

Wytrzymałość na rozciąganie betonów zwykłych i wysokiej wytrzymałości z kruszywami ze skał magmowych i osadowych

Dr hab. inż. Wojciech Piasta, Politechnika Świętokrzyska, dr inż. Waldemar Budzyński, dr inż. Jacek Góra, Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie

Znaczenie wpływu kruszywa na właściwości betonu, składnika o największym udziale objętościowym, pomimo sugestii niektórych badaczy [1, 2] zostało uznane za istotne dopiero w najnowszych normach dotyczących konstrukcji z betonu [3], ale nadal w niewystarczającym zakresie. W literaturze stosunkowo dawno i sukcesywnie udowodniano silną zależność cech odkształceniowych tego materiału, m.in. modułu sprężystości, współczynnika odkształcenia poprzecznego, pełzania czy skurczu od rodzaju kruszywa [1, 4, 5, 6]. Obecnie w zapisach normy PN-EN 1992-1-1:2008 [3] wskazano na zależność wartości modułu sprężystości od rodzaju stosowanego kruszywa grubego. W aspekcie wyników prowadzonych badań należy te wskazania rozszerzyć. Przy większych wartościach naprężeń (betony BWW), wpływ na wytrzymałość na rozciąganie ma zarówno siła wiązań w warstwie przejściowej kruszywo-zaczyn cementowy, jak i struktura samej skały, z której pozyskano kruszywo. Powszechnie uznano i udowodniono, że przyczepność zaczynu do kruszyw łamanych jest lepsza niż do kruszyw otczakowych (zróżnicowany kształt i tekstura ziaren). W przypadku kruszyw węglanowych, siłę wiązań w tej strefie wzmacnia korzystna reakcja pomiędzy węglanem

wapnia a zaczynem (dysorientacja kryształów portlandytu, powstawanie monokarboglinianu), a także jednorodność tej skały, w odróżnieniu od ziarna kruszywa granitowego, które zawiera wiele minerałów w rozdzielonych kryształach w strukturze jednego ziarna. Uwzględniając te opisane w literaturze [2, 6, 7, 8, 9], zjawiska fizyko-chemiczne, wykonano badania doświadczalne, mające na celu nie tylko ich potwierdzenie lub weryfikację, ale też rozpoznanie właściwości betonu zależnych od właściwości kruszywa z danego złoża. Dokonując wyboru właściwego kruszywa do betonu należy również zwrócić uwagę na jego wpływ na wytrzymałość na rozciąganie, co niestety jest często lekceważone. Brak uwzględnienia w zapisach normowych wpływu rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość betonu na rozciąganie i uzależnienie jej wyłącznie od wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie związanej z klasą betonu, jest niesłuszne. W wielu przypadkach, co potwierdzają wyniki badań, normowe wartości wytrzymałości f_{ctm} są w wielu przypadkach przeszacowane. Powyższe stwierdzenie jest kolejną przesłanką podjęcia badań wpływu kruszywa na wytrzymałość betonu na rozciąganie. Do badań wytypowano kruszywa ze skał magmowych – grysy bazaltowe i granitowe z krajowych złóż eksploatowanych od wielu lat z przeznaczeniem do betonów

konstrukcyjnych najwyższych klas oraz kruszywa osadowe – węglanowe, a także w celach porównawczych, kruszywo żwirowe najpowszechniej stosowane do betonów różnych klas wytrzymałości.

