

Odkształcalność doraźna betonów wysokowartościowych z kruszywami łamanymi

Jacek Góra

*Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: j.gora@pollub.pl*

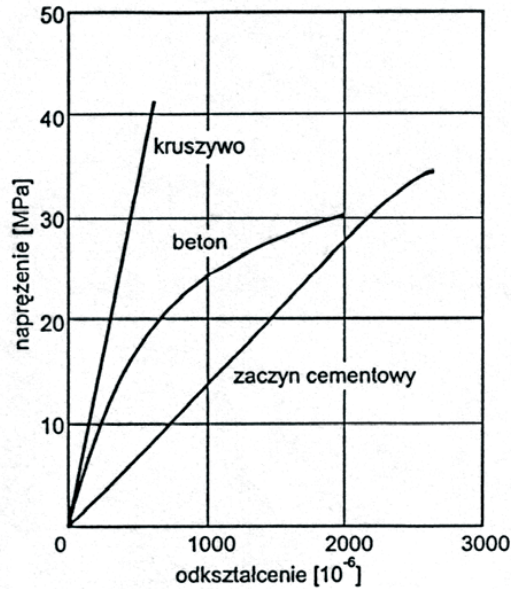
Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań betonów wysokowartościowych o wartości w/c wynoszącej 0,28. Badano odkształcalność doraźną betonów w zakresie modułu sprężystości, współczynnika Poisson'a oraz odkształcenia granicznego przy maksymalnym naprężeniu. Czynnikiem zmiennym w badaniach było rodzaj kruszywa grubego: grys bazaltowy, dolomitowy i granitowy. Wyniki badań poddano testom statystycznym – jednoczynnikowej analizie wariancji i testowi najmniejszej istotnej różnicy. Stwierdzono istotny wpływ rodzaju kruszywa grubego na badane cechy odkształceniowe betonów wysokowartościowych.

Słowa kluczowe: beton wysokowartościowy, kruszywo łamane, zależność $\sigma - \varepsilon$, moduł sprężystości, współczynnik Poissona, odkształcenie graniczne ε_{c1} przy maksymalnym naprężeniu, jednoczynnikowa analiza wariancji, test NIR.

1. Wprowadzenie

Ze względu na wymagane właściwości mechaniczne betonów typu BWW, istotnymi parametrami kruszywa grubego są moduł sprężystości i wytrzymałość wynikające ze składu mineralnego i tekstury, dobra przyczepność do zaprawy, nasiąkliwość poniżej 3%, zmniejszenie wielkości największych ziaren w celu redukcji koncentracji naprężeń [1].

Do charakterystyk opisujących odkształcalność doraźną betonu zalicza się przebieg zależności $\sigma_c - \varepsilon_c$, moduł sprężystości oraz współczynnik odkształcenia poprzecznego (*Poissona*). Wśród czynników wpływających w sposób istotny na właściwości odkształceniowe betonu wymienia się między innymi rodzaj stosowanego kruszywa grubego. Beton charakteryzuje się krzywoliniowym przebiegiem krzywej $\sigma_c - \varepsilon_c$. Natomiast w przypadku kruszywa i zhydratyzowanego zaczynu cementowego zależność naprężeń i odkształceń prawie w całym zakresie jest liniowa (Rys. 1).



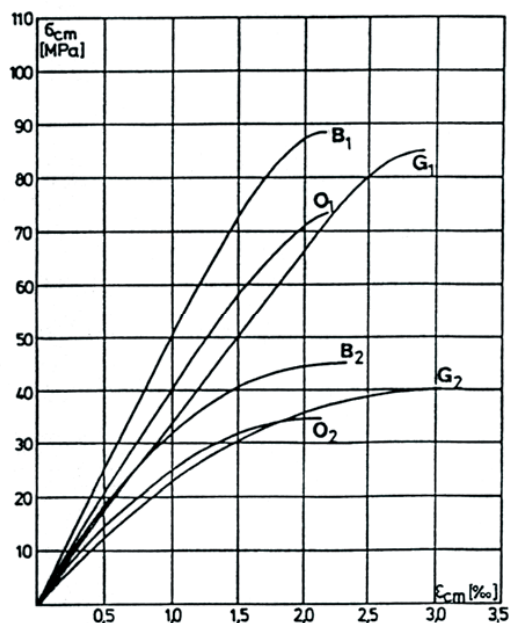
Rys. 1. Zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ w zhydratyzowanym zaczynie cementowym, kruszywie i betonie [2].
 Fig. 1. The $\sigma_c - \varepsilon_c$ relation of hydrated cement paste, aggregate and concrete [2].

