

mgr inż. Natalia Gasik-Kowalska^{1)*}

ORCID: 0009-0008-4972-4487

dr inż. Artur Koper¹⁾

ORCID: 0000-0003-4922-0816

Paulina Wieszczyńska¹⁾

Patrycja Lisiecka¹⁾

Patrycja Syska¹⁾

Wpływ recyklingowego kruszywa ceramicznego na cechy wytrzymałościowe betonu wysokowartościowego

The influence of recycled ceramic aggregate on the strength characteristics of high-performance concrete

DOI: 10.15199/33.2024.02.08

Streszczenie. Sektor budowlany, a szczególnie produkcja tak powszechnie stosowanego materiału, jakim jest beton, wymaga wdrażania rozwiązań pozwalających na ograniczenie śladu węglowego. Jest to możliwe m.in. przez zastąpienie grubego kruszywa naturalnego materiałami wtórnymi. W artykule przedstawiono wyniki badań cech wytrzymałościowych betonu, w którym kruszywo granitowe zastąpiono kruszywem recyklingowym, pochodzącym z rozkruszenia ceramicznych elementów armatury sanitarnej.

Słowa kluczowe: gospodarka cyrkularna; beton wysokowartościowy; kruszywo recyklingowe; ceramika sanitarna.

Abstract. The construction sector, especially the production of such a commonly used material as concrete, requires the implementation of solutions that reduce the carbon footprint. This is possible, among other things, by replacing coarse natural aggregate with secondary materials. The article presents the results of testing the strength characteristics of concrete, which the granite aggregate was replaced with recycled aggregate originating from the crushing of ceramic elements of sanitary fittings.

Keywords: circular economy; high-performance concrete; recycled aggregate; sanitary ceramics.

Zrównoważony rozwój i ochrona środowiska, a co za tym idzie racjonalna gospodarka odpadami, stanowią jeden z priorytetowych celów współczesnego świata [1]. Sektor budowlany zmagają się z problemem utylizacji ogromnych ilości materiałów z rozbiórki obiektów budowlanych przy ciągłej eksploatacji złóż surowców naturalnych [2]. Znaczna część odpadów budowlanych kwalifikowana jest jako odpady nieulegające biodegradacji, czego efektem są trudności w ich recyklingu [3]. Beton jako jeden z podstawowych materiałów stosowanych w inżynierii lądowej, otwiera drzwi do efektywnego wykorzystania odpadów zarówno budowlanych, jak i przemysłowych [4], a jednocześnie wprowadzenie do betonu składników pochodzących z recyklingu umożliwia spełnienie wymagań dotyczących jego parametrów konstrukcyjnych. Ponadto wiąże się to z ograniczeniem ilości odpadów przeznaczonych do składowania [5, 6].

Jako ceramiczne kruszywo recyklingowe rozumiane są odpowiednio rozdrobnione dachówki, cegły ceramiczne, płytki ceramiczne, ale również ceramika sanitarna, która jest przedmiotem badań opisanych w [7, 8]. W zależności od rodzaju materiałów ceramicznych należy zbadać możliwości wtórnego zagospodarowania poszczególnych odpadów, gdyż wytwarzane są w różnych warunkach i z wykorzystaniem różnych surowców, co wpływa na mikrostrukturę materiału [9, 10].

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii w Płocku

^{*} Adres do korespondencji: natalia.kowalska@pw.edu.pl

Produkcja wyrobów sanitarnych polega na formowaniu, suszeniu i glazurowaniu półfabrykatów z masy ceramicznej, a następnie wypalaniu w temperaturze 1200 – 1290°C. Wykorzystywanie odpadów z ceramiki sanitarnej w technologii betonu wymaga eksperymentalnego podejścia do projektowania mieszanki betonowej ze względu na brak norm i wytycznych regulujących możliwość stosowania odpadów z wyrobów sanitarnych [11, 12].

Z nielicznych opracowań dotyczących zastosowania stłuczki ceramicznej do mieszanki betonowej wiadomo, że nie zakłóca ona procesów hydratacji cementu, a ponadto zwiększa odporność betonu na oddziaływanie podwyższonej temperatury, co wynika z niskiego współczynnika rozszerzalności termicznej kruszywa ceramicznego [11, 13, 14]. W publikacjach wykazano również korzystny wpływ stłuczki na wytrzymałość betonu. Może on osiągnąć wytrzymałość na ścislenie większą niż beton wyłącznie na kruszywach naturalnych. Ponadto udział tego rodzaju kruszywa recyklingowego gwarantuje poprawę właściwości takich jak szczelność czy odporność na kruszenie materiału [13, 15, 16].