2. Charakterystyka badanych betonów

Badaniom poddano 12 betonów sklasyfikowanych w 3 grupach w zależności od wartości w/c. Dwie grupy stanowiły betony zwykłe (BZ) o w/c = 0,70 i w/c = 0,58, a jedną grupę betony wysokiej wytrzymałości (BWW) o w/c = 0,28. W każdej grupie betony wykonywano z użyciem czterech różnych kruszyw grubych frakcji 2÷16 mm. Zastosowano 2 kruszywa ze skał magmowych: grys bazaltowy z kopalni Gracze (B), grys granitowy z Granicznej (G) oraz 2 kruszywa ze skał osadowych: grys dolomitowy z Laskowej (D), naturalne otczakowe z Suwałk (O). Jako kruszywo drobne stosowano piasek naturalny płukany frakcji 0÷2 mm z Suwałk. Do wszystkich betonów zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R. W każdej grupie betonów przyjęto zasadę zachowania tej samej objętości kruszywa grubego. Stosy okruczowe poszczególnych kruszyw komponowano z wydzielonych frakcji 2÷4, 4÷8, 8÷16 mm. Aby zawartość objętościowa poszczególnych frakcji kruszywa w porównywanych betonach (w zakresie każdej grupy) była

Tabela 1. Skład mieszanek betonów zwykłych BZ o w/c = 0,70

Składniki betonów w/c = 0,70		Oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)			
		B070-B (bazalt)	B070-G (granit)	B070-D (dolomit)	B070-O (otoczek)
Cement	kg/m ³	260	260	260	260
Piasek	kg/m ³	697	697	697	697
Kruszywo grube	kg/m ³	1334	1221	1303	1221
Woda	dm ³ /m ³	182	182	182	182

Tabela 2. Skład mieszanek betonów zwykłych BZ o w/c = 0,58

Składniki betonów w/c = 0,58		Oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)			
		B058-B (bazalt)	B058-G (granit)	B058-D (dolomit)	B058-O (otoczek)
Cement	kg/m ³	325	325	325	325
Piasek	kg/m ³	676	676	676	676
Kruszywo grube	kg/m ³	1274	1166	1245	1166
Woda	dm ³ /m ³	189	189	189	189

Tabela 3. Skład mieszanek betonów wysokiej wytrzymałości BWW o w/c = 0,28

Składniki betonów (w + w _{sp})/c = 0,28		Oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)			
		B028-B (bazalt)	B028-G (granit)	B028-D (dolomit)	B028-O (otoczek)
Cement	kg/m ³	479	479	479	479
Piasek	kg/m ³	699	699	699	699
Kruszywo grube	kg/m ³	1258	1151	1229	1151
Woda	dm ³ /m ³	128	128	128	128
Superplastyfikator	kg/m ³	10,5	10,5	10,5	10,5

taka sama, uwzględniono różne gęstości objętościowe kruszywa. Punkt piaskowy stosu okruczowego wyrażony objętościowo w każdym przypadku wynosił 37±1%. W celu utrzymania zbliżonej konsystencji mieszanek betonowych, w betonie BWW zastosowano domieszkę upłynniającą (superplastyfikator) w postaci modyfikowanego polikarboksylanu. Opad stożka wynosił 10±3 cm, co odpowiada klasom konsystencji S2/S3 zgodnie z PN-EN 206-1:2003 [10]. Zawartość powietrza w mieszanekach betonowych, oznaczona metodą ciśnieniową, mieściła się w granicach 1,8±0,1%. Skład mieszanek badanych betonów podano w tabelach 1, 2, 3.

Z każdego betonu wykonano 10 próbek walcowych średnicy 150 mm i wysokości 300 mm (5 przeznaczono do badania wytrzymałości na ściskanie, 5 do badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu). Próbki zbadano po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych. Górne powierzchnie próbek, przeznaczonych do badania wytrzy-

małości na ściskanie, oszlifowano do równoległości podstaw. Badania przeprowadzono w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej za pomocą maszyny wytrzymałościowej ADVANTEST 9 sterowanej komputerowo.

3. Wyniki badań i ich analiza

W celu uzyskania jednoznacznej odpowiedzi, czy rodzaj kruszywa grubego w sposób istotny wpływa na właściwości wytrzymałościowe badanych betonów, uzyskane wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie poddano testowi jednoznacznikowej analizy wariancji przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ [11]. Jeden test przeprowadzono w przypadku każdej grupy betonów o tym samym stosunku w/c. Analizie poddano również wyniki badań wytrzymałości betonów na ściskanie. We wszystkich analizach przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Należy podkreślić, że we wszystkich grupach betonów (o tym samym w/c) występuje, potwierdzony za pomocą analizy wariancji, statystycznie istotny wpływ

rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość na rozciąganie.