Przyczyną krzywoliniowej zależności $\sigma_c - \varepsilon_c$ w przypadku betonu, jako materiału kompozytowego, jest obecność stref kontaktowych pomiędzy zaczynem cementowym i kruszywem oraz rozwój w tych obszarach mikrorys o rozwarciu rosnącym wraz z naprężeniem [2]. Charakterystyka powstawania mikrozarysowań w strefie kontaktowej pozostaje w bezsprzecznej zależności od przyczepności kruszywo-zaczyn cementowy. Na podstawie wyników licznych badań, również przytoczonych poniżej, wskazano na wysoce istotny wpływ rodzaju kruszywa (uwzględniając między innymi skład mineralny, wielkość ziaren, szorstkość powierzchni, porowatość) na odkształcalność betonu.

Ogólnie uznaje się, że do betonów wysokowartościowych należy stosować kruszywa zwykle bardzo dobrej jakości, przy czym nie tylko wytrzymałość ziaren kruszywa ma istotne znaczenie, lecz również przyczepność do zaczynu cementowego. Stwierdzono, że charakterystyka mineralna kruszywa grubego ma wpływ na wytrzymałość otrzymywanego betonu, ale brak jest prostych wytycznych dotyczących wyboru kruszywa [3]. Kruszywa pochodzące ze skał magmowych lub osadowych węglanowych o wytrzymałości powyżej 100-120 MPa mogą być przydatne także do betonów wysokiej wytrzymałości [4, 5]. Pogląd ten w przypadku kruszyw węglanowych wymaga potwierdzenia na drodze doświadczalnej, gdyż dotąd nie opublikowano szerszych wyników badań betonów wysokowartościowych wykonywanych z tego typu rodzimych kruszyw, a także biorąc pod uwagę fakt, iż nie ma w tej tematyce zgodności wśród badaczy. Liczne przykłady wyników badań zagranicznych [2, 6, 7, 8, 9, 10] potwierdzają jednak przydatność kruszyw węglanowych do betonów konstrukcyjnych wysokiej jakości, w tym betonów wysokowartościowych o bardzo dobrych parametrach użytkowych. Obszerne zasoby rodzimych wapieni i dolomitów zbitych o właściwościach nie ustępujących kruszywom ze skał magmowych oraz korzystnie aktywnych chemicznie wobec zaczynu cementowego, dają

podstawy do prowadzenia badań nad wykorzystaniem tych kruszyw do wykonywania betonów wysokowartościowych. Zdaniem niektórych badaczy [11] wśród skał używanych do produkcji kruszywa do betonów ze względu na korzystne właściwości wyróżniają się właśnie skały węglanowe o zwartej strukturze i bazalty.