Beton bez względu na skład musi spełniać wymagania dotyczące trwałości przez cały okres użytkowania [17]. Wprowadzanie kruszyw recyklingowych do mieszanki betonowej wymaga analizy relacji pomiędzy wtórnie wykorzystywanymi materiałami a kruszywami naturalnymi oraz pozostałymi składnikami mieszanki betonowej [18]. Z tego względu przeprowadzono badania betonów o różnym poziomie zastąpienia kruszywa naturalnego rozdrobnioną ceramiką sanitarną.

W artykule opisano wpływ kruszywa recyklingowego na wybrane właściwości mieszanek betonowych i stwardniałego betonu oraz przydatność ceramiki sanitarnej do otrzymywania betonów wysokowartościowych. Przygotowując próbki do badań, założono, że warunki wykonania i pielęgnacja betonu odbywać się będą zgodnie ze standardowymi procedurami. Przyjęte założenia dotyczące technologii wykonania miały służyć ocenie możliwości uzyskania wysokowartościowego materiału z wykorzystaniem ceramicznego kruszywa recyklingowego, bez konieczności stosowania skomplikowanych i trudno dostępnych urządzeń oraz materiałów.

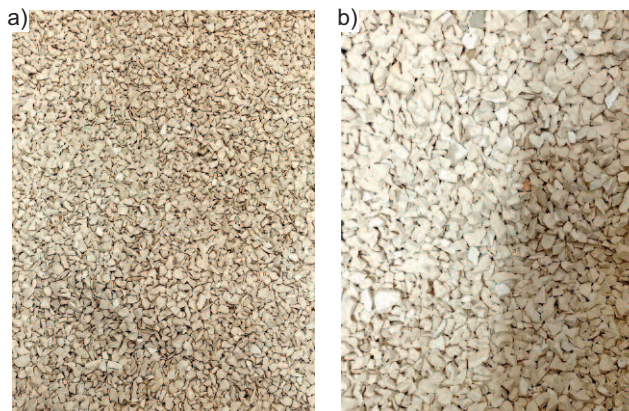
Skład mieszanki betonowej

Przy wykonaniu próbek do badań wykorzystano jako spoiwo cement portlandzki CEM I 42,5R, który umożliwia uzyskanie wysokiej wytrzymałości wczesnej i szybkiego przyrostu wytrzymałości betonu. Stosuje się go przede wszystkim do produkcji betonów zwykłych, ale może być również spoiwem w przypadku betonów wyższych klas.

Jako kruszywa grube w betonie referencyjnym wykorzystywano granit, którego gęstość nasypowa ρ_0 w stanie luźnym wynosiła 1,41 g/cm³, a w stanie zagęszczonym 1,61 g/cm³, natomiast nasiąkliwość $WA_{24} = 0,73\%$. Gęstość ziaren kruszywa wysuszonego osiągnęła wartość 2,56 g/cm³, a w stanie nasycenia i po wstępnym osuszeniu – 2,61 g/cm³. Kruszywem stosowanym do zastąpienia części granitu była ceramika sanitarna uzyskana z kruszenia sanitariatów przeznaczonych do utylizacji. Słuczka ceramiczna miała gęstość w stanie luźnym równą 1,17 g/cm³, a w stanie zagęszczonym 1,61 g/cm³. Gęstość ziaren recyklingowego wysuszonego kruszywa ceramicznego wyniosła 2,38 g/cm³, a w stanie nasycenia i po wstępnym osuszeniu – 2,59 g/cm³, natomiast nasiąkliwość $WA_{24} = 3,92\%$. Woda absorbowana przez kruszywo nie wchodzi do obliczeń w/c, dlatego też aby wykonywane betony miały założoną wartość współczynnika wodno-cementowego, kruszywo przed wprowadzeniem do mieszanki zostało zwilżone taką ilością wody, jaka wynika z badania nasiąkliwości do pełnego nasycenia. Następnie kruszywo zostało rozłożone i powietrznie osuszone w warunkach laboratoryjnych przez godzinę, w celu pozbycia się wody powlekającej ziarna, aby nie zaburzać współczynnika wodno-cementowego mieszanki betonowej. Metodę ustalono doświadczenie, obserwując zawartość wody w kruszywie po osuszeniu w różnym czasie. Za optymalny czas przyjęto 60 min.