Dodatkowo, w celu szczegółowego wyjaśnienia istotności różnic pomiędzy wytrzymałościami betonów z poszczególnymi kruszywami, przeprowadzono testy najmniejszej istotnej różnicy – NIR. Wartości p wskazujące na występowanie statystycznie istotnych różnic pomiędzy wynikami wytrzymałości porównywanych betonów zaznaczono pogrubioną czcionką w tablicach od 4 do 9.

3.1. Wytrzymałość betonów na ściskanie

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, oddzielnie dla każdej grupy betonów, przedstawiono w tabelach 4, 5, 6. Podano wytrzymałości średnie, współczynniki zmienności oraz wyniki testu NIR. W tabelach zamieszczono również informację dotyczącą klas badanych betonów na podstawie kryteriów zgodności według PN-EN 206-1:2003 [10].

W przypadku betonów zwykłych, największe wartości wytrzymałości na ściskanie stwierdzono w beto-

Tabela 4. Wytrzymałość średnia na ściskanie, współczynnik zmienności, klasa oraz wyniki testu NIR betonów o w/c = 0,70

		Oznaczenie betonów			
		B070-B	B070-G	B070-D	B070-O
Wytrzymałość na ściskanie	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	34,5	28,7	36,1	32,0
	v [%]	1,4	1,6	6,1	2,2
Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie		C30/37	C20/25	C30/37	C25/30
Wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na ściskanie betonów B070					
B070-B		–	0,000373	0,143909	0,035194
B070-G		0,000373	–	0,000070	0,010215
B070-D		0,143909	0,000070	–	0,003204
B070-O		0,035194	0,010215	0,003204	–

Tabela 5. Wytrzymałość średnia na ściskanie, współczynnik zmienności, klasa oraz wyniki testu NIR betonów o w/c = 0,58

		Oznaczenie betonów			
		B058-B	B058-G	B058-D	B058-O
Wytrzymałość na ściskanie	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	47,5	36,9	44,9	41,8
	v [%]	3,6	3,2	1,0	2,5
Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie		C40/50	C30/37	C40/50	C35/45
Wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na ściskanie betonów B058					
B058-B		–	0,000004	0,028384	0,000364
B058-G		0,000004	–	0,000032	0,000895
B058-D		0,028384	0,000032	–	0,012162
B058-O		0,000364	0,000895	0,012162	–

Tabela 6. Wytrzymałość średnia na ściskanie, współczynnik zmienności, klasa oraz wyniki testu NIR betonów o w/c = 0,28

		Oznaczenie betonów			
		B028-B	B028-G	B028-D	B028-O
Wytrzymałość na ściskanie	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	93,2	78,3	89,0	82,6
	v [%]	2,9	4,7	1,6	4,1
Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie		C80/95	C70/85	C80/95	C70/85
Wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na ściskanie betonów B028					
B028-B		–	0,000236	0,115601	0,002128
B028-G		0,000236	–	0,001940	0,103868
B028-D		0,115601	0,001940	–	0,027531
B028-O		0,002128	0,103868	0,027531	–

nach z grysem bazaltowym i dolomitowym, przy nieznaczących różnicach pomiędzy nimi na poziomie 4-6%. Wytrzymałości na ściskanie betonów zwykłych z kruszywem otoczkowym i granitowym są statystycznie istotnie mniejsze niż wytrzymałości betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym z odpowiednimi stosunkami w/c. Różnice wytrzymałości betonów z kruszywem otoczkowym i granitowym w stosunku do największej wytrzymałości betonu w danej grupie w/c wynosiły odpowiednio 11,4 i 20,5% przy w/c=0,70 oraz podobnie 12,0 i 22,3% przy w/c=0,58.

