

mgr inż. Amanda Akram^{1*)}

ORCID: 0000-0001-5619-2927

dr hab. inż. Marta Słowik, prof. PL¹⁾

ORCID: 0000-0001-9627-3625

Wpływ uziarnienia i współczynnika miażdżenia kruszywa na właściwości stwardniałego betonu

The influence of aggregate graining and crushing value on properties of hardened concrete

DOI: 10.15199/33.2023.11.09

Streszczenie. Przeprowadzono badania eksperymentalne w celu szerszej analizy wpływu uziarnienia i współczynnika miażdżenia (ACV) kruszywa żwirowego, dolomitowego i granitowego na właściwości stwardniałego betonu. Nie stwierdzono istotnego wpływu ACV na wytrzymałość betonu na ściskanie i na rozciąganie, przy dwóch różnych maksymalnych wymiarach ziaren. Moduł sprężystości był bardziej zależny od uziarnienia i wytrzymałości kruszywa.

Słowa kluczowe: beton; kruszywo; współczynnik miażdżenia kruszywa; maksymalny wymiar ziaren kruszywa.

Abstract. The experimental investigation was carried out to analyse in depth the effect of grain size and aggregate crushing value (ACV) of gravel, dolomite and granite aggregate on properties of hardened concrete. No significant effect of ACV on the compressive and the tensile strength of concrete was noticed, for two different maximum grain sizes whereas the modulus of elasticity was more dependent on the aggregate granulation and strength.

Keywords: concrete; aggregate; aggregate crushing value; maximum aggregate size.

Analiza procesów zniszczenia betonu powinna uwzględniać wpływ kruszywa na właściwości betonu. W przypadku kruszywa, badania laboratoryjne zazwyczaj skupiają się na jego rodzaju [1 – 4] lub maksymalnym wymiarze ziaren [5 – 7]. Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że typ kruszywa grubego [8 – 10], skład petrograficzny czy cechy geometryczne ziaren [11 – 14], wpływają w różnym stopniu na wytrzymałość betonu. Wytrzymałość kruszywa jest jedną z właściwości, która może wpływać na cechy betonu. Jest ona charakteryzowana przez współczynnik miażdżenia kruszywa ACV, definiowany jako odporność kruszywa na miażdżenie pod wpływem stopniowo przykładanej siły ściskającej. Wytrzymałość kruszywa zależy od składu mineralogicznego, tekstury powierzchni zewnętrznej ziaren i ich mikrostruktury związanej z porowatością [15, 16]. Mniejsza wytrzymałość odpowiada większej wartości współczynnika miażdżenia kruszywa, co w efekcie w niektórych przypadkach przekłada się na mniejszą wytrzymałość betonu [17].

W literaturze można odnaleźć analizy badania wpływu wytrzymałości kruszywa na cechy stwardniałego betonu. Przedstawiane badania mają jednak pewne ograniczenia, takie jak wykonywanie tylko analizy teoretycznej, przy użyciu modeli numerycznych bez empirycznego wyznaczenia wytrzymałości kruszywa [18]. W pracach opisanych w [17] badacze analizowali wpływ współczynnika miażdżenia kruszyw grubych (żwiru, granitu, dolomitu, kwarcytu i bazaltu) na właściwości odkształceniowo-wytrzymałościowe betonu normalnej wytrzymałości o współczynniku $w/c = 0,58$, ale tylko w przypadku jednego maksymalnego wymiaru ziaren 16 mm. Z kolei w badaniach zaprezentowanych w [19] wskazano, że większy maksymalny wymiar ziaren kruszywa wiąże się z większymi wartościami ACV. Badania te dotyczyły kruszyw żwirowych o maksymalnych wymiarach ziaren 8 mm, 16 mm i 31,5 mm. Wraz ze zwiększeniem maksymalnego uziarnienia z 8 do 31,5 mm oraz ACV o 63,2% odnotowano zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu o 34,5%. W przypadku wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości zaobserwowane zmiany były nieistotne.