Ceramika sanitarna charakteryzuje się znacznie wyższym poziomem wodożądności niż kruszywo granitowe. W przypadku obu kruszyw stosowana była wyłącznie frakcja 4 – 8 mm oraz 8 – 16 mm (fotografia 1). Ponadto mieszankę betonową wykonywano w dwóch wariantach współczynnika wodno-cementowego: w/c = 0,30 oraz w/c = 0,40, przy założeniu uzyskania klasy konsystencji S3. Słuczka ceramiczną zastąpiono 15, 30 oraz 45% kruszywa bazowego.

W celu uzyskania jednakowej konsystencji wszystkich zarobów konieczne było wprowadzenie domieszki upłynniającej do mieszanki betonowej. Stosowano domieszkę, która jest stabilizowanym superplastyfikatorem polikarboksyłanowym. Pozwala ona na osiągnięcie dużej wczesnej wytrzymałości



Fot. 1. Ceramiczne kruszywo recyklingowe wykorzystywane w badaniach; frakcja: a) 4 – 8 mm; b) 8 – 16 mm

Photo 1. Ceramic recycled aggregate used in the research; fraction: a) 4 – 8 mm; b) 8 – 16 mm

betonu, znacznego ograniczenia ilości wody zarobowej z zachowaniem prawidłowej urabialności oraz ograniczenia segregacji składników mieszanki i skurczu, a co za tym idzie skłonności do pękań na skutek wysychania.

Wykonano osiem zarobów różniących się współczynnikiem wodno-cementowym oraz poziomem zastąpienia kruszywa bazowego słuczka ceramiczną. Przyjęto następujące oznaczenia: w przypadku w/c = 0,40 odpowiednio: A0; A15; A30; A45, a w przypadku w/c = 0,30 – B0; B15; B30 i B45 (gdzie 0, 15, 30, 45 oznacza procentowe zastąpienie kruszywa granitowego recyklingowym kruszywem ceramicznym). Skład wykonanych mieszanek betonowych podano w tabelach 1 i 2. W ramach cyklu badawczego każdy z zarobów poddano badaniu konsystencji. Ponadto przeprowadzono oznaczenie gęstości stwardniałego betonu, wytrzymałości na ścislenie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości na zginanie oraz modułu sprężystości.

Metody badań

Badanie konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka, zgodnie z normą [19], przeprowadzono po 5 min od zakończenia mieszania składników. Zaformowane próbki do badań przechowywano w warunkach powietrzno-suchych przez 48 h od chwili zaformowania, następnie wyciągnięto je z form i umieszczono w zbiorniku wypełnionym wodą, w stanie całkowitego zawilgocenia

Próbki do badania wytrzymałości oraz gęstości stwardniałego betonu wykonano zgodnie z normą [20]. W przypadku gęstości oraz wytrzymałości na ścislenie i rozciąganie przy rozłupywaniu badano próbki sześciennie o krawędzi 100 mm bezpośrednio po wyciągnięciu z wody, natomiast wytrzymałość na zginanie badano na próbkach prostopadłościennych o wymiarach 100 x 100 x 400 mm. Do oznaczenia modułu sprężystości stosowano próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Badanie cech wytrzymałościowych prowadzono po 28 dniach od wykonania zarobów.

Gęstość betonu nasyconego wodą wyznaczono zgodnie z normą [21], a **wytrzymałość na ścislenie** zgodnie z normą [22] przez obciążanie próbki w maszynie wytrzymałościowej

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych o w/c = 0,40

Table 1. Composition of the concrete mixtures with w/c = 0.40

Składnik	Zawartość w mieszance betonowej [kg/m ³]
Składniki o stałej zawartości w każdej z serii	
Piasek	469
Woda	180
Superplastyfikator	1,350
Cement	450
100% kruszywa bazowego – mieszanka A0	
Granit frakcja 4 – 8 mm	633
Granit frakcja 8 – 16 mm	633
15% stłuczki ceramicznej – mieszanka A15	
Granit frakcja 4 – 8 mm	538
Granit frakcja 8 – 16 mm	538
Stłuczka frakcja 4 – 8 mm	95
Stłuczka frakcja 8 – 16 mm	95
30% stłuczki ceramicznej – mieszanka A30	
Granit frakcja 4 – 8 mm	443
Granit frakcja 8 – 16 mm	443
Stłuczka frakcja 4 – 8 mm	190
Stłuczka frakcja 8 – 16 mm	190
45% stłuczki ceramicznej – mieszanka A45	
Granit frakcja 4 – 8 mm	348
Granit frakcja 8 – 16 mm	348
Stłuczka frakcja 4 – 8 mm	285
Stłuczka frakcja 8 – 16 mm	285