Powyższe relacje, wynikające z wnioskowania statystycznego, znajdują ściśle odwzorowanie w przynależności betonów zwykłych do klas

wytrzymałościowych. Betony z kruszywem bazaltowym i dolomitowym należą do tej samej klasy, C30/37 przy w/c=0,70 oraz C40/50 przy w/c=0,58, natomiast betony z kruszywem otoczkowym zakwalifikowano o jedną klasę niżej (odpowiednio C25/30 oraz C35/45), a betony z kruszywem granitowym o dwie klasy niżej (odpowiednio C20/25 oraz C30/37).

W przypadku betonów wysokiej wytrzymałości największe wartości wytrzymałości na ściskanie również stwierdzono w betonach z grysem bazaltowym i dolomitowym, przy różnicy statystycznie nieistotnej – na poziomie 4,5%, na korzyść bazaltu. Znacząco mniejsze wartości, przy statystycznie istotnych różnicach, otrzymano

w betonach z kruszywem otoczkowym i granitowym, odpowiednio o 11,4 i 16,0% w odniesieniu do betonu BWW z kruszywem bazaltowym. Natomiast różnice w wytrzymałościach betonów BWW z kruszywem otoczkowym i granitowym są statystycznie nieistotne (tab. 6).

Podobnie jak w przypadku betonów zwykłych, relacje wynikające z wnioskowania statystycznego stwierdzone w betonach BWW, znajdują potwierdzenie w przynależności tych betonów do klas wytrzymałościowych. Beton BWW z kruszywem bazaltowym i dolomitowym należą do klasy C80/95, natomiast betony z kruszywem otoczkowym i granitowym sklasyfikowano o klasę niżej do C70/85.

Tabela 7. Wytrzymałości średnie na rozciąganie, współczynniki zmienności oraz wyniki testu NIR betonów o w/c = 0,70

		Oznaczenie betonów			
		B070-B	B070-G	B070-D	B070-O
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (z badań)	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	2,76	2,29	2,93	2,71
	v [%]	4,6	7,1	4,9	3,7
Wytrzymałość na rozciąganie osiowe	$f_{ctm,ax}$ [MPa]	2,48	2,06	2,64	2,44
Klasa betonu		C30/37	C20/25	C30/37	C25/30
Normowa wytrzymałość na rozciąganie osiowe w zależności od klasy wg EC2, MPa		2,9	2,2	2,9	2,6
Wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na rozciąganie betonów B070					
B070-B		–	0,000046	0,053834	0,602767
B070-G		0,000046	–	0,000001	0,000133
B070-D		0,053834	0,000001	–	0,018869
B070-O		0,602764	0,000133	0,018869	–

Tabela 8. Wytrzymałości średnie na rozciąganie, współczynniki zmienności oraz wyniki testu NIR betonów o w/c = 0,58

		Oznaczenie betonów			
		B058-B	B058-G	B058-D	B058-O
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (z badań)	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	3,25	2,75	3,36	2,87
	v [%]	6,3	6,5	3,2	3,4
Wytrzymałość na rozciąganie osiowe	$f_{ctm,ax}$ [MPa]	2,93	2,48	3,02	2,58
Klasa betonu		C40/50	C30/37	C40/50	C35/45
Normowa wytrzymałość na rozciąganie osiowe w zależności od klasy wg EC2, MPa		3,5	2,9	3,5	3,2
Wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na rozciąganie betonów B058					
B058-B		–	0,000113	0,295810	0,001319
B058-G		0,000113	–	0,000014	0,251135
B058-D		0,295810	0,000014	–	0,000141
B058-O		0,001319	0,251135	0,000141	–

Tabela 9. Wytrzymałości średnie na rozciąganie, współczynniki zmienności oraz wyniki testu NIR betonów o w/c = 0,28

