , the significant influence of the coarse aggregate on the splitting tensile strength of the concretes BI was found.

According to Table 6, the splitting tensile strength of concrete BI with dolomite aggregate was significantly higher than those of basalt and granite concretes but the strength of both concretes does not differ significantly.

4. Discussion of strength test results

4.1. Compressive strength

The insignificant effect of coarse aggregate on cylinder and cube compressive strength of ordinary concretes BI (Fig. 2) was indicated with the help of the analysis of variance. All the three concretes BI with any aggregate tested with the use of cylinder and cube samples can be taken as ordinary concretes of the strength class C45/55.

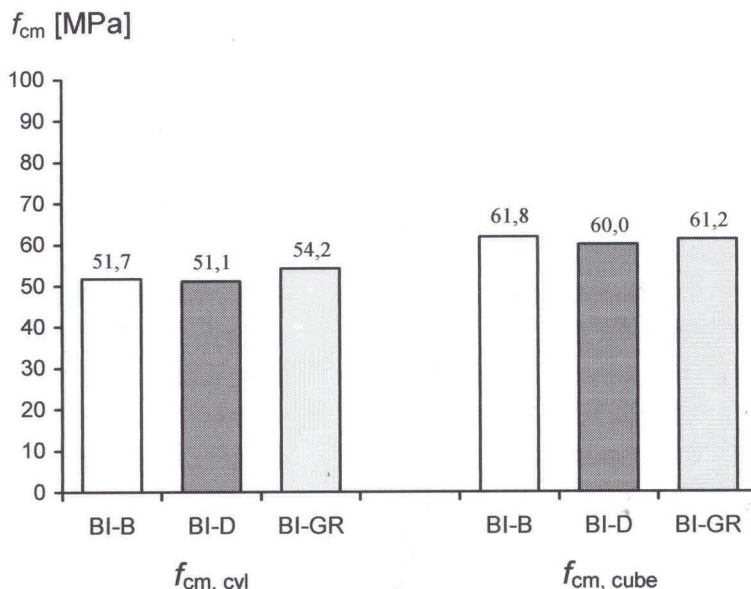
According to both variance analyses, the significant effect of aggregate on cylinder and cube compressive strength of concretes BII was found. Both the strength $f_{cm,cyl}$ and $f_{cm,cube}$ values of granite aggregate concrete are significantly lower than those of dolomite and basalt concretes. Moreover, the mean compressive strengths of both concretes BII with basalt (cube: 88.3 MPa and

kach wartości $f_{cm,cyl}$ i $f_{cm,cube}$ betonu z kruszywa granitowego są znacznie mniejsze od wytrzymałości betonu z kruszywa dolomitowego i bazaltowego. Natomiast obie średnie wytrzymałości, kostkowa i walcowa, betonów BII z kruszywem bazaltowym (wynoszące odpowiednio 88,3 i 76,3MPa) i dolomitowym (wynoszące odpowiednio 85,3 i 74,7MPa) nie różnią się istotnie przy $\alpha = 0,05$ (rysunek 3).

Betony BII-B oraz BII-D spełniają na podstawie wytrzymałości walcowych $f_{c,cyl}$ wymagania dotyczące klasy wytrzymałości C70/85, a BII-GR klasy niższej C60/75. Z kolei, na podstawie wytrzymałości kostkowych $f_{c,cube}$, betony z kruszywem bazaltowym i dolomitowym odpowiadają klasie C60/75, a beton z kruszywem granitowym klasie C55/67.

Jednoznacznie statystycznie wyższe wytrzymałości na ściskanie odpowiednio betonów BII-D i BII-B aż o 13% i 16% od betonu BII-GR (rysunek 3) są niewątpliwie związane z innymi właściwościami kruszywa. Należy przypomnieć, że beton zwykły z kruszywa granitowego charakteryzował się nieznacznie wyższą wytrzymałością na ściskanie od pozostałych betonów (rysunek 2). Świadczy to o wystąpieniu różnic, wynikających z różnych właściwości kruszyw dopiero przy wysokich wartościach naprężeń ściskających w betonach wysokowartościowych BII. Wraz ze wzrostem wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego w wyniku zmniejszenia w/c do wartości 0,28 następuje zmniejszenie porowatości i grubości warstwy kontaktowej zaczyn-kruszywo (4, 8). Tym samym ułatwione jest przenoszenie naprężeń pomiędzy matrycą i wypełniaczem, o czym świadczy występowanie przełamu ziaren kruszywa grubego na powierzchni zdecydowanej większości próbek po badaniu wytrzymałości. W związku z powyższymi właściwościami wytrzymałość kruszywa ma większe znaczenie przy małym stosunku w/c betonu.

