

mgr inż. Piotr Górak^{1)*}

ORCID: 0000-0003-3479-7647

mgr inż. Łukasz Szabat¹⁾mgr inż. Przemysław Jelonek¹⁾

Pochodzenie kruszywa łamanego a cechy użytkowe betonu do obiektów inżynierskich

The origin of crushed aggregate and the functional features of concrete for use in civil engineering

DOI: 10.15199/33.2020.10.06

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki projektu, którego celem było określenie przydatności kruszywa ze skał o różnych odmianach litologicznych do konstrukcyjnych betonów mostowych. Porównano parametry analizowanego kruszywa oraz właściwości betonów z jego zastosowaniem. Materiałem referencyjnym było kruszywo granitowe jako najczęściej stosowane do wytwarzania betonu do obiektów inżynierskich. Wyniki badań potwierdziły, że konstrukcyjne betony mostowe z powodzeniem mogą być wykonywane na kruszywie innym niż granitowe lub bazaltowe.

Słowa kluczowe: beton mostowy; trwałość mrozowa; wytrzymałość na ściskanie; kruszywa łamane.

Abstract. The article presents the results of the research project, the aim of which was to determine the suitability of aggregates from rocks of various lithological varieties for the construction of concrete bridges. The comparison included parameters of the aggregates analyzed and the properties of concretes made with their use. The reference material was granite aggregate as the most commonly used for the production of concrete for engineering structures. The results of tests on the properties of concretes made on various aggregates confirmed that structural bridge concretes can be successfully performed on aggregates other than granite or basalt.

Keywords: bridge concrete; frost resistance; compressive strength; crushed aggregates.

Przez wiele lat wymagania materiałowe dotyczące konstrukcyjnych betonów mostowych określało Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [21], ograniczając i praktycznie uniemożliwiając stosowanie kruszyw pochodzących z innych skał niż granitowe i bazaltowe. Mimo to pojawiały się pojedyncze inwestycje, na których podejmowano próby stosowania mieszanek betonowych wykorzystujących bardzo dobre właściwości np. skał węglanowych. Przełomowy był 2014 r., kiedy opracowano Ogólne Specyfikacje Techniczne [2], zgodnie z którymi właściwości betonu determinują dobór kruszywa o odpowiednich parametrach pozwalających na spełnienie wymagań stawianych konstrukcjom inżynierskim. Polska ma złoża kruszywa dobrej jakości, przeznaczonego do betonów mostowych [4]. Grupa kopalń skalnych wydobywanych w Polsce

obejmuje 33 odmiany litologiczne skał magmowych, metamorficznych i osadowych, różniących się parametrami fizycznymi i chemicznymi (rysunek 1). Złoża skał magmowych i metamorficznych znajdują się na terenie województwa dolnośląskiego oraz małopolskiego, a skał osadowych w południowo-centralnym oraz południowo-wschodnim rejonie Polski. Kluczem doboru kruszyw do odpowiedniego zastosowania powinna być trwałość konstrukcji betonowej.

W artykule przeanalizowano możliwości zastosowania różnych kruszyw w betonach mostowych, uwzględniając

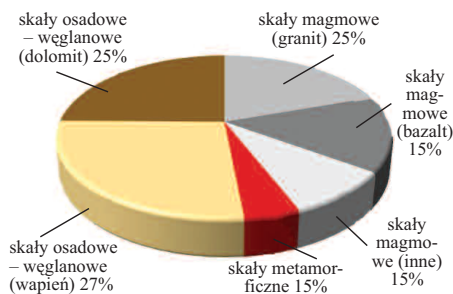
aspekt optymalizacji kosztów, dostępności oraz zrównoważonego rozwoju. Zakres prac obejmował:

- badania i weryfikację wybranych parametrów kruszywa;
- ocenę wpływu kruszywa na właściwości reologiczne mieszanek betonowej;
- ocenę wpływu kruszywa na właściwości stwardniałego betonu.