		Oznaczenie betonów			
		B028-B	B028-G	B028-D	B028-O
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (z badań)	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	5,54	5,16	6,06	5,07
	v [%]	2,8	3,1	4,6	2,3
Wytrzymałość na rozciąganie osiowe	$f_{ctm,ax}$ [MPa]	4,99	4,64	5,45	4,56
Klasa betonu		C80/95	C70/85	C80/95	C70/85
Normowa wytrzymałość na rozciąganie osiowe w zależności od klasy wg EC2, MPa		4,8	4,6	4,8	4,6
Wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na rozciąganie betonów B028					
B028-B		–	0,005900	0,000464	0,001090
B028-G		0,005900	–	0,000001	0,434937
B028-D		0,000464	0,000001	–	0,000000
B028-O		0,001090	0,434937	0,000000	–

3.2. Wytrzymałość betonów na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie, oddzielnie dla każdej grupy betonów, przedstawiono w tabelach 7, 8, 9, w których podano wytrzymałości średnie na rozciąganie przy rozłupywaniu, współczynniki zmienności oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie osiowe obliczone jako $0,9 f_{ctm,sp}$. Dodatkowo zamieszczono informa-

cje dotyczące klas badanych betonów według PN-EN 206-1:2003 oraz odpowiadające tym klasom normowe wartości wytrzymałości f_{ctm} na podstawie PN-EN 1992-1-1:2008. W tabelach podano również wyniki testu NIR.

Największe wartości wytrzymałości na rozciąganie określono w betonach z kruszywem dolomitowym i bazaltowym, zarówno zwykłych, jak i wysokiej wytrzymałości, podob-

nie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie. W każdym przypadku (przy wszystkich w/c) różnice pomiędzy wytrzymałościami tych betonów są na poziomie 3–9%, na korzyść dolomitu (przy statystycznie istotnej różnicy w betonach BWW). Zatem można uznać betony z kruszywem dolomitowym i bazaltowym za równorzędne pod względem wytrzymałości na rozciąganie. W odniesieniu do tych

wartości, wytrzymałości betonów z kruszywem granitowym i otoczkowym są mniejsze odpowiednio o $18 \div 22$ i $7 \div 15\%$ w grupach betonów zwykłych oraz o 15% i 16% w grupie BWW, w większości przy statystycznie istotnych różnicach. Należy podkreślić, że różnica w wartości wytrzymałości na rozciąganie na poziomie około 10% , odpowiada skokowi o jedną klasę wytrzymałości na ściskanie w przypadku betonów zwykłych począwszy od klasy C25/30, natomiast w przypadku betonów wysokiej wytrzymałości, różnica ta wynosi jedynie około 4% . Zatem należy wnioskować, że zastosowanie kruszywa otoczkowego lub granitowego zamiast dolomitowego czy bazaltowego, powoduje istotne obniżenie wartości wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Należy podkreślić ogólną prawidłowość, że w przypadku betonów z kruszywem granitowym osiągnano najmniejsze wartości wytrzymałości na rozciąganie jedynie w betonach BWW występuje lekka przewaga na korzyść gysu granitowego w porównaniu z kruszywem otoczkowym, ale przy różnicy statystycznie nieistotnej. Jednak w betonie BZ o $w/c=0,70$ wytrzymałość betonu z kruszywem granitowym jest mniejsza niż z otoczkowym nawet o $15,5\%$, a w stosunku do wytrzymałości betonu z kruszywem bazaltowym – o $17,0\%$. Podobne relacje, choć przy mniejszych różnicach, odpowiednio $4,2$ i $15,4\%$, występują w betonach BZ o $w/c=0,58$. W kontekście uzyskanych wyników, absolutnie niestusznym czy wręcz błędnym jest uznawanie kruszyw bazaltowych i granitowych za równorzędne [12, 13, 14, 15], co dodatkowo potwierdzają słabe wyniki w odniesieniu do kruszywa otoczkowego. Bezsprzecznym natomiast jest uzyskanie najlepszych wyników badań wytrzymałości na rozciąganie betonu z grysem dolomitowym. Przy wymiarowaniu konstrukcji betonowych i żelbetowych, zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2008, należy stosować wytrzymałość beto-