Analizując literaturę, trudno jest jednoznacznie określić wpływ wytrzyma-

łości kruszywa na cechy betonu ze względu na ograniczony zakres przeprowadzonych badań. Autorzy koncentrowali się na jednym typie lub na jednym maksymalnym uziarnieniu kruszywa. W celu poszerzenia wiedzy, poza dostępną w literaturze, zostały opracowane i przeprowadzone badania eksperymentalne mające na celu analizę wpływu wytrzymałości trzech rodzajów kruszywa, o dwóch różnych granulacjach, na właściwości betonu.

Badania eksperymentalne

Program badawczy. Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu cech kruszywa na właściwości betonu: wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz moduł sprężystości. W analizie uwzględniono uziarnienie i współczynnik miażdżenia kruszywa (ACV). Badania cech betonu przeprowadzono na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Do wykonania mieszanek betonowych użyto trzech różnych rodzajów kruszywa:

- żwir – ze żwirowni Zastawie;
- dolomit – z kamieniołomu Wszachów;
- granit – z kamieniołomu Graniczna.

Przygotowano sześć różnych serii badanych próbek, uwzględniając ro-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Adres do korespondencji: a.akram@pollub.pl

dzaj kruszywa (N – żwir, G – granit, D – dolomit) oraz dwa maksymalne wymiary ziaren 16 i 22 mm):

- 1) L16N (beton z kruszywem żwirowym, $D_{max} = 16$ mm);
- 2) L16D (beton z kruszywem dolomitowym, $D_{max} = 16$ mm);
- 3) L16G (beton z kruszywem granitowym, $D_{max} = 16$ mm);
- 4) L22N (beton z kruszywem żwirowym, $D_{max} = 22$ mm);
- 5) L22D (beton z kruszywem dolomitowym, $D_{max} = 22$ mm);
- 6) L22G (beton z kruszywem granitowym, $D_{max} = 22$ mm).

Kruszywo we wszystkich seriach miało zbliżone proporcje frakcji 2,0 – 8,0 mm, 8,0 – 16,0 mm i 16,0 – 22,0 mm. Krzywe uziarnienia wszystkich rodzajów kruszywa mieściły się między górną i dolną krzywą graniczną, zgodnie z Polską Normą [20]. Przy projektowaniu mieszank betonowych do wykonania wszystkich serii betonów przyjęto jednakowy stosunek wodno-cementowy $w/c = 0,55$. W każdej serii wykorzystano cement CEM II 42,5R. Dzięki temu została zapewniona taka sama wytrzymałość stwardniałej matrycy cementowej w każdej serii, co umożliwiło analizę wyników tylko z uwzględnieniem cech kruszywa. Skład mieszank betonowych przedstawiono w tabeli 1. Przed wykonaniem próbek oznaczono klasę konsystencji każdej z mieszank betonowych metodą Vebe [21] i uzyskano w przypadku:

- serii L16N – klasa V2 (12 s);
- serii L16D – klasa V2 (12 s);
- serii L16G – klasa V2 (15 s);
- serii L22N – klasa V2 (12 s);
- serii L22D – klasa V2 (13 s);
- serii L22G – klasa V2 (14 s).

Receptury poszczególnych mieszank zostały dobrane na podstawie metody trzech równań z uwzględnieniem

różnej wodożądności kruszywa z zachowaniem takiego samego współczynnika $w/c = 0,55$ w każdej serii. Naszym celem było wykonanie mieszank betonowych bez użycia dodatków, z zachowaniem tej samej klasy konsystencji i jednocześnie tego samego współczynnika w/c . Pozwoliło to uzyskać taką samą wytrzymałość matrycy cementowej, która w wyniku badania wytrzymałości na zginanie stwardniałej zaprawy cementowej wyniosła 6,85 MPa.

Badanie kruszywa. Jako podstawową cechę wytrzymałościową wybrano współczynnik miażdżenia kruszywa (ACV). Określono go w przypadku wszystkich rodzajów kruszywa, w teście miażdżenia zgodnie z zaleceniami Polskiej Normy [22]. Badanie miażdżenia pozwoliło na względne zbadanie odporności na rozkruszenie pod wpływem obciążenia ściskającego w warunkach normowych. Wysuszone, standaryzowane próbki o frakcjach: 4,0 – 8,0 mm, 8,0 – 16,0 mm oraz 16,0 – 22,0 mm przygotowano w przypadku każdego rodzaju kruszywa. Próbki rozfrakcjonowanego kruszywa poddano ścisaniu w cylindrycznej formie i przesiewano przez sito 2,0 mm.