Materiały do badań

Do analizy wytypowano kruszywa z różnych rodzajów skał (rysunek 1). Jakość kruszyw weryfikowano na podstawie dokumentów producentów oraz badań własnych parametrów istotnych z punktu widzenia trwałości i cech mechanicznych betonu (tabela 1) [11].

Program badań kruszyw rozszerzono o badania wytrzymałości na miążdżenie wykonywane na podstawie archiwalnych norm [9, 10]. Określone wartości wskaźnika rozkruszenia, obok odporności na rozdrabnianie, pozwoliły na uzyskanie informacji na temat właściwości mechanicznych skał, z których pozyskano kruszywa budowlane.



Rys. 1. Struktura wydobycia kruszywa ze względu na odmianę litologiczną skały [4]
Fig. 1. Structure of aggregate extraction due to the lithological variation of rock [4]

¹⁾ CEMEX Polska Sp. z o.o.

^{*} Adres do korespondencji: piotr.gorak@cemex.com

Tabela 1. Wybrane parametry analizowanych kruszyw (przedziały uzyskanych wartości)
Table 1. Selected parameters of the analyzed aggregates (ranges of the values)

Rodzaj skały	Zawartość pyłów f_x	Kształt ziaren – wskaźnik płaskości FI	Nasiakliwość WA_{24}	Mrozoodporność F	Mrozoodporność w 1% NaCl F_{NaCl}	Odporność na rozdrabnianie LA	Wytrzymałość na miążdżenie – wskaźnik rozkruszenia
[%]							
Magmowa (granit)	0,2 – 2,1	4,1 – 12,2	0,4 – 1,2	0,08 – 0,12	0,2 – 0,4	15,1 – 43,2	3,5 – 16,6
Magmowa (bazalt)	0,3 – 0,7	16,3 – 28,6	1,2 – 1,4	0,3 – 0,4	0,1 – 0,4	13,0 – 14,2	1,9 – 2,4
Magmowa (inna)	0,1 – 1,5	8,1 – 22,3	0,6 – 2,6	0,12 – 0,64	0,3 – 4,2	18,2 – 31,2	4,7 – 9,1
Metamorficzna	0,5 – 1,8	13,3 – 21,3	0,5 – 2,3	0,08 – 0,28	0,1 – 8,3	13,2 – 23,4	2,1 – 6,7
Osadowa – węglanowa (wapień)	0,3 – 1,1	14,7 – 27,2	0,4 – 0,8	0,02 – 0,28	3,3 – 6,8	21,2 – 24,5	6,7 – 12,5
Osadowa – węglanowa (dolomit)	0,5 – 2,4	12,6 – 31,1	0,6 – 2,1	0,2 – 7,3	2,2 – 9,2	15,3 – 33,2	4,1 – 12,3

W celu określenia wpływu kruszyw o różnym pochodzeniu litologicznym, a także różnej teksturze i powierzchni właściwej ziarna, na właściwości mieszanki betonowej i betonu zaprojektowano dwie receptury o charakterystyce podanej w tabeli 2 [3, 22, 24]. Badania mieszanki betonowej obejmowały oznaczenie konsystencji metodą stożka opadowego, zawartości powietrza oraz gęstości. Analizowano też zachowa-

nie się tych parametrów w symulowanym czasie transportu 60 min. Wszystkie betony wykonano na cemencie CEM I 42,5 SR3/NA [20] oraz tym samym zestawie domieszek chemicznych (BV+PCE+LP) o ustalonej kompatybilności z cementem. **Badano wytrzymałość na ściskanie betonu, moduł sprężystości oraz mrozoodporność wewnętrzną F150/F200** wg PN-B 06250.2018-10 – Załącznik N

Tabela 2. Charakterystyka mieszanek betonowych i betonów wykorzystanych w badaniach