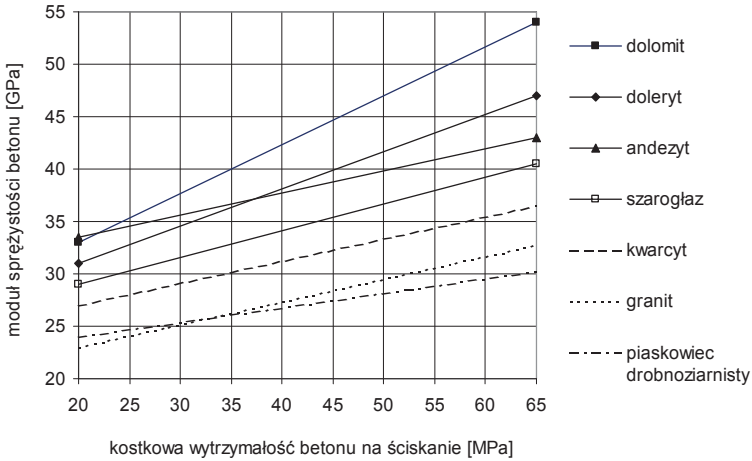
W krajowych badaniach odkształcalności doraźnej betonów z różnymi kruszywami stwierdzono między innymi istnienie zależności pomiędzy wartością granicznych odkształceń ε_{c1} odpowiadających maksymalnemu naprężeniu a rodzajem kruszywa grubego stosowanego do betonu (Rys. 2). Badaniom poddano betony wysokiej ($w/s = 0,24$, Pk – 10%, Sp – 3%) oraz średniej wytrzymałości ($w/c = 0,52$, bez dodatków i domieszek) z trzema kruszywami: bazaltowym, granitowym i otoczakowym (kwarcytowym). W obydwu grupach betonów najwyższe wartości odkształceń ε_{c1m} wynoszące około 3,0‰ otrzymano w przypadku kruszywa granitowego, natomiast w betonach z kruszywem bazaltowym około 2,5‰, a z kruszywem otoczakowym nieco ponad 2,0‰. Zbliżone wartości odkształceń przy najwyższym naprężeniu pomiędzy betonami zwykłymi i BWW z tych samych kruszyw, przeczą hipotezie, co podkreślają autorzy badań, że wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu maleją graniczne odkształcenia ε_{c1} [12].



Rys. 2. Zależność $\sigma_{cm} - \varepsilon_{cm}$ w betonach średniej (2) i wysokiej wytrzymałości (1) z różnymi kruszywami [12]: B – bazaltowe, G – granitowe, O – otoczakowe.

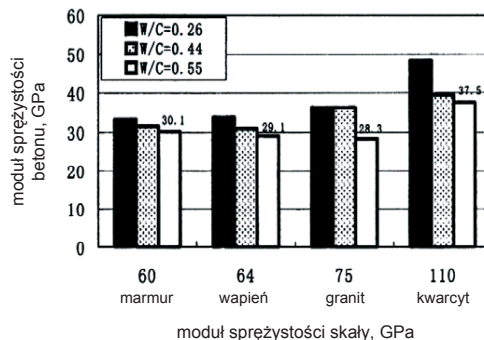
Fig. 2. The $\sigma_{cm} - \varepsilon_{cm}$ relation of normal (2) and high-strength (1) concretes with various aggregates [12]: B – basalt, G – granite, O – gravel.

Kuczyński [13] powołując się na wyniki badań zagranicznych odkształcalności granicznej betonu w zależności od składu mineralnego kruszywa (granit, porfir, diabaz, bazalt, wapień, kwarc, żwir) podaje, że przy największej wytrzymałości na rozciąganie betonu z kruszywem wapiennym jego wydłużalność jest najmniejsza. Natomiast największą wydłużalność wskazuje w przypadku betonu z kruszywem porfirowym.



Rys. 3. Wpływ rodzaju kruszywa na moduł sprężystości betonu (wg Alexandra [14]).
Fig. 3. The effect of aggregate type on modulus of elasticity of concrete (after Alexander [14]).

Różnice w wartościach modułu sprężystości w zależności od rodzaju kruszywa grubego mogą być dość znaczne (Rys. 3). W dużej mierze są wynikiem różnic w składzie mineralnym i modułach sprężystości skał, z których otrzymywane są kruszywa (Rys. 4), a także właściwości ziaren kruszywa decydujących o jego przyczepności do zaczynu cementowego. Piasta [15] na podstawie przeprowadzonych badań ustalił, że moduł sprężystości betonów z kruszywem łamanym jest wyższy o 10-30% od modułu sprężystości betonu tej samej klasy z kruszywem żwirowym, uznając za czynnik decydujący gorszą przyczepność do zaczynu ziaren kruszywa otoczakowego. Wśród betonów z kruszywami łamanymi najwyższe wartości E_{cm} osiągnięto w przypadku betonu z kruszywem bazaltowym, niższe o około 10% z kruszywem diabazowym, dolomitowym i wapiennym, a jeszcze niższe (o około 20%) z kruszywem granitowym i porfirowym.