Tabela 2. Współczynnik miażdżenia kruszywa – wyniki badań

Table 2. Aggregate crushing value – test results

Typ kruszywa	Frakcja [mm]	Współczynnik miażdżenia kruszywa [%]	Współczynnik miażdżenia kruszywa [%] frakcji	
			4,0 – 16,0 mm	4,0 – 22,0 mm
Żwir	4,0 – 8,0	6,45		
Żwir	8,0 – 16,0	10,03	8,24	10,85
Żwir	16,0 – 22,0	16,06		
Dolomit	4,0 – 8,0	9,71		
Dolomit	8,0 – 16,0	10,27	9,99	13,63
Dolomit	16,0 – 22,0	21,02		
Granit	4,0 – 8,0	14,54		
Granit	8,0 – 16,0	17,05	15,80	17,79
Granit	16,0 – 22,0	21,79		

Wartość ACV podaje się jako procentowy udział masy rozdrobnionego materiału w badanej próbce kruszywa, uzyskany po przyłożeniu określonego obciążenia. Współczynnik miażdżenia kruszywa wydzielonych frakcji obliczano wg wzoru (1),

$$ACV = (m_1 - m_2) / m_1 \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

m_1 – masa początkowa wysuszonej próbki [g];
 m_2 – masa próbki po badaniu i przesianiu [g].

Następnie obliczono ACV mieszanki kruszywa o uziarnieniu 4,0 – 16,0 mm i 4,0 – 22,0 mm osobno w przypadku kruszywa żwirowego, granitowego i dolomitowego jako średnią wartość wyników odrębnych frakcji. Wyniki badania miażdżenia kruszywa przedstawiono w tabeli 2. Uzyskane wyniki badań ACV są zbliżone do podanych w [23] w odniesieniu do kruszywa o uziarnieniu do 16 mm (w przypadku żwiru ACV = 9,90%, a dolomitu ACV = 9,00%).

Analizując wyniki badań przedstawione w tabeli 2, stwierdzono, że:

- wielkość ACV zależy od rodzaju kruszywa zarówno w przypadku wydzielonych frakcji, jak i mieszanki wszystkich frakcji kruszywa; najmniejsze wartości wskaźnika ACV uzyskano w przypadku kruszywa naturalnego żwirowe-

go, a największe kruszywa granitowego, a więc żwir jest najmocniejszym kruszywem, natomiast granit najsłabszym;

- większe ACV uzyskano w przypadku wszystkich rodzajów badanego kruszywa o mieszance frakcji 4,0 – 22,0 mm w porównaniu z kruszywem o mieszance frakcji 4,0 – 16,0. Różnica między współczynnikami ACV mieszank frakcji do 22 mm w porównaniu do 16 mm wynosiła: 12,5% w przypadku kruszy-

Tabela 1. Skład mieszank betonowych

Table 1. Composition of concrete mixtures

Seria	Typ kruszywa	w/c	Cement [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	Piasek 0,0 – 2,0 [kg/m ³]	Kruszywo grube [kg/m ³]	
						2,0 – 16,0	2,0 – 22,0
L16N	żwir	0,55	349,8	192,4	497,1	1344,0	–
L16D	dolomit	0,55	374,6	206,0	481,6	1302,2	–
L16G	granit	0,55	375,6	206,6	481,0	1300,5	–
L22N	żwir	0,55	325,9	179,3	512,0	–	1384,3
L22D	dolomit	0,55	358,5	197,2	491,7	–	1329,3
L22G	granit	0,55	358,4	197,1	491,6	–	1328,9

wa granitowego; o 31,6% kruszywa żwirowego i 36,4% kruszywa dolomitowego. Kruszywo o większym maksymalnym uziarnieniu charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością. Odnotowano także znacznie mniejszy przyrost współczynnika miażdżenia przy większym uziarnieniu granitu w porównaniu z pozostałymi dwoma rodzajami kruszywa.