Table 2. Characteristics of concretes used in research

Opis	Klasa wytrzymałości	Klasy ekspozycji	Klasa konsystencji	Udział piasku/grysu [%]	w/c
Receptura 1	C30/37	XC4 XF2 XD1 XA1	S3 (100-150 mm)	40/60	0,43
Receptura 2	C40/50	XC4 XF4 XD3 XA3	S4 (160-210 mm)	40/60	0,37

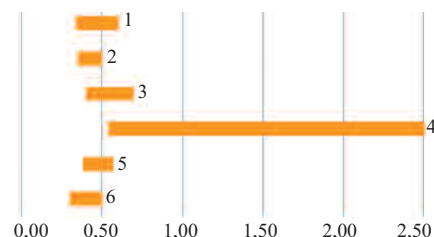
Tabela 3. Kryteria akceptacji wyników badań mieszanki betonowej i betonu

Table 3. Acceptance criteria for concrete mix and concrete test results

Receptura/klasa betonu	Kryteria akceptacji wyników badań mieszanki betonowej		Kryteria oceny wyników badań stwardniałego betonu	
	Receptura 1 C30/37	konsystencja (opad stożka)	150 +/-10 mm	wytrzymałość na ściskanie
	zawartość powietrza	6,5 +/- 0,5%	stopień mrozoodporności	F150
			odporność na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie w obecności soli odładzających – kategoria	FT 2
Receptura 2 C40/50	konsystencja (opad stożka)	200 +/-10 mm	wytrzymałość na ściskanie	$f_{ck} + 6$ MPa
	zawartość powietrza	6,5 +/- 0,5%	stopień mrozoodporności	F200
			odporność na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie w obecności soli odładzających – kategoria	FT 2

Analiza wyników badań

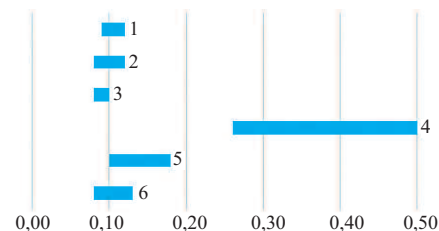
Pierwsze zależności wynikające z zastosowania kruszyw z różnych skał do betonów mostowych pojawiły się przy analizie dozowania domieszek chemicznych: napowietrzającej LP oraz superplastyfikatora PCE odpowiedzialnego za uzyskanie zakładanej konsystencji. O ile w przypadku receptury betonu C30/37 istotne były różnice dotyczące zawartości domieszki napowietrzającej, o tyle w przypadku receptury C40/50 zaobserwowano, że pochodzenie kruszywa może mieć duże znaczenie w doborze optymalnego dozowania domieszek chemicznych odpowiedzialnych za uzyskanie założonej konsystencji oraz napowietrzenia mieszanki (rysunki 2 i 3) [16, 17]. W przypadku kruszyw ze skał metamorficznych ilość domieszki okazała się znacznie większa w porównaniu z pozostałymi kruszywami. Było to spowodowane rozwinięciem



1 – skały magmowe (granit); 2 – skały magmowe (bazalt); 3 – skały magmowe (inne); 4 – skały metamorficzne; 5 – skały osadowe – węglanowe (wapień); 6 – skały osadowe – węglanowe (dolomit)

Rys. 2. Dozowanie superplastyfikatora PCE [% m. c.] w celu osiągnięcia zakładanej konsystencji mieszanki betonowej o recepturze 2 w zależności od rodzaju kruszywa

Fig. 2. Dosage of PCE superplasticizer [% mass of cement] in order to achieve the assumed consistency of a concrete mix with recipe 2 depending on the type of aggregate



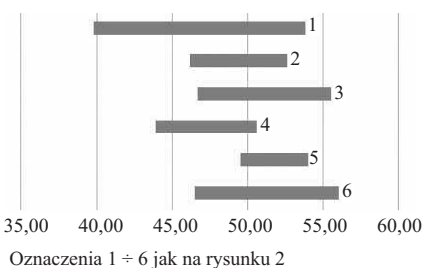
Oznaczenia 1 ÷ 6 jak na rysunku 2

Rys. 3. Dozowanie domieszki napowietrzającej LP [% m. c.] w celu osiągnięcia zakładanego napowietrzenia mieszanki betonowej o recepturze 2 w zależności od rodzaju kruszywa