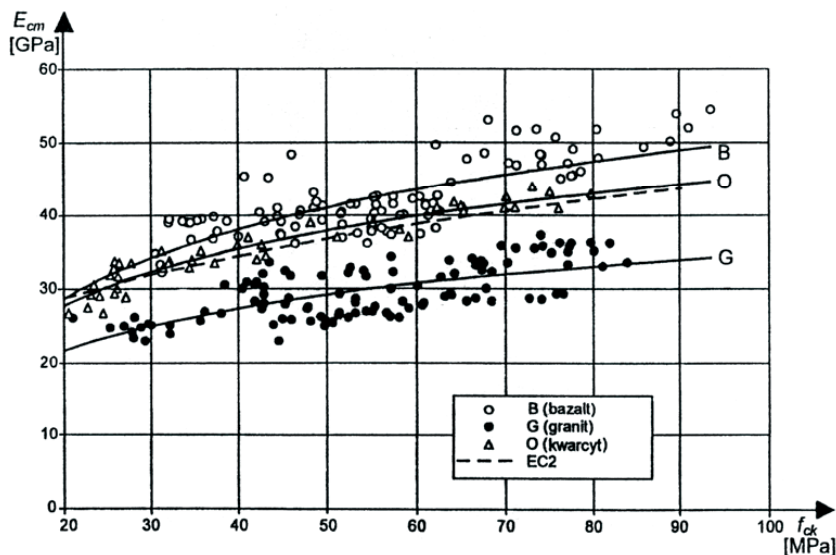


Rys. 4. Zależność pomiędzy modułem sprężystości betonów i skał z których otrzymano kruszywa łamane przy różnych wartościach w/c [9].

Fig. 4. The relation between modulus of elasticity of concretes and rocks which were used to made crushed aggregates for the various w/c [9].

Zdaniem Ajdukiewicza i współautorów [12, 16] rzeczywiste moduły sprężystości betonów mogą odbiegać od podanych normowych wartości obliczeniowych nawet o $\pm 25\%$ w zależności od rodzaju stosowanego kruszywa. Wśród betonów

wyższych klas największymi wartościami modułu sprężystości charakteryzują się betony z kruszywem bazaltowym (rys. 5), niższymi o kilka do kilkunastu procent betony z kruszywem kwarcytowym lub dolomitowym, a jeszcze niższymi (nawet ponad 20%, choć z dużymi rozrzutami) z kruszywem granitowym. Zdaniem autorów, dostępne w Polsce łamane kruszywa granitowe są stosunkowo niskiej wytrzymałości, a moduł sprężystości betonów z tymi kruszywami jest niższy od wartości normowych (Rys. 5) [16].



Rys. 5. Wyniki badań siecznego modułu sprężystości E_{cm} betonów zwykłych i wysokowartościowych w zależności od rodzaju kruszywa [16].

Fig. 5. The modulus of elasticity E_{cm} test results of normal and high performance concretes depending on the different types of aggregates [16].

Wartość współczynnika odkształcenia poprzecznego ν_c (Poissona) jest istotnie zależna od właściwości kruszywa grubego i na ogół mieści się w zakresie od 0,15 do 0,22. Zaznacza się jednak, że rozpoznanie doświadczalne w zakresie czynników wpływających na wartość współczynnika Poissona jest niewielkie [2]. W badaniach krajowych wyznaczono współczynniki odkształcenia poprzecznego betonów wysokowartościowych o wytrzymałości na ściskanie do 80 MPa i w zakresie naprężeń ściskających odpowiadających badaniu siecznego modułu sprężystości [16]. Uzyskane w tych badaniach wartości ν_c zestawiono poniżej:

- beton z kruszywem bazaltowym – $0,20 \div 0,21$,
- beton z kruszywem otoczkowym, kwarcytowym – $0,17 \div 0,18$,
- beton z kruszywem granitowym – $0,15 \div 0,16$.