do momentu zniszczenia (fotografia 2). **Badanie wytrzymałości na rozciąganie** wymagało dodatkowego umieszczenia próbek w ramkach z podkładkami z twardej płyty pilśniowej. Następnie kostki zostały poddane obciążaniu do chwili utraty nośności, zgodnie z normą [23]. W celu uzyskania wartości podlegających analizie wyniki badań przeliczono, stosując współczynnik skali równy 0,90 w przypadku próbek sześciennych o krawędzi 100 mm względem próbek o krawędzi 150 mm [24].

Oznaczenie wytrzymałości na zginanie polegało na centrycznym umieszczeniu prostopadłościennych próbek belkowych w maszynie wytrzymałościowej wyposażonej w cztery wałki (dwa górne obciążające oraz dwa dolne – obciążający i podpierający) i obciążaniu do momentu zniszczenia próbki [25]. **Badanie modułu sprężystości** zgodnie z normą [26] może być przeprowadzone dwiema metodami: metodą A umożliwiającą wyznaczenie początkowego i ustabilizowanego siecznego modułu sprężystości oraz metodą B pozwalającą na wyznaczenie jedynie modułu ustabilizowanego. W programie badawczym zastosowano metodę A, a cykle obciążania i odciążania przebiegały zgodnie z rysunkiem 1. Wytrzymałość na ściskanie, badaną na próbkach walcowych, niezbędną do wyznaczenia naprężeń σ_a i σ_b wyznaczono, przeliczając wytrzymałość próbek sześciennych o krawędziach 15 x 15 x 15 cm z wykorzystaniem współczynnika skali 0,80 [24].

Tabela 2. Skład mieszanek betonowych o w/c = 0,30

Table 2. Composition of the concrete mixtures with w/c = 0.30

Składnik	Zawartość w mieszance betonowej [kg/m ³]
Składniki o stałej zawartości w każdej z serii	
Piasek	501
Woda	135
Superplastyfikator	6,30
Cement	450
100% kruszywa bazowego – mieszanka B0	
Granit frakcja 4 – 8 mm	677
Granit frakcja 8 – 16 mm	677
15% stłuczki ceramicznej – mieszanka B15	
Granit frakcja 4 – 8 mm	575
Granit frakcja 8 – 16 mm	575
Stłuczka frakcja 4 – 8 mm	102
Stłuczka frakcja 8 – 16 mm	102
30% stłuczki ceramicznej – mieszanka B30	
Granit frakcja 4 – 8 mm	474
Granit frakcja 8 – 16 mm	474
Stłuczka frakcja 4 – 8 mm	203
Stłuczka frakcja 8 – 16 mm	203
45% stłuczki ceramicznej – mieszanka B45	
Granit frakcja 4 – 8 mm	372
Granit frakcja 8 – 16 mm	372
Stłuczka frakcja 4 – 8 mm	305
Stłuczka frakcja 8 – 16 mm	305

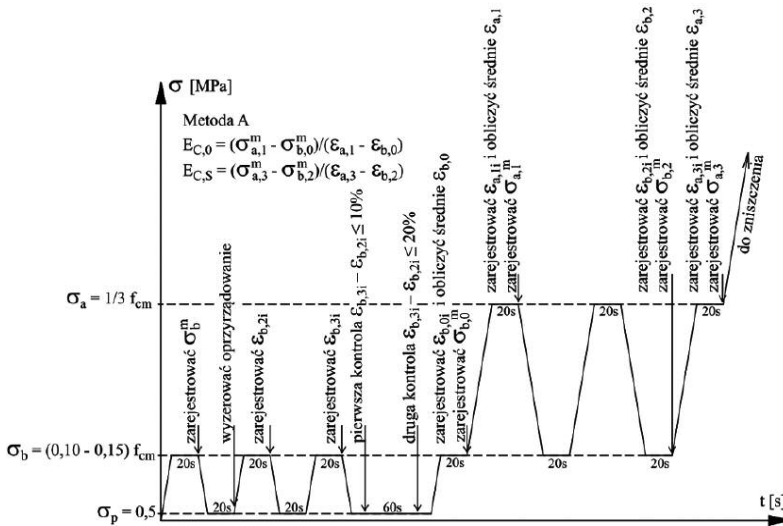


Fot. 2. Przebieg rys w próbkach B0 poddanych oznaczeniu wytrzymałości na ściskanie. Schemat zniszczenia charakterystyczny w przypadku betonu wysokiej wytrzymałości