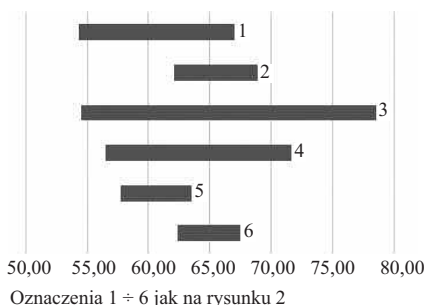
Fig. 3. Dosage of LP aeration admixture [% mass of cement] to achieve the assumed aeration of a concrete mix with recipe 2 depending on the type of aggregate

powierzchni ziaren kruszywa, ich teksturą, wielkością powierzchni właściwej oraz jakością pyłów, które je pokrywały.

Wytrzymałość na ściskanie betonu C30/37 wynosiła 39,8 – 56,0 MPa w zależności od zastosowanego kruszywa (rysunek 4), a betonu C40/50 – 54,8 ÷ 78,6 MPa (rysunek 5) [18, 19]. Różnice wynikały przede wszystkim z właściwości mechanicznych surowca skalnego, z którego pochodziło kruszywo, mierzonych wskaźnikami rozkruszenia i odpornością na rozdrabnianie, oraz jakości i efektywności warstwy kontaktowej zaczyn/ziarno kruszywa. O tym zjawisku w przypadku skał węglanowych pisano m.in. w [1, 5 ÷ 7].



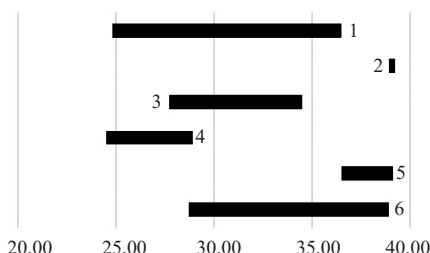
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonu C30/37 [MPa] w zależności od rodzaju kruszywa
Fig. 4. Compressive strength of concrete C30/37 [MPa] depending on the type of aggregate



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie betonu C40/50 [MPa] w zależności od rodzaju kruszywa
Fig. 5. Compressive strength of concrete C40/50 [MPa] depending on the type of aggregate

Problem ze spełnieniem warunku klasy wytrzymałości na ściskanie zarobów laboratoryjnych w badaniach wstępnych ($f_{ck} + 6$ MPa) odnotowano w przypadku kilku betonów C30/37 i C40/50 na kruszywach magmowych, np. z granitu lub granodiorytu.

Badania modułu sprężystości betonu C30/37 (rysunek 6) wykonano wg normy PN-EN 12390-13 [15]. Wartość E_{cs} wyznaczono metodą B dla poziomu naprężenia $\sigma_a = f_c/3$ przy bazie ekstensoimetru 120 mm. Największe wartości

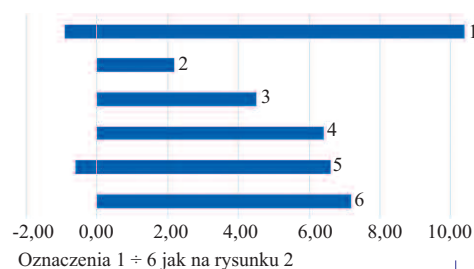


Rys. 6. Moduł sprężystości betonu C30/37 [GPa] w zależności od rodzaju kruszywa
Fig. 6. Concrete modulus of elasticity C30/37 [GPa] depending on the type of aggregate