Wytrzymałość na ściskanie wszystkich betonów BII jest zgodna z wymaganiami dotyczącymi betonów wysokowartościowych, czyli mają wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach spełniającą wymagania klasy co najmniej C50/60 (B60). Warto podkreślić, że osiągnięcie wytrzymałości na ściskanie odpowiadającej betonom BWW, okazało się łatwiejsze przy użyciu kruszywa dolomitowego o niskiej porowatości niż w przypadku stosowania



Rys. 2. Średnia wytrzymałość betonów zwykłych BI ($w/c = 0,45$) na ściskanie zmierzona na próbkach walcowych $\varnothing 150/300$ oraz kostkowych #150 po 28 dniach dojrzewania

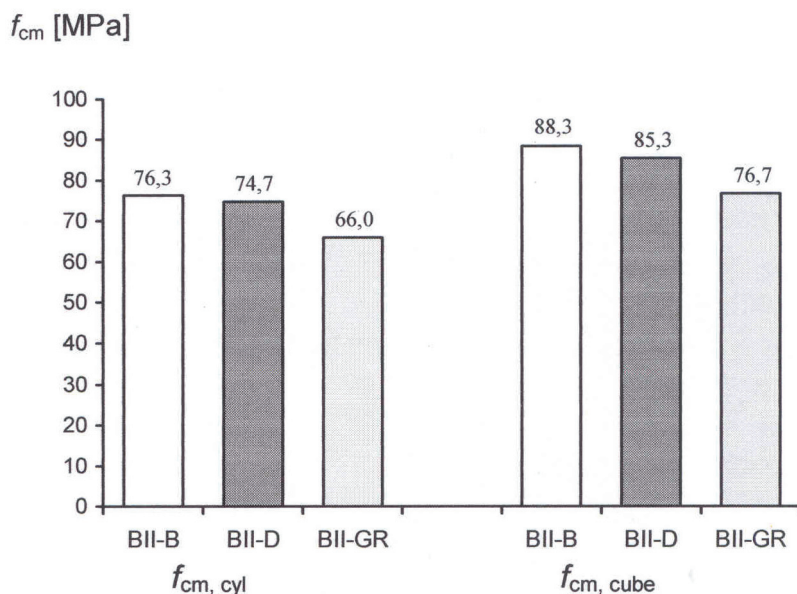
Fig. 2. Mean compressive strength of ordinary concretes BI ($w/c = 0.45$) measured on cylinder samples $\varnothing 150/300$ and cube samples #150 after 28 days of hardening

cylinder: 76.3 MPa) and with dolomite (85.3 MPa and 74.7 MPa, respectively) are not significantly different at $\alpha = 0.05$ (Fig. 3).

According to cylinder strength $f_{c,cyl}$, the two concretes BII-B and BII-D should be classified as the strength class C70/85 and the concrete BII-GR as C60/75. However, on the ground of cube strength $f_{c,cube}$ -values, both concretes BII with dolomite and basalt aggregates meet the requirements of the strength class C60/75, and granite concrete C55/67.

Distinctly statistically higher up to 13 and 16%, compressive strength of concretes BII-D and BII-B, respectively, than

that of granite aggregate concrete is related to different mineral composition of the rocks and properties of aggregates as well (from twice to three times higher crushing coefficient of granite aggregate than those of dolomite and basalt ones in spite of the same strength values of rocks: granite 116 MPa and dolomite 120 MPa). However, compressive strength of ordinary concrete BI-GR was a little higher than those of concretes BI-D and BI-B (Fig. 2). In this way, the distinct difference resulting from various inherent aggregate and rock properties is only shown at strength tests of both hpc and ordinary concrete. The increase in strength



Rys. 3. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie próbek walcowych i kostkowych betonów wysokowartościowych BII ($w/c = 0,28$) po 28 dniach dojrzewania

Fig. 3. Mean compressive strength of high performance concretes BII ($w/c = 0.28$) after 28 days of hardening

kruszywa granitowego.

