

Moduł sprężystości betonów z kruszywami łamanymi z polskich i ukraińskich skał magmowych

Waldemar Budzyński¹, Jacek Góra², Wojciech Piasta³, Tadeusz Turkiewicz⁴

^{1,2} *Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: ¹w.budzynski@pollub.pl; ²j.gora@pollub.pl*

³ *Zakład Technologii Betonu i Prefabrykacji, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl*

⁴ *Instytut Nauk Technicznych i Lotnictwa, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie, e-mail: turkiewicz@pwsz.chelm.pl*

Streszczenie: Przedstawiane wyniki badań dotyczą modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie betonów zwykłych z różnymi kruszywami grubymi. Analizowane są także wyniki badań kruszyw (3 łamanych granitowych, 3 bazaltowych, granodiorytowego i naturalnego żwiru). Czynnikiem zmiennym w badaniach jest rodzaj kruszywa grubego. Na podstawie analiz regresji i korelacji stwierdzono statystycznie istotny wpływ wskaźnika rozkruszenia kruszywa na moduł sprężystości betonu w przeciwieństwie do nieistotnego wpływu wytrzymałości betonu na moduł. W przypadku 4 betonów: z 2 granitami polskimi, granitem ukraińskim oraz bazaltem ukraińskim, stwierdzono mniejsze wartości modułów sprężystości w porównaniu z odpowiednimi wartościami normowymi.

Słowa kluczowe: beton, moduł sprężystości, kruszywo grube, granit, bazalt, granodioryt

1. Wprowadzenie

Ważnymi czynnikami kształtującymi właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe betonu są przyczepność pomiędzy zaczynem cementowym a ziarnami kruszywa grubego oraz mikrostruktura warstwy przejściowej, w obszarze, której pod obciążeniem występuje koncentracja naprężeń z powodu różnicy modułów sprężystości stwardniałego zaczynu cementowego i kruszywa [1]. Ze względu na rodzaj zastosowanego kruszywa różnica ta, jak i przyczepność mogą się zmieniać w betonach o tym samym składzie ilościowym. Dlatego wpływ rodzaju kruszywa grubego na właściwości odkształceniowe jest zwykle znaczący [2,3,4,5]. W związku z tym, że moduł sprężystości charakteryzuje odkształcalność betonu poniżej lub na poziomie naprężenia inicjującego (pierwszego naprężenia krytycznego), wyznaczającego rozpoczęcie powstawania nowych mikrorys pod obciążeniem doraźnym, wpływ przyczepności zaczynu do kruszywa na moduł sprężystości może być istotniejszy niż jego wpływ na wytrzymałość betonu [6]. Ponadto należy pamiętać, że kruszywo grube zajmuje około połowy objętości betonu, dlatego odkształcalność betonu pod obciążeniem jest także bezpośrednio związana z właściwościami mechanicznymi kruszywa.

Ze względu na niedobór we wschodnich regionach Polski kruszyw grubych ze skał magmowych o uniwersalnym przeznaczeniu, w tym do wykonywania betonów drogowych i mostowych, kruszywa te zaczęto importować ze złóż w zachodniej Ukrainie. Jakość i przydatność kruszyw ukraińskich do betonów należy zbadać i sprawdzić, czy mogą zastąpić odpowiednie kruszywa polskie.