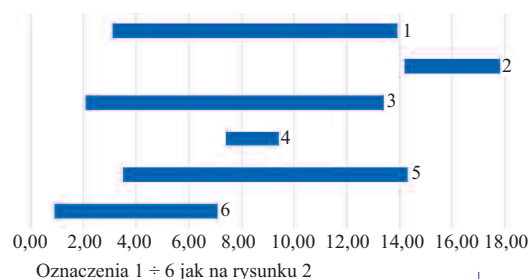
uzyskano w przypadku betonów na kruszywach bazaltowych oraz wapiennych i dolomitowych, a najmniejsze na kruszywach metamorficznych oraz granitowych. Nie zaobserwowano zależności między modułem Younga a parametrami mechanicznymi kruszyw, takimi jak np. LA, wskaźnik rozkruszenia, oraz między wartością modułu Younga a wytrzymałością betonu [23].

Trwałość wyrażona stopniem mrozoodporności wewnętrznej bądź powierzchniowej jest cechą, w przypadku której, oprócz właściwego składu i napowietrzenia, dużą rolę odgrywa mrozoodporność kruszywa. Uzyskane wyniki badań wskazują, że przy właściwym napowietrzeniu, niezależnie od rodzaju użytego kruszywa, wszystkie betony są mrozoodporne (rysunek 7 i 8).

Co prawda ocena badania mrozoodporności metodą zwykłą, opisaną w załączniku N krajowego uzupełnienia do europejskiej normy betonowej [12], ma jednoznaczne kryteria (strata wytrzymałości poniżej 20% – wynik OK, strata wytrzymałości powyżej 20% – wynik negatywny), to nie sposób nie zauważyć znacznych różnic określonych wartością spadku wytrzymałości po procesie zamrażania/rozmarzania nawet w przypadku kruszyw w obrębie jednej odmiany litologicznej. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że najbardziej odporne na destrukcję mrozową są betony C40/50 na kruszywach dolomitowych (rysunek 8) i C30/37 na kruszywach bazaltowych (rysunek 7). Najbardziej zmienną odpornością mrozową charakteryzują się betony C30/37 na kruszywach granitowych (rysunek 7) oraz betony C40/50 na kruszywach granitowych, wapiennych oraz magmowych innych (rysunek 8).



Rys. 7. Strata wytrzymałości betonu C30/37 na różnych kruszywach [%] po badaniu mrozoodporności F150
Fig. 7. Loss of strength of C30/37 concrete on various aggregates [%] after the F150 frost resistance test



Rys. 8. Strata wytrzymałości betonu C40/50 na różnych kruszywach [%] po badaniu mrozoodporności F200
Fig. 8. Loss of strength of C40/50 concrete on various aggregates [%] after the F200 frost resistance test

Kryteria oceny wyników badań mrozoodporności betonu w środowisku soli odladzających przedstawiono w tabeli 4. Ocenę przeprowadzono wg Tablicy O.2 PN-B 06265:2018-10 [8]. W przypadku betonu klasy C30/37 jedno z rozwiązań nie spełniło wymagania ubytku masy w przypadku klasy mrozoodporności FT2 (spełniło tylko FT1), a w przypadku czterech kruszyw nie uzyskano również

Tabela 4. Kryteria odporności próbek betonu na cykle zamrażania/rozmarzania w obecności soli odladzających

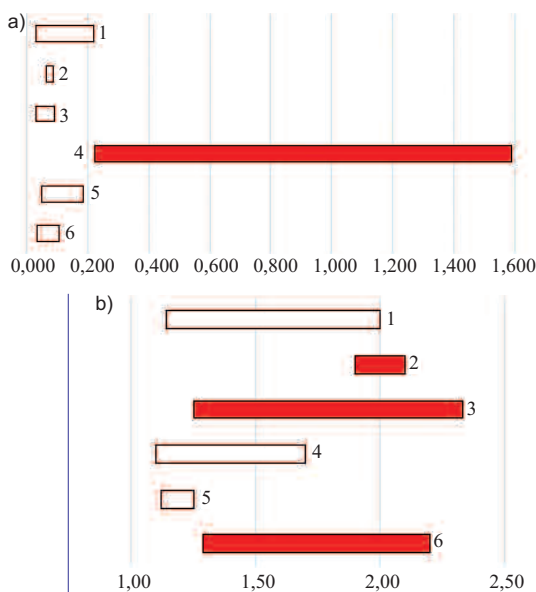
Table 4. Criteria for the resistance of concrete samples to freezing/thawing cycles in the presence of de-icing salts