Photo 2. The course of cracks in B0 samples subjected to compressive strength testing. Failure pattern typical of high-strength concrete

Wyniki badań

Gęstość betonu wyznaczono jako średnią arytmetyczną z pomiarów sześciu próbek sześciennych o krawędzi 100 mm. W oznaczeniu wytrzymałości na ściskanie wykorzystano również sześć próbek, a w badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu trzy próbki. Badanie wytrzymałości na zginanie prowadzono na trzech próbkach prostopadłościennych, a sieczny moduł sprężystości wyznaczono



Rys. 1. Schemat obciążenia w metodzie A wyznaczania początkowego i ustabilizowanego siecznego modułu sprężystości [27]

Fig. 1. Load diagram in method A for determining the initial and stabilized secant modulus of elasticity [27]

no na podstawie wyników badań trzech próbek walcowych. Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabeli 3.

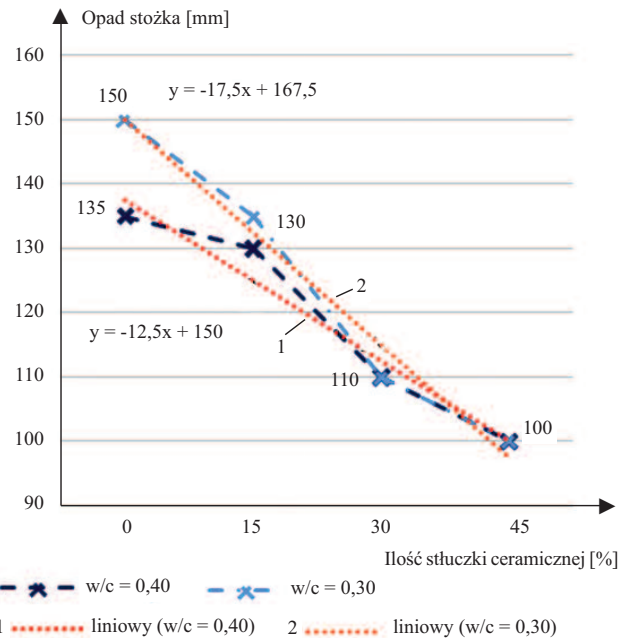
Tabela 3. Wyniki badania betonu
Table 3. The concrete test results

Parametry	100% kruszywa granitowego		15% stłuczki ceramicznej		30% stłuczki ceramicznej		45% stłuczki ceramicznej	
	A0	B0	A15	B15	A30	B30	A45	B45
Stosunek w/c	0,40	0,30	0,40	0,30	0,40	0,30	0,40	0,30
Gęstość ρ_{28} [kg/m ³]	2390	2460	2380	2420	2360	2420	2350	2390
Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	65,3	95,9	65,3	78,2	65,4	78,7	66,8	76,9
Niepewność pomiarowa wyników wytrzymałości na ściskanie [MPa]	±0,81	±2,43	±0,61	±1,27	±0,45	±1,04	±0,56	±0,81
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{ctm} [MPa]	4,74	7,17	4,84	5,04	4,89	5,03	4,37	4,94
Wytrzymałość na zginanie $f_{ctm,fl}$ [MPa]	6,92	8,89	6,99	8,74	6,94	8,93	7,37	9,41
Początkowy siecny moduł sprężystości $E_{C,0}$ [GPa]	26,54	32,35	28,02	30,82	29,15	34,24	29,55	35,49
Ustabilizowany siecny moduł sprężystości $E_{C,S}$ [GPa]	35,41	42,86	35,30	37,20	35,29	37,31	34,64	37,30
Klasa wytrzymałości betonu	C50/60	C70/85	C50/60	C55/67	C50/60	C55/67	C50/60	C55/67

Przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań wytrzymałości, w przypadku których ustalono klasy wytrzymałości [28]. Pozostałe badania wykonywane były z wykorzystaniem minimalnej liczby próbek, dlatego też analiza statystyczna została pominięta. Niepewności pomiarowe wyznaczono, wykorzystując rozkład t-Studenta z przedziałem ufności na poziomie 95%.