2. Materiały i metodyka badań

Badaniom poddano 7 grubych kruszyw łamanych ze skał magmowych i jedno żwirowe. Cztery kruszywa pochodziły z południowo-zachodniej Polski – bazalt z Winnej Góry k. Piotrowic, bazalt z Gracze, granit z Siedlimowic k. Strzegomia i granit z Granicznej k. Strzegomia. Trzy kruszywa pochodziły z zachodniej Ukrainy – bazalt z kopalni Iwaniczki, granit z kopalni Vyryvskij Karjer oraz granodioryt z kopalni Klesov. Ponadto porównawczo zastosowano kruszywo naturalne otoczkowe z KSM Suwałki. Kruszywa badano w zakresie gęstości objętościowej, wytrzymałości na miążdżenie (określono wartości wskaźników rozkruszenia), zawartości ziaren nieforemnych oraz zawartości pyłów mineralnych [8]. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek naturalny, płukany z KSM Suwałki. Dla piasku wykonano badania gęstości objętościowej i zawartości pyłów mineralnych, które wyniosły odpowiednio 2,65 kg/dm³ i 0,43%. Z każdym z badanych kruszyw wykonano beton o współczynniku w/c = 0,55. Ze względu na różne gęstości objętościowe stosowanych kruszyw grubych przyjęto zasadę zachowania stałej objętości składników w każdym betonie. Stosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R. Skład mieszanek betonowych podano w tabeli 1.

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych

składniki betonu	oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)							
	bazalt PL (Winna Góra)	bazalt PL (Gracze)	bazalt UA (Iwaniczki)	granit PL (Siedlimowice k.Strzegomia)	granit PL (Graniczna k.Strzegomia)	granit UA (Vyryvskij Karjer)	granodioryt UA (Klesov)	żwir PL (KSM Suwałki)
cement, kg/m ³	350							
kruszywo 2÷8 mm, kg/m ³	644	657	626	569	578	580	576	576
kruszywo 8÷16mm, kg/m ³	644	657	626	569	578	580	576	576
piasek, kg/m ³	681							
woda, dm ³ /m ³	193							

Z każdego betonu wykonano 6 próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm (3 przeznaczono do badania wytrzymałości na ściskanie, 3 do badania modułu sprężystości betonu). Próbki zbadano po 28 dniach dojrzewania w wodzie. Górne powierzchnie próbek oszlifowano, uzyskując gładkość i równoległość podstaw.

3. Analiza wyników badań

3.1. Kruszywa

Na podstawie wyników badań wytrzymałości na miążdżenie (tab. 2), polskie kruszywa granitowe sklasyfikowano do najniższej marki - 20, natomiast pozostałe kruszywa jako najwyższej jakości w swojej klasie petrograficznej [8]. Wyniki badań zawartości ziaren nieforemnych oraz pyłów mineralnych, w przypadku wszystkich kruszyw, są zgodne z odpowiednimi normowymi wartościami granicznymi. Największą porowatość całkowitą stwierdzono w przypadku ziaren bazaltu ukraińskiego (2,72%) i polskiego granitu z Siedlimowic (2,62%). Wartości te są nieznacznie większe od porowatości żwiru (2,59%).

Tabela 2. Wyniki badań zastosowanych kruszyw grubych

Rodzaj kruszywa	Frakcja mm-mm	Badana właściwość								
		Gęstość objętościowa kg/dm ³	Gęstość właściwa kg/dm ³	Porowatość całkowita %	Wskaźnik rozkruszenia		Zawartość ziaren nieforemnych		Zawartość pyłów mineralnych	
					Xri %	Xrm %	Zni %	Znm %	Zpi %	Zpm %
bazalt PL (Winna Góra)	2-8	2,94	3,01	2,33	4,3	4,6	5,7	4,2	0,40	0,35
	8-16				4,9		2,7		0,30	
bazalt PL (Gracze)	2-8	3,00	3,06	1,96	3,9	4,0	8,1	7,9	0,50	0,44
	8-16				4,0		7,9		0,30	
bazalt UA (Iwaniczi)	2-8	2,86	2,94	2,72	3,9	6,6	6,1	6,6	0,68	0,66
	8-16				8,5		6,9		0,65	
granit PL (Siedlimowice k. Strzegomia)	2-8	2,60	2,67	2,62	14,9	15,1	4,9	3,0	0,16	0,13
	8-16				15,3		1,6		0,10	
granit PL (Graniczna k. Strzegomia)	2-8	2,64	2,69	1,86	14,5	14,8	8,5	8,3	0,90	0,69
	8-16				15,3		8,2		0,30	
granit UA (Vyriwskij Karjer)	2-8	2,65	2,67	0,75	5,9	8,0	3,5	4,2	0,27	0,26
	8-16				9,8		4,8		0,24	
granodioryt UA (Klesov)	2-8	2,63	2,66	1,13	6,2	6,0	10,3	8,3	0,28	0,26
	8-16				5,8		6,7		0,24	
żwir PL (KSM Suwałki)	2-8	2,63	2,7	2,59	7,5	9,3	0,7	3,1	0,22	0,21
	8-16				10,6		5,0		0,20	