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie

Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{ctm} betonów wskazują na najkorzystniejszy wpływ kruszywa dolomitowego. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wytrzymałość na rozciąganie betonów zwykłych BI ($w/c = 0,45$) z kruszywa dolomitowego jest wyższa o 8 i 12% od wytrzymałości betonów BI odpowiednio z kruszywa bazaltowego i granitowego. Przeprowadzona analiza wariancji wykazała statystycznie istotny wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość betonów zwykłych BI na rozciąganie przy rozłupywaniu. Ponadto za pomocą próby najmniejszej istotnej różnicy wykazano, że wartość f_{ctm} betonu z kruszywa dolomitowego jest statystycznie istotnie większa niż średnia wytrzymałość na rozciąganie betonów z kruszywa granitowego oraz z kruszywa bazaltowego. Natomiast średnia wytrzymałość na rozciąganie betonów BI z kruszywem bazaltowym i granitowym nie różni się istotnie przy $\alpha = 0,05$.

Podobnie w przypadku betonów wysokowartościowych BII ($w/c = 0,28$) najwyższą średnią wytrzymałość na rozciąganie f_{ctm} wykazuje beton z kruszywa dolomitowego, a niewiele niższą beton z kruszywa bazaltowego. Natomiast w porównaniu do średniej wytrzymałości betonu z kruszywem granitowym, wytrzymałości f_{ctm} betonu BII-B i BII-D są wyraźnie wyższe aż odpowiednio o 8 i 13% (rysunek 4). Na podstawie analizy wariancji wyników badania wykazano statystycznie istotny wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość betonów BII na rozciąganie. Test najmniejszej istotnej różnicy przy $\alpha = 0,05$ wykazał, że średnie wytrzymałości f_{ctm} betonów BII z kruszywem dolomitowym oraz bazaltowym są istotnie większe niż średnia wytrzymałość f_{ctm} betonu BII z kruszywem granitowym. Ponadto wykazano, że różnica pomiędzy średnią wytrzymałością na rozciąganie betonów BII z kruszywa dolomitowego oraz bazaltowego jest statystycznie nieistotna.

Korzystne wyniki wytrzymałości na rozciąganie betonów z kruszywem dolomitowym należy wiązać z potwierdzoną doświadczalnie (5, 6, 11, 12) dobrą przyczepnością zaczynu cementowego do kruszyw węglanowych. Korzystne wytrzymałości są również związane z dużą odpornością na pękanie tego kruszywa oraz fizykochemicznym wzajemnym oddziaływaniem węgla wapniowego i zaczynu cementowego, a głównie polegają na powstawaniu monokarboglinianu, zmniejszaniu porowatości i wielkości porów oraz ograniczaniu powstawania mikrospękań w warstwie kontaktowej, co jest bardzo ważne przy naprężeniach rozciągających.

Podana w normie PN-B-03264:2002 wartość wytrzymałości średniej na rozciąganie betonu jest określana na podstawie zależności $f_{ctm} = 0,3f_{ck,cyl}^{2/3}$ przyjętej również w Eurokodzie 2-1 (2003). Wszystkie trzy betony BI (B, D, GR) zostały uznane za betony zwykłe klasy C45/55 (B55), a według normy PN-B-03264:2002 i Eurokodu dla klasy B55 $f_{ctm} = 3,8$ MPa. Odpowiadające tej klasie betony zwykłe BI-B oraz BI-GR z kruszyw bazaltowego i granitowego, uznawane za najlepsze i często zalecane do konstrukcji specjalnych, na