W normie PN-EN 1992-1-1:2008 [17] zaleca się przyjmowanie stałej wartości współczynnika Poissona wynoszącej $\nu_c = 0,20$.

2. Badania własne

Odkształcalność betonów pod doraźnym obciążeniem ściskającym analizowano na podstawie wyników badań modułu sprężystości E_c , współczynnika odkształcenia

poprzecznego v_c oraz odkształceń granicznych ε_{c1} odpowiadających maksymalnym naprężeniom. W pomiarach modułu sprężystości oraz współczynnika rozszerzalności poprzecznej przyjęto zakres naprężeń od 0,5 MPa do $0,4f_{cm}$. Podane wartości średnie w każdym przypadku określono na podstawie wyników uzyskanych z 6 próbek walcowych $\varnothing 150/h300$ mm. Badaniom poddano trzy betony o $w/c = 0,28$ wykonane z grysami bazaltowym, dolomitowym i granitowym. Szczegółowe charakterystyki i składy mieszanek betonowych zamieszczono w artykule [18]. W Tabelach 1, 2 oraz 3 przedstawiono wyniki badań własnych.

Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wykazały statystycznie istotny wpływ stosowanych kruszyw na każdą z trzech rozważanych wielkości.

3. Analiza wyników badań

Różnice w wartościach modułów sprężystości betonów BWW z kruszywem bazaltowym oraz dolomitowym są nieznaczne i nie przekraczają 2%, na korzyść betonu BWW-D. Natomiast wyraźnie mniejszą wartością E_{cm} charakteryzuje się beton z kruszywem granitowym, w odniesieniu do betonu BWW z kruszywem bazaltowym, aż o 26%. Potwierdzają te zależności wyniki testu NIR, a wskazane różnice są istotne nawet przy $\alpha = 0,001$.

Wpływ kruszywa grubego na moduł sprężystości betonu zaznaczano niejednokrotnie w literaturze, podkreślając, że nie można uzależniać wartości E_c tylko od wytrzymałości na ściskanie betonu. Podobne uwagi można wywnioskować z rezultatów badań własnych. W porównaniu do betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym statystycznie istotnie mniejsze wartości E_{cm} określono w betonie z kruszywem granitowym. Z kolei odnosząc się do wyników badań modułu sprężystości betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym, należy te wielkości traktować równorzędnie, na co jednoznacznie wskazują wyniki testu najmniejszej istotnej różnicy (Tabela. 1).

Tabela 1. Moduł sprężystości E_{cm} , współczynnik zmienności v oraz wyniki testu NIR betonów o $w/c = 0,28$.

Table 1. Modulus of elasticity E_{cm} , coefficient of variation v and LSD test's results of $w/c = 0,28$ concretes.

	E_{cm}	[GPa]	oznaczenie betonu		
			BWW - B	BWW - D	BWW - GR
moduł sprężystości			47,6	48,2	35,0
	v	[%]	7,1	9,3	9,1
klasa betonu			C70/85	C70/85	C60/75
wyniki p testu NIR dla modułów sprężystości betonów BWW					
BWW - B			–	0,76	$3,5 \times 10^{-5}$
BWW - D			0,76	–	$2,0 \times 10^{-5}$
BWW - GR			$3,5 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	–

Uwaga: w tablicy pogrubioną czcionką zaznaczono wartości $p < 0,05$.

W Tabeli 2 zestawiono średnie wartości współczynników odkształcenia poprzecznego badanych betonów. Wyniki analizy wariancji oraz testu NIR wskazują

statystycznie istotny wpływ kruszyw grubych na osiągnięte wartości v_{cm} w badanych betonach wysokowartościowych. Statystycznie istotne różnice dotyczą wszystkich trzech porównywanych betonów.

Tabela 2. Współczynnik Poisson'a v_{cm} , współczynnik zmienności v oraz wyniki testu NIR betonów o $w/c = 0,28$.