3.2. Betony

W tabeli 3 podano wartości średnie modułów sprężystości E_{cm} , wytrzymałości na ściskanie f_{cm} oraz klasy wytrzymałości betonów, a także normowe wartości $E_{cm,PN}$, odpowiadające klasom [7].

Tabela 3. Właściwości badanych betonów

właściwości	oznaczenie betonów							
	bazalt PL (Winna Góra)	bazalt PL (Gracze)	bazalt UA (Iwaniczi)	granit PL (Siedlimowice k.Strzegomia)	granit PL (Graniczna k.Strzegomia)	granit UA (Vyriwskij Karjer)	granodioryt UA (Klesov)	żwir PL (KSM Suwałki)
E_{cm} [GPa]	34,9	35	27,7	23,6	26,2	30,7	33	31,3
f_{cm} , cyl [MPa]	44,2	48,8	40,8	39,7	39,1	40,1	37,9	38
	wartości normowe							
l. wytrz. betonu	C40/50	C40/50	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37
$E_{cm, PN}$ [GPa]	35,0*/42,0	35,0*/42,0	34,0*/40,8	34	34	34	32	32

*) - zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2008 wartości E_{cm} należy zwiększyć o 20% dla kruszywa bazaltowego

Wyniki badań modułu sprężystości sześciu betonów, wykonanych z innymi kruszywami niż polskie kruszywa bazaltowe, wskazują na inną zależność od rodzaju kruszywa niż wytrzymałość na ściskanie. Mimo praktycznie jednakowej wytrzymałości, moduł sprężystości tych betonów jest znacząco zróżnicowany (od 23,6 do 33,0 GPa), co nie potwierdza „mocnej” zależności modułu od wytrzymałości betonu. Najbardziej charakterystyczna jest bardzo mała wartość modułu sprężystości betonów z polskimi kruszywami granitowymi z Siedlimowic i Granicznej, który był odpowiednio równy 23,6 i 26,2 GPa, mimo że ich wytrzymałość wynosiła 39,7 i 39,1 MPa. Zgodności z małą wytrzymałością nie wykazał także beton z kruszywem granodiorytowym o stosunkowo dużym module sprężystości (33,0 GPa).

Małe wartości modułu E_{cm} oraz wytrzymałości f_{cm} betonu z ukraińskim kruszywem bazaltowym są zbieżne z małą gęstością objętościową bazaltu ukraińskiego wynoszącą 2,86 kg/dm³, mniejszą od typowych gęstości kruszyw bazaltowych 2,95-3,05 kg/dm³, oraz dużym wskaźnikiem rozkruszenia frakcji 8-16 mm tj. 8,5%. Mniejsza gęstość objętościowa ukraińskiego bazaltu, gorsze właściwości kruszywa bazaltowego i wykonanego z niego betonu mogą być konsekwencją częściowego zwietrzenia skały, potwierdzonego przez występowanie w jego składzie fazowym minerału ilastego - nontronitu [9].