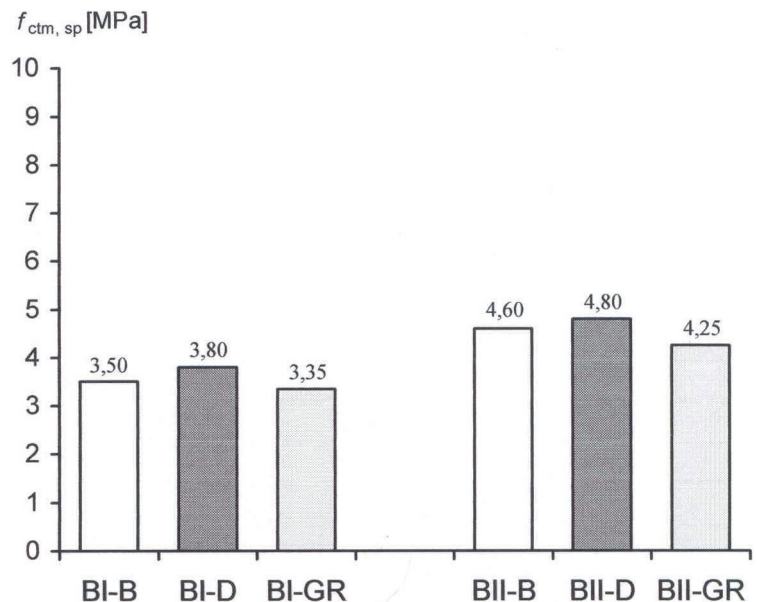
of hardened cement paste (composite matrix) with lowering the w/c -ratio up to 0.28 (much below 0.38) resulted in the reduction of contact zone width and porosity. It is therefore facilitated to relay stress between the matrix and filler resulting in aggregate grain fracture on sample crack surface. Aggregate strength and its strain properties are of greater importance when the w/c -ratio is low. Thus, the effect of aggregate mineral composition and contact zone on hpc strength is considerable.

Compressive strength values of all the three concretes BII meet the requirements of hpc, i. e. their 28-day characteristic compressive strength is not lower than that of the strength class C50/60 (B60). It should be underlined that it is much easier to produce hpc using aggregate from dense carbonate rocks than that from granite.

4.2. Tensile strength

Mean splitting tensile strength values indicate the most advantageous influence of dolomite aggregate. It was stated that the tensile strength of ordinary concrete ($w/c = 0.45$) with dolomite aggregate was 8 and 12% higher than those of concretes BI with granite and basalt aggregate, respectively (Fig. 4). As it was calculated with the variance analysis, the effect of coarse aggregate on splitting tensile strength of concretes BI was significant. Moreover, it was stated with the help of the lowest significant difference test that the f_{ctm} -value of dolomite concrete was significantly higher than those of both the concretes with other aggregates. But the mean tensile strength values of concretes with basalt and granite aggregates are not significantly different at $\alpha = 0,05$.

Among high performance concretes BII ($w/c = 0.28$), the highest splitting tensile strength was determined for the one with dolomite aggregate and a little lower when basalt aggregate was applied.



Rys. 4. Średnia wytrzymałość betonów zwykłych BI i wysokowartościowych BII na rozciąganie przy rozłupywaniu określona na próbkach walcowych $\phi 150/300$, po 28 dniach dojrzewania

Fig. 4. Mean splitting tensile strength of ordinary concretes BI ($w/c = 0.45$) and high performance concretes BII, after 28 days of hardening

przykład mostowych (2), osiągnęły niższe wytrzymałości średnie na rozciąganie, odpowiednio o 8% i 12%. Tylko wytrzymałość f_{ctm} betonu BI z kruszywa dolomitowego jest zgodna z wartością normową. Biorąc pod uwagę, że wszystkie betony BI są tej samej klasy należy stwierdzić, że przyjmowana w normie wytrzymałość na rozciąganie nie powinna być uzależniana wyłącznie od klasy betonu. Natomiast wpływ kruszywa na wytrzymałość BWW ($w/c = 0,28$) był tak duży, że beton BII-GR został zaliczony do niższej klasy (C60/75), a i tak jego wytrzymałość na rozciąganie (4,25 MPa) była niższa niż wymagana (4,40 MPa).