Table 2. Poisson ratio v_{cm} , coefficient of variation v and LSD test's results of $w/c = 0,28$ concretes.

		oznaczenie betonu		
		BWW - B	BWW - D	BWW - GR
współczynnik Poisson'a	v_{cm}	0,21	0,22	0,17
	v [%]	6,2	4,0	5,2
klasa betonu		C70/85	C70/85	C60/75
wyniki p testu NIR dla współczynników Poisson'a betonów BWW				
BWW - B		—	0,034	1,1x10 ⁻⁵
BWW - D		0,034	—	2,8x10 ⁻⁷
BWW - GR		1,1x10 ⁻⁵	2,8x10 ⁻⁷	—

Uwaga: w tablicy pogrubioną czcionką zaznaczono wartości $p < 0,05$.

W badaniach własnych betonów BWW z kruszywem bazaltowym i granitowym uzyskano wartości v_{cm} zbliżone do wyników badań betonów wysokowartościowych z zastosowaniem rodzimych kruszyw przedstawionych w pracy [16]. Natomiast beton BWW z kruszywem dolomitowym charakteryzuje się nieznacznie wyższym współczynnikiem *Poissona* w stosunku do BWW z kruszywem bazaltowym, przy czym obydwa otrzymane wyniki nieznacznie przekraczają zalecaną przez PN-EN 1992-1-1 [17] wartość v_c betonu niezarysowanego wynoszącą 0,20.

Wartości odkształceń granicznych ε_{c1m} odpowiadających maksymalnym naprężeniom (Tabela 3) wskazują na wyraźnie odmienne zachowanie się pod doraźnym obciążeniem ściskającym betonów z kruszywem granitowym w porównaniu do zbliżonej odkształcalności betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym.

Tabela 3. Odkształcenie graniczne ε_{c1m} , współczynnik zmienności v oraz wyniki testu NIR betonów o $w/c = 0,28$.

Table 3. Limiting strain ε_{c1m} , coefficient of variation v and LSD test's results of $w/c = 0,28$ concretes.

		oznaczenie betonu		
		BWW - B	BWW - D	BWW - GR
odkształcenie graniczne przy maksymalnym naprężeniu	ε_{c1m} [‰]	2,30	2,22	2,76
	v [%]	8,3	6,3	4,3
klasa betonu		C70/85	C70/85	C60/75
wyniki p testu NIR dla odkształceń granicznych ε_{c1} betonów BWW				
BWW - B		—	0,375110	0,000104
BWW - D		0,375110	—	0,000019
BWW - GR		0,000104	0,000019	—

Uwaga: w tablicy pogrubioną czcionką zaznaczono wartości $p < 0,05$.

Wyniki testu NIR wskazują, że w przypadku największej wartości odkształcenia ε_{clm} betonu BWW z kruszywem granitowym, w porównaniu do pozostałych badanych betonów, różnice są statystycznie istotne. Z kolei porównując wartości odkształceń ε_{clm} betonów BWW -B oraz BWW-D, są one statystycznie nieistotne. W porównaniu do przyjętych w normie PN-EN 1992-1-1 [17] wartości odkształcenia ε_{cl} w zależności od klasy betonu, określone w badaniach wartości są w przypadku betonów BWW-B i BWW-D mniejsze o odpowiednio 15% i 18%, a w przypadku betonu BWW-GR większe o 6%. Należy zatem przyjąć, że również wpływ rodzaju kruszywa grubego na wartości odkształceń ε_{cl} jest równie znaczący, jak w przypadku modułów sprężystości. Jednak w normie PN-EN 1992-1-1 [17] tylko w odniesieniu do modułów sprężystości zaleca się uwzględnianie wpływu tego czynnika technologicznego na przyjmowane do obliczeń wartości.