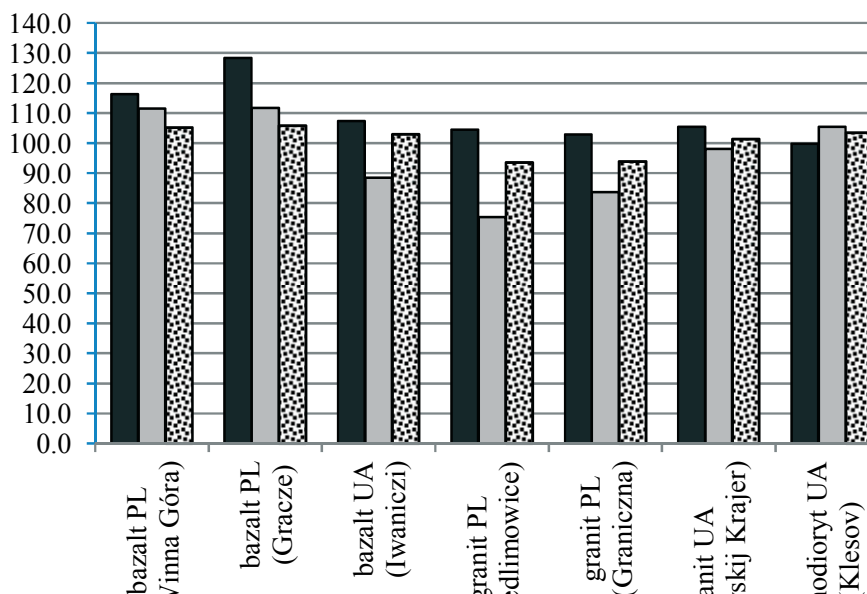
Wartości E_{cm} betonów z polskimi bazaltami są o 20% mniejsze od wartości $E_{cm,PN}$, czyli są zgodne z podstawowymi wartościami modułów podanymi w tabeli normy [7], bez zwiększania tych wartości zgodnie z zaleceniami normowymi właśnie o 20%. Zdecydowanie największe rozbieżności wystąpiły przy zastosowaniu bazaltu ukraińskiego (kopalnia Iwaniczi), wartości modułu są mniejsze aż o 32%. W przypadku betonów z każdym kruszywem granitowym stwierdzono znacząco mniejsze wartości E_{cm} w porównaniu do $E_{cm,PN}$ - od 10% (kopalnia Vyrivskij Karjer) do 30% (kopalnia Siedlimowice). Wśród kruszyw ukraińskich, wyróżnia się granodioryt, przy zastosowaniu którego otrzymana wartość E_{cm} jest o 3% większa od wartości $E_{cm,PN}$. Wartość E_{cm} betonu z kruszywem żwirowym jest mniejsza tylko o 2%. Zalecenie zwiększenia o 20% podanych w normie [7] wartości modułów sprężystości może być niewłaściwe. Szczególnie dotyczy to złóż, w których mogą występować objawy zwietrzenia skały, tak jak w przypadku bazaltu ukraińskiego, co pogarsza właściwości surowca skalnego.

Analizując wyniki badań kruszyw oraz wytrzymałości na ściskanie wszystkich betonów, nie stwierdzono jednoznacznych zależności (rys. 1). Jedynie w przypadku trzech kruszyw bazaltowych można zauważyć, że wytrzymałość betonu na ściskanie jest odwrotnie proporcjonalna do wskaźnika rozkruszenia (czyli proporcjonalna do wytrzymałości na miażdżenie). W pozostałych przypadkach taka relacja nie występuje. Bardzo dobre właściwości betonów z polskimi kruszywami bazaltowymi, mogą oprócz najlepszej wytrzymałości na miażdżenie dodatkowo wynikać z mikroszorstkości bazaltu występującej w zakresie do około 10 μm [10]. Z kolei granit, jako skała gruboziarnista [11] zawiera duże kryształy kwarcu o gładkim, muszlowym przełamie, co w znaczący sposób może obniżać przyczepność zaczynu cementowego do granitu. Podobna tekstura powierzchni ziaren występuje w granodiorycie.

4. Dyskusja wyników badań

Na rysunku 1 porównano względne udziały ziaren nierozkruszonych ($100 - X_{rm}$), wytrzymałości f_{cm} oraz moduły E_{cm} betonów z poszczególnymi kruszywami magmowymi w proporcji do odpowiednich właściwości betonu ze żwirem. Wartości f_{cm} i E_{cm} betonu z kruszywem żwirowym oraz ($100 - X_{rm}$) kruszywa żwirowego przyjęto jako poziom

odniesienia (100%), podobnie jak w normie [7] przy ustaleniach dotyczących wartości współczynników korygujących moduły betonów z różnymi kruszywami.