Wytrzymałość na rozciąganie betonu jest zależna od wielu czynników, w tym od rodzaju kruszywa grubego, co potwierdzają uzyskane w tej pracy wyniki, a także inne publikacje (7, 11, 13, 14). Wartości przedstawione w PN-B-03264:2002 są w przypadku wyższych klas zbyt wysokie. Zaprezentowane w tej pracy wyniki wykazują, że wytrzymałość betonu na rozciąganie może odbiegać znacznie od wartości normowych, szczególnie przy użyciu kruszywa gorszej jakości. Stąd wskazane jest przyjmowanie do obliczeń projektowych danych potwierdzonych doświadczalnie. Ponadto warto przypomnieć, że za pierwsze zarysowania i mikropęknięcia konstrukcji betonowych odpowiedzialna jest zbyt mała wytrzymałość betonu na rozciąganie. Toteż według autorów, dokonując wyboru betonu podczas projektowania i wykonywania, nie można zapomnieć o bardzo ważnym wpływie kruszywa grubego na wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Porównanie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie badanych betonów pokazano na rysunku 5. Dodatkowo przedstawiono stosunki f_{ctm}/f_{cm} poszczególnych betonów BI i BII. Ogólnie uznaje się, że proporcje między wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie betonów zwykłych mieszczą się w granicach 0,07-0,1, a w betonach wysokowartościowych obniżają się nawet do 0,05 (15). W badaniach stwierdzono, że proporcje f_{ctm}/f_{cm} dla betonów wysokowartościowych wynoszą 0,06, a dla betonów zwykłych 0,07 (rysunek 5). Mała różnica w proporcjach f_{ctm}/f_{cm} jest związana z dość wysokimi wytrzymałościami badanych betonów zwykłych i w konsekwencji mniejszym zróżnicowaniem wytrzymałości BI i BII. Również nie ma wyraźnych różnic w obliczonych na podstawie wyników badań wartościach f_{ctm}/f_{cm} w zależności od rodzaju stosowanego kruszywa grubego.

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następują-

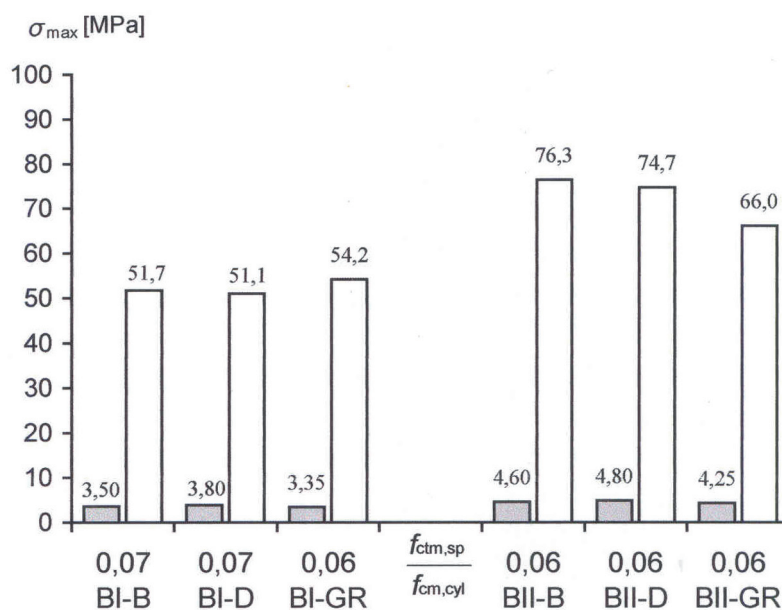
ce. Jednakże, wytrzymałości betonu z kruszywami dolomitowymi i bazaltowymi były wyższe o 8% i 13%, odpowiednio, niż w przypadku betonu BII z kruszywem granitowym (rysunek 4). Wykryto istotny wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość betonu na rozciąganie (przy $\alpha = 0,05$). Według testu najmniejszej różnicy, wytrzymałości betonu z kruszywami dolomitowymi i bazaltowymi nie różnią się istotnie, natomiast wartości dla obu są istotnie wyższe niż dla betonu z kruszywem granitowym.