Analiza wyników badań

Z badania konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka wynika, że wraz ze wzrostem ilości stłuczki ceramicznej, którą zastąpiono kruszywo granitowe, pogarsza się urabialność mieszanki, a konsystencja staje się mniej ciekła. Seria mieszanek o w/c = 0,30 charakteryzuje się większą utratą konsystencji mieszanki po zastąpieniu kruszywa granitowego kruszywem ceramicznym niż seria o w/c = 0,40 (rysunek 2).



Rys. 2. Wyniki badania konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka

Fig. 2. The results of testing the consistency of the concrete mixture using the cone fall method

Betony stwardniałe o współczynniku w/c = 0,30 wykazują o ok. 2 – 3% większą gęstość niż betony o w/c = 0,40. Stwierdzono również, że gęstość betonu zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału stłuczki ceramicznej w składzie mieszanki betonowej. Może to być związane z niewielkim uziarnieniem przygotowanego kruszywa ceramicznego. Należy jednak zwrócić uwagę, że największą gęstość, istotnie różną od gęstości betonów o w/c = 0,30, wykazuje beton B0. Zastąpienie 15% masy kruszywa granitowego kruszywem ceramicznym powoduje zmniejszenie gęstości aż o 40 kg/m³.

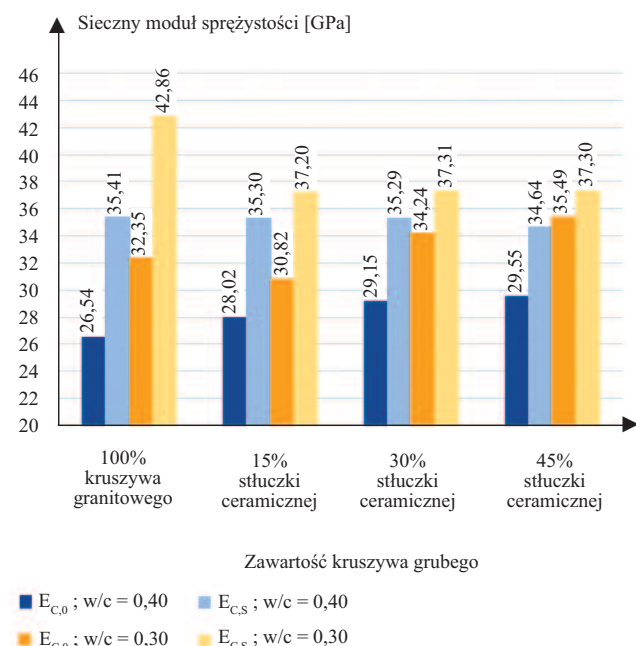
Oznacza to, że obecność kruszywa ceramicznego do pewnego stopnia utrudnia zagęszczanie mieszanki betonowej. Konsekwencją tego będą adekwatne różnice cech wytrzymałościowych.

Wyniki badania **wytrzymałości na ściskanie** kształtowały się na zbliżonym poziomie w przypadku wszystkich serii o $w/c = 0,40$ oraz trzech serii $w/c = 0,30$. Wyjątek stanowi beton B0 niezawierający stłuczki ceramicznej, który wykazuje wytrzymałość o ok. 20% większą od pozostałych betonów.

Wytrzymałość na rozciąganie betonu o $w/c = 0,30$ maleje po wprowadzeniu stłuczki ceramicznej do mieszanki betonowej o ponad 40% w porównaniu z betonem wzorcowym. Pomiędzy pozostałymi betonami różnice są nieznaczne. Można jednak zaobserwować tendencję do spadku wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości kruszywa recyklingowego w mieszance betonowej. W przypadku $w/c = 0,40$ wytrzymałość ta stopniowo się zwiększa wraz ze wzrostem ilości kruszywa ceramicznego do zawartości 30% w betonie.

Wyniki **badania wytrzymałości na zginanie** charakteryzują się niewielkim zróżnicowaniem w przypadku próbek pozbawionych stłuczki ceramicznej oraz zastąpienia w nich granitu na poziomie 15 i 30%. Dotyczy to zarówno betonu o wskaźniku wodno-cementowym 0,3, jak i 0,4. W betonach, w których zastosowano największą ilość stłuczki ceramicznej (45%), nastąpiło zwiększenie wytrzymałości w porównaniu z pozostałymi próbkami.