Badanie współczynnika ACV wykazało, że zarówno rodzaj, jak i uziarnienie kruszywa wpływają na jego wytrzymałość. Piasta i inni [17] osiągnęli podobne wyniki w przypadku kruszywa granitowego i dolomitowego o uziarnieniu 2,0 – 16,0 mm, tj. ponad dwukrotnie większe ACV w przypadku kruszywa granitowego (ACV = 15%) w porównaniu z kruszywem dolomitowym (ACV = 7%).

Badanie właściwości betonu. Zbadano trzy właściwości betonu: wytrzymałość na ściskanie; wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz moduł sprężystości. Wszystkie badania przeprowadzono na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm.

Wytrzymałość na ściskanie każdej zaprojektowanej serii betonu określono w próbie jednoosiowego ściskania po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z zasadami zawartymi w Eurokodzie [24]. **Wytrzymałość betonu na rozciąganie** określono za pomocą metody brazylijskiej, gdyż jest to metoda standaryzowana podana w normie [24]. Stabilizowany sieczny **moduł sprężystości** badano na próbkach cylindrycznych obciążonych siłą osiową, zgodnie z normą [26]. Do badań wykorzystano „Metodę A”.

Analizę statystyczną wyników badań przeprowadzono przy użyciu oprogramowania komputerowego „Statistica” firmy Statsoft (wersja 13.3). Dodatkowo, zastosowano test Grubbsa do oceny wyników odstających w poszczególnych seriach betonu. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Analiza wyników badań

W celu oceny wpływu maksymalnego uziarnienia oraz wartości współczynnika miażdżenia na właściwości betonu, w tabeli 4 zestawiono zbiorczo parametry kruszywa i wartości średnie wyników badań cech betonu. Analizę wpływu kruszywa na wytrzymałość

Tabela 3. Właściwości betonu – wyniki badań

Table 3. Concrete properties – test results

Seria	Typ kruszywa [-]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]			Moduł sprężystości [GPa]		
		liczba próbek	średnia wartość f_{cm}	odchylenie standardowe σ_{fcm}	liczba próbek	średnia wartość $f_{ctm,sp}$	odchylenie standardowe $\sigma_{fctm,sp}$	liczba próbek	średnia wartość E_{cm}	odchylenie standardowe σ_{Ecm}
L16N	żwir	9	35,1	1,53	8	2,68	0,257	6	29,3	0,98
L16D	dolomit	6	37,3	3,43	7	2,76	0,246	6	30,0	1,19
L16G	granit	9	40,4	0,98	8	3,39	0,139	6	25,0	0,53
L22N	żwir	6	36,9	0,87	6	3,32	0,109	6	30,5	0,93
L22D	dolomit	5	37,4	1,06	7	3,19	0,280	6	31,9	1,09
L22G	granit	6	34,2	0,46	8	2,99	0,472	6	21,9	0,33

Tabela 4. Wyniki badania właściwości betonu i kruszywa

Table 4. Test results of concrete and aggregate properties

Seria	Typ kruszywa [-]	D_{max} [mm]	ACV [%]	f_{cm} [MPa]	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	E_{cm} [GPa]
L16N	żwir	16	8,24	35,1	2,68	29,3
L22N		22	10,85	36,9	3,32	30,5
L16D	dolomit	16	9,99	37,3	2,76	30,3
L22D		22	13,63	37,4	3,19	31,9
L16G	granit	16	15,80	40,4	3,39	25,0
L22G		22	17,79	34,2	2,99	21,9

na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz moduł sprężystości betonu przeprowadzono osobno w odniesieniu do D_{max} i ACV.

Wpływ maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa na właściwości betonu. W celu zbadania wpływu maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa na właściwości betonu, wyniki badań opracowano statystycznie w zależności od D_{max} każdego rodzaju kruszywa. Właściwości betonu (wartość średnia i odchylenie standardowe) przedstawiono na rysunku 1.