Wyniki rozciągania betonu z kruszywami dolomitowymi i bazaltowymi są spowodowane dobrą adhezją między ziarnami kruszywa wapiennego i stwardniałym zaprawą cementową w strefach interfacjalnych stwierdzonych w wielu badaniach (5, 6, 11, 12, 13). Poprawione właściwości wytrzymałościowe betonu z kruszywami wapiennymi są również związane z jego wysoką odpornością na pęknięcia i/lub silną strefą interfacjalną wynikającą z korzystnych zmian fizykochemicznych w jego mikrostrukturze (częściowa dezorientacja kryształów portlanditu, obniżenie porowatości i średnic porów) i składu fazowego (tworzenie monokarbaloaminatu zamiast siarczoaluminatu). Wszystkie zmiany są bardzo ważne dla betonu pod wpływem naprężenia.

Wartość średniej wytrzymałości na rozciąganie betonu jest szacowana w standardzie PN-B-03264:2002 i Eurocode 2-1 z wyrażenia $f_{ctm} = 0,3f_{ck,cyl}^{2/3}$. Wszystkie trzy betony BI (B, D i GR) zostały uznane za zwykłe (normalne) betony klasy wytrzymałościowej C45/55 (B55), a dla tej klasy: $f_{ctm} = 3,8$ MPa. Choć oba betony BI-B i BI-GR wykonane z kruszywa bazaltowego i granitowego (znane jako najlepsze często zalecane dla specjalnych konstrukcji (2), np. mostów) spełniają wymagania klasy C45/55 bez rezerwy, ich wartość średniej wytrzymałości na rozciąganie jest 8% i 12% niższa niż 3,8 MPa, odpowiednio. Beton BI-D z kruszywem dolomitowym był jedynym betonem, którego wytrzymałość na rozciąganie była zgodna z wymaganiami normy (4,40 MPa).

Wartość średniej wytrzymałości na rozciąganie betonu BII-GR została obniżona do klasy C60/75, a jego wytrzymałość na rozciąganie (4,25 MPa) była niższa niż wymagana (4,40 MPa). Wyniki rozciągania betonu z kruszywami dolomitowymi i bazaltowymi są spowodowane dobrą adhezją między ziarnami kruszywa wapiennego i stwardniałym zaprawą cementową w strefach interfacjalnych stwierdzonych w wielu badaniach (5, 6, 11, 12, 13). Poprawione właściwości wytrzymałościowe betonu z kruszywami wapiennymi są również związane z jego wysoką odpornością na pęknięcia i/lub silną strefą interfacjalną wynikającą z korzystnych zmian fizykochemicznych w jego mikrostrukturze (częściowa dezorientacja kryształów portlanditu, obniżenie porowatości i średnic porów) i składu fazowego (tworzenie monokarbaloaminatu zamiast siarczoaluminatu). Wszystkie zmiany są bardzo ważne dla betonu pod wpływem naprężenia.

Wytrzymałość na rozciąganie betonu BII-GR została obniżona do klasy C60/75, a jego wytrzymałość na rozciąganie (4,25 MPa) była niższa niż wymagana (4,40 MPa).



Rys. 5. Porównawcze zestawienie wartości f_{ctm} i $f_{cm,cyl}$ w betonach BI i BII

Fig. 5. Comparison of strength values f_{ctm} and $f_{cm,cyl}$ of concretes BI and BII

ce wnioski:

- kruszywa dolomitowe pozwalają na uzyskanie betonu wysokowartościowego o wytrzymałości 85 MPa bez stosowania pyłu krzemionkowego,
- uzyskanie bez pyłu krzemionkowego betonów o wysokiej wytrzymałości, odpowiadającej betonom BWW okazało się łatwiejsze przy użyciu kruszywa dolomitowego,
- wyraźnie wyższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu osiągnęły betony zwykły i wysokowartościowy z kruszywa dolomitowego w porównaniu do wytrzymałości f_{ctm} betonów z kruszywem granitowym i bazaltowym,
- wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość betonu na ściskanie jest bardziej wyraźny przy niskich wartościach w/c,
- w praktyce inżynierskiej wartość wytrzymałości na rozciąganie nie powinna być uzależniana wyłącznie od klasy betonu; trzeba także uwzględnić wyniki pomiarów pokazujących wpływ kruszywa.

