

Właściwości betonu samozagęszczającego się zawierającego kruszywo grube z odpadowego betonu

Properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate

1. Wstęp

Szybki wzrost światowej populacji jest największym wyzwaniem w odniesieniu do zasobów naturalnych. Jeżeli zasoby te nie będą eksploatowane odpowiedzialnie, mogą ulec wyczerpaniu. Jest to powodem, dla którego w ostatnim czasie wykorzystywanie surowców wtórnych stało się szczególnie ważne. Poprawa warunków życia oraz narastający kryzys energetyczny zmusił niektóre z rozwiniętych krajów do zwiększenia ponownego wykorzystania odpadów. Materiały budowlane, a mianowicie asfalt, beton, kruszywa, a nawet drewno są odzyskiwane i przetwarzane, co minimalizuje ich niepożądany wpływ na gospodarkę i środowisko (1, 2).

Zmniejszająca się dostępność surowców naturalnych w rejonach zurbanizowanych oraz duża odległość złóż tych surowców od dużych miast powodują zwiększanie się zainteresowania wykorzystaniem odpadów budowlanych jako surowców wtórnych. Co więcej, składowanie odpadów betonowych, stanowiących główny materiał konstrukcyjny z rozbieranych budynków staje się coraz większym problemem. Kruszywa mają największy udział w składzie betonu, a więc jeżeli nie zostaną rozwinięte nowe metody otrzymywania kruszyw, spowoduje to problemy w najbliższych latach. Efektem malejącej dostępności surowców naturalnych, rosnących kosztów ich transportu oraz wpływ na środowisko spowodowało stosowanie kruszyw pochodzących z przetwarzania odpadów betonowych.

Gruz betonowy powstały po rozbiorze konstrukcji, po jego rozdrobnieniu i podziale na frakcje, może być stosowany jako kruszywo drobne lub grube. Do tej przeróbki używa się kruszarek z przesiewaczami. Duże kawałki betonu zawraca się do ponownego kruszenia, aż do uzyskania pożądanej wielkości ziaren. Odpad betonowy kruszy się zazwyczaj wstępnie do rozmiaru 50 mm, a w ponownym kruszeniu do rozmiaru końcowego 14-20 mm (3). Należy pamiętać, że podczas kruszenia cegieł powstaje więcej drobnej frakcji niż w przypadku kruszyw i betonu. Do usuwania pozostałości metalu w otrzymanym materiale stosuje się elektromagnes (4).

1. Introduction

Rapid growth of world population is the biggest threat on natural resources. These resources may run out unless used carefully. That is why recycling of waste materials has recently become significant. Improvements in living standards and increases in energy crisis forced some of the developed countries to work on recycling issue. Construction materials such as asphalt, concrete, aggregate and wood are recycled and transformed into raw materials, thus their harmful effects on economy and environment are minimized (1, 2).

Decrease in availability of natural resources in larger residential areas and the reason that the resources are usually far from the highly urbanized areas arose the interest in reuse of construction wastes. The fact that the demolished buildings are made of concrete and these concrete wastes were thrown away without treatment caused storage problems in places where they were dumped. Aggregate is the biggest part in concrete. There will be problems in the upcoming years unless new aggregate resources are found. Consequently, low amount of raw material, increasing transport expenses and environmental effects made it necessary to use the recycled aggregates.

The rubble concrete obtained from construction and debris become fine and coarse aggregate after crushing and screening. Serial crushers are usually used. Coarse chunks are fed back and re-crushed until they have the required grain size. Concrete wastes are usually crushed into 50 mm particles at first stage of crushing process, and then reduced to 14-20 mm with re-crushing (3). It is required to be taken into consideration that during the crushing process the brick materials bring out more fine materials than the normal aggregates and concrete. Electromagnets are used to remove the metal impurities from materials (4). Some of the literature surveys about RC aggregates are summarized below.

Tabsh and Abdelfatah (5) investigated the effect of RC coarse aggregate on concrete strength. According to the toughness and stiffness test results, they found that RC aggregate are weaker than natural aggregates, but still stays within acceptable limits.

Literatura dotycząca kruszyw z recyklingu jest stosunkowo bogata zasługuje więc na omówienie.

Tabsh i Abdelfatah (5) zbadali wpływ grubych kruszyw z recyklingu na wytrzymałość betonu. Wyniki badań wytrzymałości i kruchości pokazały, iż kruszywa z recyklingu są słabsze od kruszyw naturalnych, jednak pozostają w akceptowalnym zakresie. Autorzy podsumowali wyniki badań stwierdzeniem, iż betony wykonane z kruszyw z recyklingu mają wytrzymałość 10% do 25% mniejszą od wytrzymałości betonu wykonanego z kruszyw naturalnych.