Na podstawie oceny wyników badań laboratoryjnych stwierdzono:

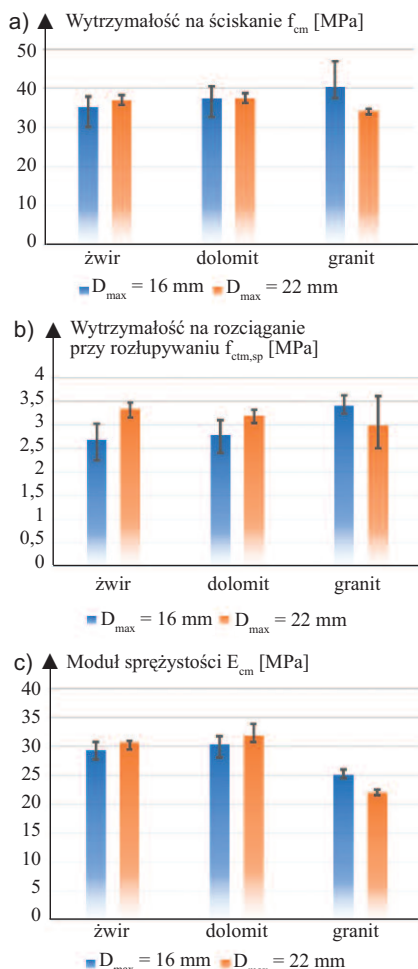
- większy maksymalny wymiar kruszywa powodował lepsze właściwości w przypadku betonów z kruszywem żwirowym (L16N, L22N) i dolomitowym (L16D, L22D). Odwrotną zależność zaobserwowano w przypadku betonów z kruszywem granitowym (seria L16G i L22G), ponieważ trzy badane właściwości miały mniejszą wartość przy uziarnieniu do $D_{max} = 22$ mm w porównaniu z uzyskanymi przy uziarnieniu do $D_{max} = 16$ mm;

- najbardziej zauważalny wpływ maksymalnego wymiaru kruszywa odnotowano w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem D_{max} z 16 mm do 22 mm wyniosło 24,2% w przypad-

ku serii betonów ze żwirem L16N i L22N oraz 15,1% w przypadku serii betonów z dolomitami L16D i L22D. Zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, które zaobserwowano przy maksymalnym wymiarze kruszywa w przypadku serii betonów z granitem L16G i L22G wyniosło 11,8%;

- mały wpływ uziarnienia kruszywa zaobserwowano w przypadku wytrzymałości betonu na ściskanie i modułu sprężystości. W przypadku betonów z kruszywem żwirowym i dolomitowym serii L22N i L16N odnotowano przy $D_{max} = 22$ mm wzrost wytrzymałości na ściskanie o 5,1% i modułu sprężystości o 4,1%, a w przypadku serii L22D i L16D odpowiednio o 0,3% oraz o 5,3%. Natomiast w przypadku betonów z kruszywem granitowym stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 15,3% i modułu sprężystości o 12,4%.