Kategoria	Ubytek masy po 28 cyklach (m_{28})	Ubytek masy po 56 cyklach (m_{56})	Stopień ubytku m_{56}/m_{28}
FT0	brak wymagań		
FT1	wartość średnia $\leq 1,0$ kg/m ² , przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,5$ kg/m ²	brak wymagań	brak wymagań
FT2	średnio $\leq 0,5$ kg/m ²	wartość średnia $\leq 1,0$ kg/m ² , przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,5$ kg/m ²	≤ 2

wymaganego stopnia ubytku masy m_{56}/m_{28} (d poniżej 2 dla FT2).

Bardzo dużą trwałością mrozową w obecności soli odladzających wykazały się betony C30/37 na kruszywach granitowych oraz wapiennych, natomiast betony na kruszywach ze skał metamorficznych – skrajnie różnymi właściwościami w przypadku tego typu agresji (rysunek 9).

Betony C40/50 nie osiągnęły zakładanej kategorii FT2 w wyniku niespełnienia warunku ubytku masy między 28 i 56 dniem badania (rysunek 10). Dotyczyło to tylko i wyłącznie betonów wykonanych na kruszywach ze skał magmowych, czyli rekomendowanych do betonów narażonych na taką ekspozycję.

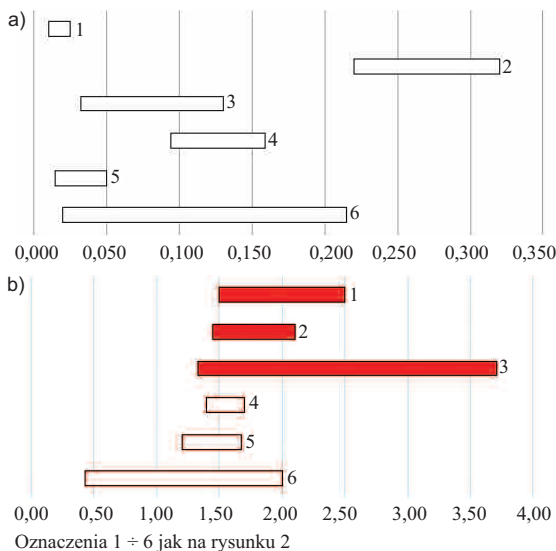


Rys. 9. Masa zluszczonego materiału [kg/m²] (a) oraz stopień ubytku masy betonu C30/37 w zależności od rodzaju kruszywa (b)

Fig. 9. Weight of exfoliated material [kg/m²] (a) and degree of mass loss (b) of C30/37 concrete depending on the type of aggregate

Podsumowanie

Kruszywo grube stanowi 40-50% objętości betonu. Odmiana litologiczna skały, z której wykonano kruszywo, jest istotną przy kształtowaniu cech mechanicznych betonu mostowego oraz ma wpływ na jego trwałość. Stosowanie kruszyw ze skał innych niż magmowe do betonów na konstrukcje inżynierskie staje się koniecznością wynikającą nie tylko z braku dostępności kruszyw odpowiedniej jakości, ale przede wszystkim z bardziej świadomego podejścia do dy-



Rys. 10. Masa zluszczonego materiału [kg/m²] (a) oraz stopień ubytku masy betonu C40/50 w zależności od rodzaju kruszywa (b)