Sieczny moduł sprężystości badano w dwóch wariantach (rysunek 3) – początkowy ($E_{C,0}$) oraz ustabilizowany ($E_{C,S}$). Początkowy moduł sprężystości betonu o $w/c = 0,4$ zwiększa się stopniowo wraz z poziomem zastąpienia kruszywa granitowego kruszywem z recyklingu. W przypadku próbek betonu o $w/c = 0,3$ nastąpiło zmniejszenie tego parametru po wpro-



Rys. 3. Wyniki badań siecznego modułu sprężystości
Fig. 3. The test results for the secant modulus of elasticity

wadzeniu stłuczki w porównaniu z betonami pozbawionymi kruszywa ceramicznego. Następnie, wraz ze wzrostem udziału stłuczki w składzie betonu, sieczny moduł początkowy ulega zwiększeniu. Ustabilizowany moduł sieczny w przypadku $w/c = 0,4$ kształtował się na zbliżonym poziomie bez względu na stopień zastąpienia kruszywa granitowego stłuczka ceramiczną. Natomiast w przypadku $w/c = 0,3$ zaobserwowano niewielki spadek modułu wraz ze wzrostem udziału kruszywa ceramicznego w betonie. Próbkę pozbawioną stłuczki uzyskały bowiem wynik o ok. 15% większy niż te, w których nastąpiło zastąpienie kruszywa. Uzyskano jednak niemal identyczne wyniki w betonie zawierającym 15, 30 i 45% recyklingowego kruszywa ceramicznego w całkowitej ilości kruszywa grubego.

Wnioski

Gęstość betonów o $w/c = 0,40$ jest w każdym przypadku mniejsza w porównaniu z betonami o $w/c = 0,30$. Zjawisko to jest wywołane większym udziałem kruszywa w składzie mieszanek betonowych o współczynniku wodno-cementowym 0,30. Ponadto wraz ze wzrostem stopnia zastąpienia kruszywa granitowego recyklingowym kruszywem ceramicznym gęstość betonu ulega zmniejszeniu. Wynika to z mniejszej gęstości kruszywa ceramicznego w porównaniu z granitowym.

Z **badania wytrzymałości na ściskanie** wynika, że przy w/c równym 0,30 wprowadzenie do betonu ceramiki wywołało zmniejszenie tego parametru o ponad 20%. W przypadku betonów o zawartości stłuczki 15, 30 oraz 45% wyniki są zbliżone i oscylują wokół 78 MPa. Beton o $w/c = 0,40$ zarówno na kruszywie granitowym, jak i częściowo zastąpionym ceramicznym kruszywem recyklingowym uzyskał wytrzymałość na ściskanie zbliżoną do 66 MPa. Podobne zależności zaobserwowano w badaniu **wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu**. Dodatek stłuczki powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu w porównaniu z referencyjnym o $w/c = 0,30$. Odwrotną zależność zaobserwowano po analizie wyników badań **wytrzymałości na zginanie**. W przypadku betonu bazowego oraz po zastąpieniu kruszywa stłuczka ceramiczną na poziomie 15 i 30% wyniki kształtują się na podobnym poziomie, ale wprowadzenie stłuczki w ilości 45% całkowitej zawartości kruszywa grubego powoduje niewielki wzrost wytrzymałości na zginanie (o ok. 6% w przypadku obu współczynników w/c).

Na podstawie przeprowadzonych badań można przypuszczać, że wysoki poziom zastąpienia kruszywa naturalnego recyklingowym kruszywem ceramicznym będzie szczególnie korzystny w przypadku żelbetowych zginanych elementów konstrukcyjnych. Ocena użyteczności materiału przed wbudowaniem wymaga jednak przeprowadzenia dodatkowych badań dotyczących trwałości.