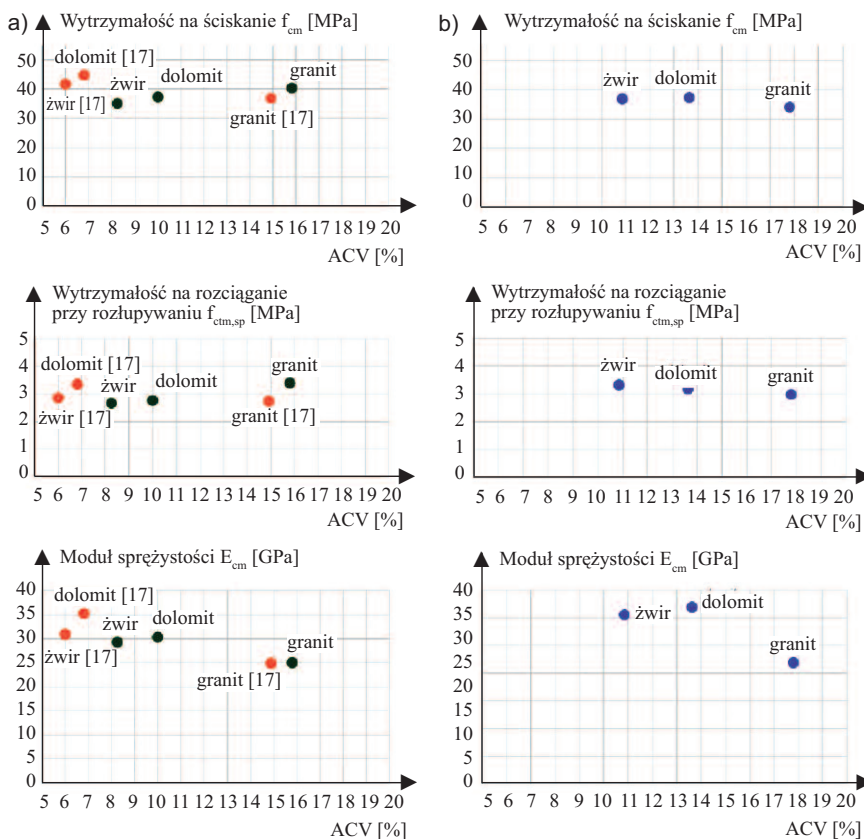
Wpływ współczynnika miażdżenia kruszywa na właściwości betonu. W celu zbadania wpływu wytrzymałości kruszywa (właściwość ta opisana jest za pomocą współczynnika wytrzymałości na miażdżenie ACV) na cechy betonu przeprowadzono analizę otrzymanych wyników badań, których graficzne podsumowanie przedstawiono na rysunku 2. W dwóch kolumnach zestawione



Rys. 1. Zależność właściwości betonu od D_{max} kruszywa: a) wytrzymałości na ściskanie; b) wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu; c) modułu sprężystości
 Fig. 1. Concrete property dependence on D_{max} aggregate: a) for the compressive strength; b) for the splitting tensile strength; c) for the modulus of elasticity

zostały zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, wytrzymałością na rozciąganie, modułem sprężystości a współczynnikiem ACV, osobno dla betonów o $D_{max} = 16$ mm i $D_{max} = 22$ mm. Dodatkowo, wyniki badań dla mieszanek frakcji kruszywa 2,0 – 16,0 mm porównano z wynikami badań podanymi w literaturze [17].

Zestawiając wyniki badań własnych z wynikami podanymi w [17], w przypadku $D_{max} = 16$ mm zauważono, że były one zbliżone, szczególnie w przypadku betonów z kruszywem granitowym, pobranym z tego samego źródła. Powodem pewnych różnic w wynikach w przypadku betonów z kruszywem żwirowym i dolomitowym mógł być fakt, że w badaniach Piasty i innych [17]



Rys. 2. Zależność właściwości betonu od ACV: a) w przypadku $D_{max} = 16$ mm; b) w przypadku $D_{max} = 22$ mm
 Fig. 2. Concrete property dependence on ACV for: a) $D_{max} = 16$ mm; b) $D_{max} = 22$ mm

zastosowano kruszywo z innych źródeł niż badane przez nas, a więc żwir z zakładu Suwałki, a dolomit z kamieniołomu Laskowa Góra. Dodatkowo, proporcje mieszanek betonowych, w tym ilość kruszywa grubego w objętości mieszanki w badaniach własnych i podanych w [17] nieznacznie się różniły.

Po przeanalizowaniu wyników z uwzględnieniem D_{max} wyciągnięto następujące wnioski:

- wpływ wartości ACV w przypadku wszystkich trzech rodzajów kruszywa na wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu nie był znaczący zarówno przy uziarnieniu do $D_{max} = 16$ mm, jak i do $D_{max} = 22$ mm;
- nieznacznie większe wartości ACV kruszywa dolomitowego w porównaniu z kruszywem żwirowym spowodowały, że moduł sprężystości betonu z kruszywem żwirowym i dolomitowym miał zbliżone wartości, niezależnie od rodzaju kruszywa i jego granulacji. Natomiast większe wartości ACV uzyskane w przy-