4. Wnioski

1. Na podstawie wyników badań własnych, poddanych testom analizy wariancji i najmniejszej istotnej różnicy, stwierdzono istotny wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność doraźną betonów wysokowartościowych, analizowaną na podstawie modułów sprężystości, współczynników odkształcenia poprzecznego oraz odkształcenia granicznego przy maksymalnym naprężeniu.
2. W przypadku wszystkich rozważanych właściwości odkształceniowych uznano, że betony wysokowartościowe z kruszywami bazaltowym i dolomitowym należy traktować równorzędnie, natomiast beton wysokowartościowy z kruszywem granitowym charakteryzuje się znacząco, co wykazano za pomocą analizy statystycznej, gorszymi właściwościami.
3. W aspekcie uzyskanych wyników badań własnych, a także podawanych w literaturze, warto rozważyć, czy tylko w przypadku modułów sprężystości powinien być uwzględniany wpływ rodzaju kruszywa grubego na wartości normowe przyjmowane do obliczeń.

Literatura

- [1] Kucharska L., Brandt A. M., *Skład, technologia i właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych*, Inżynieria i Budownictwo nr 9/93.
- [2] Neville A. M., *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
- [3] Aitcin P. C., Mehta P. K., *Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 87/1990.
- [4] Mierzwa J., *Niektóre aspekty wpływu kruszywa na właściwości wytrzymałościowe betonów*, Konferencja „Beton na progu nowego milenium”, Polski Cement, Kraków 2000.
- [5] Piasta J., Piasta W., *Kruszywa a betony wysokiej wytrzymałości*, Przegląd Budowlany nr 8-9/1992.
- [6] Alexander M. G., *Aggregates and the deformation properties of concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 93/1996.
- [7] Donza H., Cabrera O., Irassar E. F., *High-strength concrete with different fine aggregate*, Cement and Concrete Research, Vol. 32/2002.
- [8] Sengul Ö., Tasdemir C., Tasdemir M., *Influence of aggregate type on mechanical behavior of normal- and high-strength concretes*, ACI Materials Journal, Vol. 99/2002.

- [9] Wu K.-R., Chen B., Yao W., Zhang D., *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 31/2001.
- [10] Zhon F. P., Lydon F. D., Barr B. I. G., *Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 25/1995.
- [11] Piasta J., Piasta W. G., *Beton zwykły*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.
- [12] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., *Odkształcalność doraźna betonów wysokiej wytrzymałości*, XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, t. 4, Poznań-Krynica 1998.
- [13] Bukowski B., Kuczyński W., *Budownictwo betonowe, t. I, cz. 1 i 2*, Arkady, Warszawa 1972.
- [14] Alexander M. G., *Fracture energies of interfaces between cement paste and rock, and application to the engineering behaviour of concrete*, Proceedings International RILEM Conference, Noordwijk, Netherlands, E & FN Spon, London 1991.
- [15] Piasta J., *Badanie kruszyw węglanowych z województwa kieleckiego i ich zastosowanie do betonów konstrukcyjnych*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1971.
- [16] Ajdukiewicz A., Węglorz M., *Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone”*. Beton., Część podstawowa, Tom I, ITB, Warszawa 2003.
- [17] PN-EN 1992-1-1:2008 *Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
- [18] Góra J., *Właściwości wytrzymałościowe betonów wysokowartościowych z kruszywem węglanowym*, Budownictwo i Architektura 2/2011.

Instantaneous deformability of high performance concretes with crushed aggregates

Jacek Góra

*Department of General Construction, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: j.gora@pollub.pl*

Abstract: The test results presented concern high performance concretes of the w/c ratio 0,28. There have been examined the modulus of elasticity, Poisson's ratio and limiting strain at the highest compressive stress. The variable factor in the studies is the type of coarse aggregate: crushed basalt, dolomite and granite. The results of the research have been tested statistically – the one-way ANOVA and the LSD test. There is stated the significant influence of aggregate on the tested deformation properties of high performance concretes.

Keywords: high performance concrete, crushed aggregate, relation $\sigma - \varepsilon$, modulus of elasticity, Poisson's ratio, limiting strain ε_{c1} at the highest compressive stress, one-way ANOVA, LSD test.