Fig. 10. Weight of exfoliated material [kg/m²] (a) and degree of mass loss (b) of C40/50 concrete depending on the type of aggregate

wersyfikacji dostaw surowców na kontrakty drogowe i kolejowe oraz zdecydowanie większej wiedzy inżynierskiej. Wyniki badań wskazują, że betony na kruszywach wapiennych lub dolomitowych cechują się niejednokrotnie lepszymi właściwościami niż na popularnych kruszywach granitowych lub bazaltowych. Dobierając kruszywo grube na podstawie jego właściwości, można modelować właściwości stwardniałego betonu pod kątem zastosowania i żądanych parametrów. Ten sam skład procentowy pozostałych składników, przy zmianie tylko i wyłącznie rodzaju kruszywa grubego, umożliwia zwiększenie wytrzymałości i mrozoodporności betonu.

Poszukiwanie nowych rozwiązań materiałowych w kontekście zrównoważonego rozwoju, wykorzystanie potencjału tkwiącego w materiałach często niedocenianych, gdyż nieznanymi, to coraz popularniejszy kierunek badań prowadzonych przez różne jednostki badawcze, a także przez producentów materiałów budowlanych.

Literatura

- [1] Bobińska Joanna. 2010. *Trwałość kruszyw dolomitowych w aspekcie ich zastosowania do betonu*. Materiały konferencji Dni Betonu.
- [2] GDDKiA – Ogólne Specyfikacje Techniczne: Rozdział VIII: Obiekty inżynierskie, Dział 01: Główne elementy konstrukcyjne, 01.01; Beton konstrukcyjny 18.07.2014.
- [3] GDDKiA – Ogólne Specyfikacje Techniczne – projekt OST 13.01.00 Beton konstrukcyjny w drogowym obiekcie inżynierskim – Warszawa 2018.

[4] <http://geoportal.pgi.gov.pl>.

[5] Kołacz Zbigniew. 2011. „Właściwości betonów specjalistycznych wykonywanych z zastosowaniem gryśów dolomitowych”. *Beton Technologie Architektura* 3.

[6] Kołacz Zbigniew, Piotr Górak, Łukasz Szabat. 2016. „Napowietrzenie mieszanki betonowej, jako parametr determinujący trwałość betonu wyrażony stopniem mrozoodporności”. *Beton Technologie Architektura* 1 (73).

[7] Małolepszy Jan, Rafał Gajewski. 2008. *Rola kruszyw węglanowych w kształtowaniu wybranych właściwości betonu*. Materiały konferencji Dni Betonu.

[8] PN-B 06265:2018-10. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.

[9] PN-78/B-06714/40 Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenie wytrzymałości na miążdżenie.

[10] PN-86/B-06712 Kruszywa mineralne do betonu.

[11] PN-EN 12620:2004:AC 2004 Kruszywa do betonu.

[12] PN-EN 206+A1:2016-16 Beton.

Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[13] PN-EN-12350-1:2011 Badanie mieszanki betonowej – Część 1: Pobieranie próbek.

[14] PN-EN-12390-2:2011 Badania betonu – Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[15] PN-EN 12390-13:2014-02 Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu.

[16] PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

[17] PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe.

[18] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[19] PN-EN 12390-7:2011 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.

[20] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.

[21] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.

[22] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 1 sierpnia 2019 zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.

[23] Seruga A., S. Kańska, T. Lisowicz. 2012. „Moduł sprężystości betonów na kruszywie granitowym w świetle badań doświadczalnych”. *Budownictwo-Czasopismo Techniczne*, 4-B/2012, Zeszyt 21. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

[24] Siwowski Tomasz, E. Michalak, D. Kaleta, E. Reizer, D. Macheta, A. Wysocki. „Katalog typowych konstrukcji drogowych obiektów mostowych i przepustów”, Promost Consulting sp. z o.o. sp.k., Rzeszów, luty 2019. <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/katalog-typowych-konstrukcji-drogowych-obiektow-mostowych-i-przepustow2>.

Przyjęto do druku 04.05.2020 r.