Wprowadzenie ceramicznego kruszywa recyklingowego do mieszanki betonowej generuje wzrost początkowego siecznego modułu sprężystości o ok. 10% w przypadku zastąpienia granitu stłuczka ceramiczną w ilości 45% w obu wariantach współczynnika wodno-cementowego. Parametr

ten wykorzystywany jest w obliczeniach sprężonych konstrukcji strunobetonowych (obliczenia strat doraźnych siły sprężającej oraz początkowego ugięcia elementu), co stanowi kolejną możliwą płaszczyznę wykorzystania betonu zawierającego w składzie słuczkę ceramiczną [27]. W przypadku betonu o $w/c = 0,4$ wprowadzenie słuczki ceramicznej nie powoduje wyraźnego zróżnicowania ustabilizowanego siecznego modułu sprężystości, natomiast w betonie o $w/c = 0,3$ wprowadzenie ceramiki powoduje zmniejszenie wartości modułu, ale bez względu na ilość wprowadzonego kruszywa ceramicznego (15, 30 i 45%) wyniki kształtują się na zbliżonym poziomie. Moduł sprężystości w dużym stopniu zależy od przyczepności pomiędzy kruszywem a matrycą cementową oraz sprężystości samego kruszywa. Oznacza to, że wprowadzenie kruszywa recyklingowego z ceramiki sanitarnej umożliwia utrzymanie zależności naprężenie – odkształcenie w betonie na poziomie zbliżonym do kruszywa granitowego.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają, że kruszywo z ceramiki sanitarnej może być stosowane jako zamiennik kruszywa grubego w betonach wysokowartościowych, po wcześniejszym określeniu trwałości takich betonów w przewidywanych warunkach eksploatacji. Ustalanie składu betonu z ceramicznym kruszywem recyklingowym wymaga analizy doświadczalnej właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu.

Literatura

- [1] Benachio GLF, Freitas MDCD, Tavares SF. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of cleaner production*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>.
- [2] Silva RV, De Brito J, Dhir RK. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- [3] Norouzi M, Cháfer M, Cabeza LF, Jiménez L, Boer D. Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis. *Journal of Building Engineering*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102704>.
- [4] Berndt ML. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*. 2009; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011>.
- [5] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*. 2007; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.
- [6] Lu W, Yuan H. A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste management*. 2011; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.018>.
- [7] Mansur MA, Wee TH, Lee SC. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. *Materials Journal*. <https://doi.org/10.14359/649>.
- [8] Pacheco-Torgal F, Jalali S. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and building materials*. 2010; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>.
- [9] Awoyera PO, Akinmusuru JO, Ndambuki JM. The performance of ceramic tile wastes as substitute for natural aggregates in laterised concrete. *Key Engineering Materials*, 2016.
- [10] Magbool HM. Utilisation of ceramic waste aggregate and its effect on Eco-friendly concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103815>.
- [11] Medina C, Frías M, De Rojas M. S. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2012; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075>.
- [12] Zegardlo B, Szeląg M, Ogrodnik P. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes–The method of production and the interfacial transition zone. *Construction and Building Materials*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.112>.
- [13] Medina C, Banfill PFG, De Rojas MS, Frías M. Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste. *Construction and Building Materials*. 2013; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.112>.
- [14] Halicka A, Ogrodnik P, Zegardlo B. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. 2013; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.063>.
- [15] Guerra I, Vivar I, Llamas B, Juan A, Moran J. Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete. *Waste management*. 2009; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.018>.
- [16] Ogrodnik P, Szulej J. The impact of aeration of concrete based on ceramic aggregate, exposed to high temperatures, on its strength parameters. *Construction and Building Materials*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.155>.
- [17] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [18] Medina C, De Rojas MS, Thomas C, Polanco JA, Frías M. Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships. *Construction and Building Materials*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.176>.
- [19] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka. Testing fresh concrete– Part 2: Slump test.
- [20] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych. Testing hardened concrete – Part 2: Making and curing specimens for strength tests.
- [21] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.
- [22] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [23] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań. Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.
- [24] Jamroz Z. *Beton i jego technologie*. Wydawnictwo naukowe PWN. 2020.
- [25] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań. Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens.
- [26] PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu – Część 13: Wyznaczenie siecznego modułu sprężystości przy ścisaniu. Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
- [27] Michałek J. Wyznaczanie modułu sprężystości betonu przy ścisaniu. *Materiały Budowlane*. 2015; <https://doi.org/10.15199/33.2015.06.23>.
- [28] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Concrete – Specification, performance, production and conformity.

Badania naukowe opisane w artykule były finansowane w ramach grantu rektorskiego dla kół naukowych działających w Politechnice Warszawskiej.

Przyjęto do druku: 30.01.2024 r.