Rys. 1. Wartości względne udziału ziaren nierozkruszonych w kruszywach ($100 - X_{m}$), wytrzymałości na ściskanie f_{cm} oraz modułu sprężystości E_{cm} betonów z tymi kruszywami w stosunku do właściwości żwiru i betonu ze żwirem (wartości 100%)

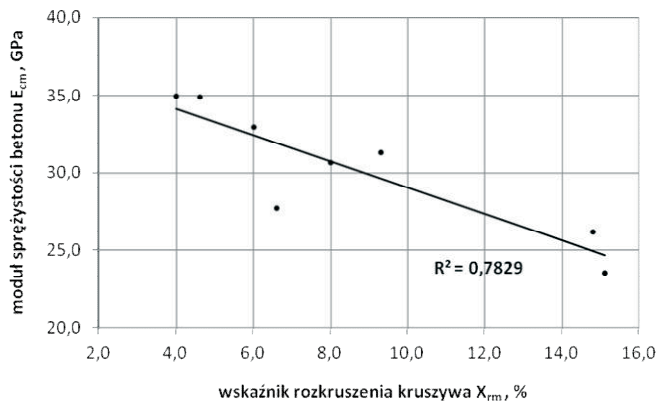
Najlepsze parametry odkształceniowe oraz wytrzymałościowe betonów stwierdzono w przypadku bazaltów polskich, natomiast zdecydowanie najgorsze w przypadku obydwu betonów z polskimi kruszywami granitowymi. W ten sam sposób należy ocenić podatność kruszyw polskich na rozkruszenie, co jest zgodne z właściwościami betonów. Z zaprezentowanych na rysunku 1 porównań wynika, że ukraińskim kruszywem bazaltowym, z kopalni Iwaniczi, nie można zastąpić polskich kruszyw bazaltowych ze złóż Gracze i Winna Góra. Właściwości betonów z kruszywami z dwóch pozostałych złóż ukraińskich (granit z Vyrivskij Krajer oraz granodioryt z Klesov) są porównywalne do właściwości betonu z kruszywem żwirowym (KSM Suwałki).

Ze względu na rozpatrywany główny temat artykułu należy podkreślić, że aż cztery betony: z granitowymi kruszywami polskimi i ukraińskim oraz bazaltem ukraińskim wykazały moduły sprężystości niższe od betonu żwirowego od 2% do 25%.

Zdaniem autorów, należy podkreślić, że w przypadku badanych kruszyw bazaltowych zalecane zwiększenie normowych wartości modułu sprężystości o 20% nie jest konieczne. Natomiast moduły sprężystości betonów z polskimi kruszywami granitowymi są wyraźnie mniejsze od wartości $E_{cm,PN}$ podanych na postawie klas wytrzymałości na ściskanie.

Dodatkową interpretację wyników badań przeprowadzono w celu oceny charakteru i istotności zmian modułu sprężystości w zależności od wskaźnika rozkruszenia kruszywa i w zależności od wytrzymałości na ściskanie betonów z tymi kruszywami. W tym celu posłużono się regresją liniową. Analizę korelacji zastosowano natomiast pod kątem porównania, jak mocny i istotny jest wpływ wytrzymałości betonów i rodzaju kruszywa - reprezentowanego przez wskaźnik rozkruszenia, na moduł sprężystości. Proste regresje, oszacowane metodą najmniejszych kwadratów, charakteryzujące zależność modułu