padku kruszywa granitowego (w badaniach własnych współczynnik ACV granitu był większy o 58,1% w porównaniu z ACV dolomitu przy $D_{max} = 16$ mm i o 30,5% przy $D_{max} = 22$ mm, a zwiększenie ACV granitu w porównaniu ze żwirem wynosiło 91,7% przy $D_{max} = 16$ mm i 63,9% przy $D_{max} = 22$ mm) skutkowały mniejszym modułem sprężystości betonów z kruszywem granitowym w porównaniu z betonem z kruszywem żwirowym i dolomitowym, niezależnie od maksymalnego uziarnienia kruszywa.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i analizy porównawczej wyników (zarówno własnych, jak i zaczerpniętych z literatury [17]) w przypadku maksymalnego wymiaru kruszywa 16 mm stwierdzono zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wraz ze wzrostem ACV, ale różnice nie były istotne. Podobne zależności zaobserwowano w przypadku

$D_{max} = 22$ mm w badaniach własnych. Znaczący wpływ wytrzymałości kruszywa zaobserwowano w przypadku modułu sprężystości, niezależnie od maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa. Moduł sprężystości betonu zmniejszał się wraz ze wzrostem ACV. Największy spadek tego parametru odnotowano w przypadku betonu z kruszywem granitowym o uziarnieniu do 22 mm.

Szczegółowa analiza wyników badań wykazała również złożoność wpływu typu kruszywa na właściwości betonu. Przyjmuje się, że beton wykonany z użyciem kruszywa łamanego ma większą wytrzymałość niż z kruszywem otoczkowym, ale porównując wartości wyznaczone w przypadku dwóch badanych kruszyw łamanych (dolomitu oraz granitu) zaobserwowano znaczne różnice. Stwierdzono, że wartość wskaźnika ACV obliczona w przypadku dolomitu była bliższa wartości ACV kruszywa otoczkowego niż granitu. To z kolei miało odzwierciedlenie w analizie właściwości betonu. W przypadku betonów z kruszywem żwirowym oraz dolomitowym zauważono poprawę badanych właściwości betonu wraz ze wzrostem maksymalnego uziarnienia kruszywa. Natomiast w przypadku betonów z kruszywem granitowym stwierdzono odwrotną zależność. Wraz ze wzrostem D_{max} z 16 mm do 22 mm, wytrzymałość na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu, a także moduł sprężystości uległy zmniejszeniu. Wyniki badań cech betonu z kruszywem dolomitowym oraz wyznaczone współczynniki ACV były bliższe wynikom otrzymanym w przypadku betonu serii z kruszywem żwirowym. Można zatem wnioskować, że ogólny podział kruszyw na otoczkowe i łamane nie jest wystarczający. Zarówno dolomit, jak i granit klasyfikowane są jako kruszywa łamane, ale ich wpływ na właściwości betonu jest odmienny. Jest to szczególnie widoczne w przypadku modułu sprężystości betonu.

Przy analizie wpływu wytrzymałości kruszywa oraz maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa na właściwości betonu zaobserwowano, że oba te parametry w różnym stopniu wpływały na wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz moduł sprężystości. Nie potwierdziła się

liniowa zależność opisana w literaturze [17] pomiędzy wytrzymałością kruszywa a cechami betonu. Na podstawie zestawienia wyników badań stwierdzono, że w celu określenia wpływu właściwości kruszywa na cechy betonu potrzebną jest analiza z uwzględnieniem innych cech kruszywa niż tylko współczynnik ACV czy maksymalny wymiar ziaren. Potrzebne są dalsze badania dotyczące związku pomiędzy właściwościami kruszywa, takimi jak chropowatość powierzchni i porowatość a cechami stwardniałego betonu.