nu w stanie jednoosiowego rozciągania, stąd w tabelach 7, 8, 9 dodatkowo podano wartości $f_{ctm,ax}$ odpowiadające wynikom badań. Dokonano porównania otrzymanych z badań wartości z wartościami normowymi, które są przypisane klasom betonu i stwierdzono, że w zakresie betonów zwykłych wartości normowe są większe od wartości uzyskanych w badaniach (rzeczywistych) o $7\text{--}17\%$ ($w/c=0,70$) i $16\text{--}24\%$ ($w/c=0,58$), natomiast w zakresie betonów wysokiej wytrzymałości wartości normowe są mniejsze o $4\text{--}12\%$ lub równe wartościom rzeczywistym. Oznacza to, że w przypadku betonów zwykłych wartości normowe są przeszacowane. W związku z tym, stosując przy projektowaniu konstrukcji z betonów zwykłych normowe, przeszacowane wartości wytrzymałości na rozciąganie, można błędnie określić trwałość i stany graniczne użytkowalności konstrukcji.

4. Wnioski

W zakresie właściwości wytrzymałościowych, w szczególności wytrzymałości na rozciąganie, wbrew przytoczonym zapisom normowym, nie można betonów z kruszywem bazaltowym i granitowym traktować równorzędnie. Wśród wszystkich badanych betonów najmniejsze wartości wytrzymałości na rozciąganie osiągnięto w betonach z kruszywem granitowym.

Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie uzyskano zarówno w przypadku betonów zwykłych jak i wysokiej wytrzymałości z kruszywem dolomitowym, co potwierdza wyższą przyczepność pomiędzy kruszywem węglanowym a zaczynem cementowym, będącą wynikiem reakcji fizykochemicznych pomiędzy tymi składnikami.

Zalecanie do betonów BWW tylko kruszyw najwyższej jakości (bazaltowych lub granitowych), jest nieuzasadnione. Potwierdzono to w badaniach, w których klasa betonów BWW (bez dodatku pyłów krzemionkowych), z kruszywa ze skał

osadowych (dolomitu i naturalnego żwiru) wyniosła odpowiednio C80/95 i C70/85.

W przypadku betonów zwykłych stwierdzono znaczące przeszacowanie normowych wytrzymałości na rozciąganie określanych wyłącznie na podstawie klas wytrzymałości na ściskanie. Uzasadnia to wniosek, aby w zapisach normowych uwzględniono wpływ rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość betonu na rozciąganie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Odształcalność doraźna betonów wysokiej wytrzymałości, XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, t. 4, Poznań-Krynica 1998
- [2] Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [4] Mierzwa J., Niektóre aspekty wpływu kruszywa na właściwości wytrzymałościowe betonów, Konferencja „Beton na progu nowego milenium”, Polski Cement, Kraków 2000
- [5] Góra J., Wpływ kruszyw węglanowych, granitowych i bazaltowych na doraźne właściwości mechaniczne i odształceniowe betonów zwykłych oraz wysokowartościowych, praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2005
- [6] Piasta W. G., Korozja siarczanowa betonu pod obciążeniem długotrwałym, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000
- [7] Roy D. M., Langton C. A., Morphology and Microstructure of Cement Paste-Rock Interfacial Regions, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris 1980
- [8] Monteiro P. J. M., Mehta P. K., Interaction between Carbonate Rock and Cement Paste Interface, Cement and Concrete Research, Vol. 16/1986
- [9] Piasta J., Piasta W., Rodzaje i znaczenie kruszywa w betonie, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Prac Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2002
- [10] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [11] Sheskin David J., Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures, CRC Press 1997
- [12] Wymagania i zalecenia dotyczące wykonywania betonów do konstrukcji mostowych, GDDP (obecnie GDDKiA), Warszawa 1990
- [13] Szydło A., Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego, Polski Cement, Kraków 2004
- [14] PN-S-10040:1999 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania
- [15] Furtak K., Mosty zespolone, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Kraków 1999