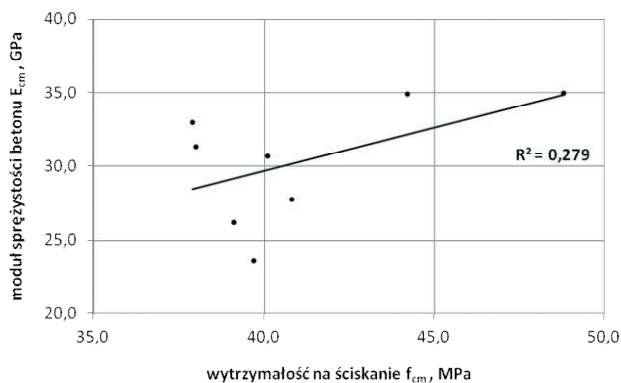
sprężystości betonu od wskaźnika rozkruszenia kruszywa oraz modułu od wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunkach 2 i 3. W obydwóch przypadkach ujawniły się wyraźne tendencje zmian modułu – malejąca dla wskaźnika rozkruszenia, a dla wytrzymałości rosnąca. Współczynniki determinacji R^2 , określające w jakim stopniu całkowita zmienność modułu sprężystości betonu jest wyjaśniana przez odpowiedni model regresji, znacząco różnią się i wynoszą odpowiednio dla wskaźnika rozkruszenia 78,3% i dla wytrzymałości na ściskanie 27,9%. Współczynnik korelacji pomiędzy wskaźnikiem a modułem wynosi $-0,885$, a prawdopodobieństwo testowe $p = 0,0035 < 0,05$, czyli korelacja jest istotna. Współczynnik korelacji pomiędzy wytrzymałością a modułem wynosi $0,528$, a prawdopodobieństwo testowe $p = 0,1784 > 0,05$, czyli nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, że współczynnik korelacji $R = 0$, a więc korelacja w sensie statystycznym jest nieistotna. Wynika stąd, że wpływ rodzaju kruszywa na moduł sprężystości badanej populacji betonów z kruszywami magmowymi (o jednakowym stosunku $w/c = 0,55$) jest istotny i mocniejszy niż wpływ wytrzymałości.



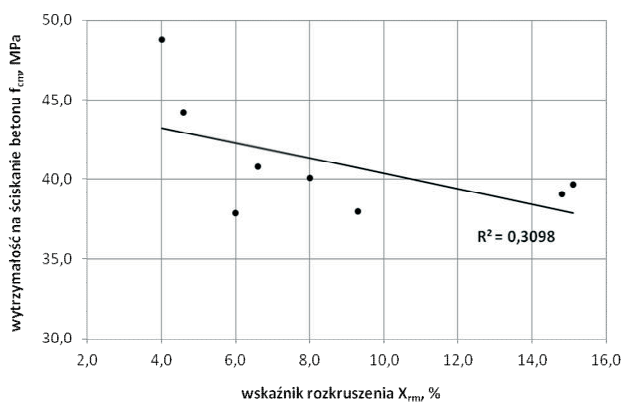
Rys. 2. Prosta regresji zależności modułu sprężystości betonu od wskaźnika rozkruszenia kruszywa

Ponadto te same analizy przeprowadzono w celu oceny zależności wytrzymałości betonów (zmienna zależna) od wskaźnika rozkruszenia (zmienna niezależna). Na rysunku 4 przedstawiono prostą regresji potwierdzającą malejącą tendencję zmian wytrzymałości betonów na ściskanie w zależności od wskaźnika rozkruszenia kruszywa. Współczynnik determinacji R^2 wynosi $0,310$, a współczynnik korelacji pomiędzy wskaźnikiem a wytrzymałością wynosi $-0,557$ przy prawdopodobieństwie testowym $p = 0,152 > 0,05$, dlatego nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, a więc korelacja w sensie statystycznym jest nieistotna.

Z analiz statystycznych wskaźnika rozkruszenia kruszyw magmowych i właściwości betonów o stosunku $w/c = 0,55$ (E_{cm} - X_{rm} , f_{cm} - X_{rm}) wynika, że wpływ wskaźnika na moduł jest statystycznie istotny w przeciwieństwie do jego wpływu na wytrzymałość.