Literatura

- [1] Zhu R. Scale and Aggregate Size Effects on Concrete Fracture: Experimental Investigation and Discrete Element Modeling. Civil Engineering Écolecentrale de Nantes: Nantes. France, 2018.
- [2] Srikanth G, Safiuddin M, Haque MM, Rizwan M. Study on mechanical properties of concrete using different types of coarse aggregates. Materials Today: Proceedings. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.033>.
- [3] Sengul O, Sengul C, Keskin G, Akkaya Y, Tasdemir C, Tasdemir MA. Fracture and microstructural studies on normal and high strength concretes with different types of aggregates. Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. FraMCoS 2013; Toledo, Spain; 2013; pp. 714–725.
- [4] Kim KM, Lee S, Cho JY. Effect of maximum coarse aggregate size on dynamic compressive strength of high-strength concrete. International Journal of Impact Engineering. 2019; 125: 107–116.
- [5] Boukais A, Dahou Z, Matallah M. Maximum aggregate size effects on the evolution of the FPZ and crack extensions in concrete – Experimental and numerical investigation. International Journal of Solids and Structures. Volume 269; 2023.
- [6] Pan J, Wang W, Wang J, Bai Y, Wang J. Influence of coarse aggregate size on deterioration of concrete affected by alkali-aggregate reaction. Construction and Building Materials. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127228>.
- [7] Seitl S, Benešová A, Paredes Pascual A, Malíková L, Bujdoš D, Bílek V. Fatigue and fracture properties of concrete mixtures with various water to cement ratio and maximum size of aggregates. Procedia Structural Integrity. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.192>.
- [8] Vishalakshi KP, Revathi V, Sivamurthy Reddy S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete. Engineering Fracture Mechanics. 2018; 194: 52–630.
- [9] Beushausen H, Dittmer T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. Construction and Building Materials. Volume 74; 2015; pp. 132–139.
- [10] Zieliński K, Błaszkievicz J. Analiza porównawcza wybranych cech technicznych betonu wykonanego przy użyciu kruszywa wapiennego

i granitowego. Materiały Budowlane. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.05.10

- [11] Qureshi MA, Aslam M, Shah SNR, Otho SH. Influence of Aggregate Characteristics on the Compressive Strength of Normal Weight Concrete. Technical Journal of UET Taxila Pakistan. 2015; 20: 1–10.
- [12] Góra J, Piasta W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. Case Studies in Construction Materials. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00438>.
- [13] Jamróży Z. Beton i jego technologie. PWN; 2023.
- [14] Piotrowska E, Malecot Y, Ke Y. Experimental investigation of the effect of coarse aggregate shape and composition on concrete triaxial behavior. Mechanics of Materials. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.08.002>.
- [15] Neville, AM. Właściwości betonu. Polski Cement; 2012.
- [16] Piasta W, Budzyński W, Góra J. Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność betonów zwykłych. Przegląd Budowlany. 2012; 83: 35–38.
- [17] Piasta W, Budzyński W, Góra J. Properties of coarse mineral aggregates against properties of concrete. ACEE; 2018; pp. 97–105.
- [18] Zhao H, Wu Z, Liu A, Zhang L. Numerical insights into the effect of ITZ and aggregate strength on concrete properties. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103415>.
- [19] Góra J, Szafraniec M. Influence of Maximum Aggregate Grain Size on the Strength Properties and Modulus of Elasticity of Concrete. Appl. Sci. 2020; <https://doi.org/10.3390/app10113918>.
- [20] PN-B-06250 Beton zwykły. Polski Komitet Normalizacyjny Miar i Jakości; 1988.
- [21] PN-EN 12350-3:2019-07 Badania mieszanek betonowej – Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe, Polski Komitet Normalizacyjny; 2019.
- [22] PN-78/B-06714/40 Kruszywa Mineralne. Badania. Oznaczanie Wytrzymałości na Miążdżenie. Wydawnictwa Normalizacyjne ALFA: Warsaw, Poland; 1978.
- [23] Górak P, Kołacz Z. Ocena wpływu zastosowanego kruszywa na właściwości konstrukcyjnych betonów mostowych. Budownictwo, Technologie, Architektura. 2013;(3): 58–63.
- [24] PN-EN 12390-3:2019–07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań. Polski Komitet Normalizacyjny; 2019.
- [25] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań. Polski Komitet Normalizacyjny; 2011.
- [26] PN-EN 12390-13:2013 Badania betonu – Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ścisaniu. Polski Komitet Normalizacyjny; 2013.

Badania zrealizowano w ramach grantu 6/GnG/2022. Grant został sfinansowany z programu profaktywnego Politechniki Lubelskiej pn: „GRANTY NA GRANTY” (Grant nr: 6/GnG/2022).

Przyjęto do druku: 14.09.2023 r.