Literatura / References

1. K. Flaga, Beton jako kompozyt, Konf. Beton na progu nowego milenium, str. 19, Polski Cement, Kraków 2000.
2. W. Kurdowski, Chemia cementu, PWN, Warszawa 1991.
3. J. Mierzwa, Niektóre aspekty wpływu kruszywa na właściwości wytrzymałościowe, Konf. Beton na progu nowego milenium, str. 85, Polski Cement, Kraków 2000.
4. P. K. Mehta, Concrete-Structure, Properties and Materials, Prentice Hall, New Jersey, 1983.
5. B. D. Barnes, S. Diamond, W. L. Dilch, J. Amer. Cer. Soc., Vol. 62 (1979).
6. J. Grandet, J. P. Ollivier, 7th ICCO Orientation des hydrates au contact des granulés, Vol. 3, VII-63/68, Paris 1980.
7. A. M. Neville, Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
8. D. M. Roy, W. Jiong, 9th ICCO Vol. 6, Poster Session, New Delhi, 1992.
9. E. Niedokos, Zastosowania rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej, Wydawnictwo AR, Lublin 1995.
10. David J. Sheskin, Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures, CRC Press 1997.
11. J. Piasta, Badanie kruszyw węglanowych z województwa kieleckiego i ich zastosowanie do betonów konstrukcyjnych, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1971.
12. D. M. Roy, C. A. Langton, Morphology and Microstructure of Cement Paste-Rock Interfacial Regions, 7th ICCO, Vol. 3, VII-127, Paris 1980.
13. P.-C. Aitcin, P. K. Mehta, ACI Mat. Jour., March-April 1990.
14. J. Piasta, W. G. Piasta, Beton zwykły. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.
15. L. Kucharska, A. M. Brandt, Inżynieria i Budownictwo nr 9, str. 356 (1993).

concrete depends on many factors and among them on coarse aggregate, which was also stressed in some references (7, 11, 13, 14). The splitting tensile strength values in PN-B-03264:2002 are overestimated for better strength classes. The experimental results presented in this study suggest that the standard values of mean splitting tensile strength may be lowered, particularly when the coarse aggregate is not of the best quality. Therefore it is recommended to use experimental results while designing concrete structures. Also it is worth remembering and stressing that the first microcrackings, cracks and defects of concrete structures are related to low tensile strength but not to the compressive one. Irreversible occurrence of any cracks or even imperceptible microcrackings lowers concrete structure durability considerably. The significant influence of coarse aggregate on concrete tensile strength should be taken into account before choosing concrete to design a structure.

The comparison of strength values f_{ctm} and $f_{ctm,cyl}$ for concretes is shown in Fig. 5. Additionally the values of their f_{ctm}/f_{cm} -ratio of concretes BI and BII are presented. Generally the ratio is assessed for ordinary concretes at the level between 0.07 and 0.1 and for hpc only a little above 0.05 (15). The f_{ctm}/f_{cm} -ratio determined in the experiment for hpcs equals, on the average, 0.06 and for ordinary concretes 0.07. An insignificant difference between the ratio values is a consequence of rather high strength of ordinary concretes. Also the ratios do not depend significantly on coarse aggregates tested.

5. Conclusions

The following conclusions based on the results and discussion can be formulated:

- it is definitely possible to produce high performance concretes (silica fume free) using native carbonate aggregate,
- it was easier to make high performance concrete (silica fume free) of proper strength, applying dolomite aggregate instead of granite one,
- the splitting tensile strength f_{ctm} of ordinary and high performance concretes with dolomite aggregate was found to be significantly higher than those of concretes with basalt and granite aggregates due to inherent high cracking resistance of dolomite particles and/or good adhesion and strong interfacial zone,
- the effect of coarse aggregate on the compressive strength of silica fume free concrete increases when the strength is higher,
- in engineering practice, the f_{ctm} value is usually determined on the ground of compressive standard strength, but it is necessary to take into account the effect of the kind and mineral composition of aggregate on concrete tensile strength which was supported with the test results as seen above.