Rys. 3. Prosta regresji zależności modułu sprężystości od wytrzymałości na ściskanie betonu



Rys. 4. Prosta regresji zależności wytrzymałości na ściskanie betonu od wskaźnika rozkruszenia kruszywa

5. Wnioski

Wartości modułów sprężystości wszystkich badanych betonów z kruszywami ze skał magmowych, z wyjątkiem betonu z kruszywem granodiorytowym, są mniejsze od zalecanych na podstawie klas wytrzymałości w normie PN-EN 1992-1-1:2008 [7], a różnice osiągają nawet 30%.

W badaniach uzyskano mniejsze wartości modułów sprężystości betonów z kruszywami granitowymi w porównaniu do betonu z kruszywem żwirowym. Różnice te są znacząco większe w przypadku zastosowania polskich kruszyw granitowych (granit Siedlimowice i Graniczna odpowiednio 25% i 16%), niż w przypadku ukraińskiego kruszywa granitowego (2%).

Różnica pomiędzy modułami sprężystości badanych betonów z polskimi kruszywami bazaltowymi a modułem sprężystości betonu z ukraińskim kruszywem bazaltowym wynosi 20%. Spowodowane jest to częściowym zwietrzyeniem ukraińskiego bazaltu, potwierdzonym występowaniem w jego składzie minerału ilastego nontronitu, a także jego mniejszą gęstością.

Na podstawie analiz regresji i korelacji stwierdzono, że wpływ rodzaju kruszywa magmowego na moduł sprężystości badanych betonów jest w sensie statystycznym istotny i mocniejszy niż wpływ wytrzymałości na moduł.

Literatura

- 1 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
- 2 Tschegg E. K., Rotter H. M., Roelfstra P. E., Bourkund U., Jussel P. Fracture mechanical behavior of aggregate–cement matrix interfaces, *J. Mater. Civ. Eng.* 7 (4) 1995
- 3 Budzyński W., Góra J., Piasta W. Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność betonów zwykłych, *Przegląd Budowlany*, nr 7-8/2012
- 4 Góra J. Odkształcalność doraźna betonów wysokowartościowych z kruszywami łamanymi, *Budownictwo i Architektura*, nr 9/2011
- 5 Ajdukiewicz A., Węglorz M. Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone”. Beton. Część podstawowa, Tom I, ITB, Warszawa 2003.
- 6 Hoła J. Naprężenia inicjujące i krytyczne a destrukcja naprężeniowa w betonie ściskanym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- 7 PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 8 PN-B-06712:1986 Kruszywa mineralne do betonu
- 9 Piasta W., Turkiewicz T. Niepublikowane wyniki badań własnych, Kielce 2013
- 10 Grzeszczyk S., Matuszek-Chmurowska A. Wpływ rodzaju kruszywa na mikrostrukturę warstwy przejściowej i właściwości betonów wysokowartościowych. L Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTb, Krynica 2004
- 11 Kozłowski S. Surowce skalne Polski, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986

Modulus of Elasticity of Concretes from Polish and Ukrainian Crushed Aggregates from Igneous Rocks

Waldemar Budzyński¹, Jacek Góra², Wojciech Piasta³, Tadeusz Turkiewicz⁴

^{1,2} *Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: ¹w.budzynski@pollub.pl; ²j.gora@pollub.pl*

³ *Department of Concrete Technology and Prefabrication, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl*

⁴ *Institute of Technical Science and Aviation, State School of Higher Education in Chelm., e-mail: turkiewicz@pwsz.chelm.pl*

Abstract: Test results concern modulus of elasticity and compressive strength of ordinary concretes made of various coarse aggregates from igneous rocks. Test results of some properties of these aggregates (3 crushed granites, 3 basalts, granodiorite, natural gravel) are also considered. The variable factor of the studies is the type of coarse aggregate. According to the analyses of regression and correlation there occurs a significant effect of the aggregate grinding ratio on the modulus of elasticity of concretes contrary to insignificant effect of the compressive strength. The modulus of elasticity of 4 concretes from Polish and Ukrainian granites and basalt aggregates is lower than respective standard values of the modulus.

Keywords: concrete, modulus of elasticity, coarse aggregate, granite, basalt, granodiorite