Kou i Poon (6) zbadali wpływ kruszyw otrzymanych z betonu wysokowartościowego na właściwości mechaniczne i trwałość betonu. Wytrzymałość na ściskanie betonu zawierającego kruszywa pochodzące z recyklingu betonu o wytrzymałości pomiędzy 80 a 100 MPa, była zbliżona lub większa od wytrzymałości zwykłych betonów.

Faleschini i in. (7) zbadali wpływ kruszyw z recyklingu na własności reologiczne świeżego betonu. Autorzy badali mieszanki betonowe, w których 20% i 35% kruszywa grubego zastąpiono kruszywem z recyklingu. Przebieg krzywych płynięcia w badaniach reologicznych tych betonów był zgodny z modelem Bingham.

Xiao i in. (8) badali zmiany wytrzymałości na ściskanie betonów o różnej zawartości kruszywa z recyklingu. Uzyskane wyniki pokazały, iż wzrost zawartości kruszywa z recyklingu zmniejsza wytrzymałość betonu na ściskanie.

Mukharjee i Barai (9) zbadali właściwości strefy przejściowej oraz wytrzymałość na ściskanie betonów zawierających koloidalną krzemionkę oraz kruszywo z recyklingu. Zastąpienie kruszyw naturalnych kruszywem z recyklingu spowodowało znaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości, a także zwiększenie porowatości strefy przejściowej kruszywo matryca cementowa w badanych betonach. Wytrzymałość oraz mikrostruktura betonów zawierających kruszywo z recyklingu poprawiły się po zastosowaniu koloidalnej krzemionki.

Soares i in. (10) ocenili wpływ zastosowania kruszyw pochodzących z recyklingu betonu prefabrykowanego klasy C35-C40. Właściwości betonów z kruszywem z recyklingu były podobne do wyników uzyskanych dla betonu wzorcowego.

Kou i Poon (11) badali wpływ wysokiej temperatury na właściwości betonu z kruszywa z recyklingu. Wyniki pokazały, że wysoka temperatura w mniejszym stopniu pogorszyła właściwości mechaniczne i trwałość betonów zawierających kruszywa z recyklingu w porównaniu z betonem wzorcowym.

Khoshkenari i in. (12) zbadali wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu betonów zwykłych i wysokowytrzymałościowych, zawierających kruszywo z recyklingu frakcji 0-2 mm po 3, 7 oraz 28 dniach dojrzewania. Wyniki badań wykazały, że zastosowanie kruszywa z recyklingu zwiększa współczynnik absorpcji wody oraz zmniejsza wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu, a efekt ten był bardziej widoczny w przypadku wytrzymałości na rozciąganie niż wytrzymałości na ściskanie.

As a result of the study authors concluded that the strength of concrete made from RC aggregates were 10% to 25% lower than for conventional concrete made of natural aggregates.

Kou and Poon (6) investigated the effect of RC aggregate on mechanical and durability properties of high performance concrete. They observed that compressive strength of concrete made of aggregates obtained from crushing process of concrete which strength was 80 and 100 MPa, was similar or higher than strength of conventional concrete.

Faleschini et al. (7) investigated the effect of RC aggregate on rheological parameters of fresh concrete. Authors prepared concrete mixes by using RC aggregate instead of 20% and 35% of coarse aggregate. They concluded that shear stress-strain diagram of concrete prepared with RC aggregate was compatible with Bingham Model.

Xiao et al. (8) observed the change of concrete compressive strength containing different amounts of RC aggregate under different strain rates. They conclude, that increasing content of RC aggregate results in decrease of compressive strength.

Mukharjee and Barai (9) investigated interstitial transition zone properties and compressive strength of concrete including nano-silica and RC aggregate. Use of RC aggregate replacing whole natural aggregates affected compressive strength of concrete and transition zone properties significantly. They emphasized that compressive strength of concrete and elasticity were reduced, and transition zone porosity was increased with the use of RC aggregate. Strength and microstructure of RC bearing concrete was improved when nano-silica was used.

Soares et al. (10) evaluated the effects of the use of RC aggregate obtained from crushing of C35-C40 class concrete from precast concrete elements. As a result of this evaluation they found out that the RC aggregate-bearing concrete performed similarly to the control concrete.

Kou and Poon (11) investigated the effect of high temperature on the properties of concrete prepared with RC aggregate. It was found that mechanical and durability properties of concrete with RC aggregate under high temperature were deteriorated less comparing to reference concrete.

Khoshkenari et al. (12) measured after 3, 7 and 28 days the compressive and splitting tensile strength of the normal and high strength concrete prepared with 0-2 mm sized RC aggregate. As a result of this investigation they concluded that, use of RC aggregate increased water absorption of concrete and decreased compressive and splitting tensile strength. They found that the reduction of splitting tensile strength was greater than that of the compressive strength.

There are many studies on the use of RC aggregate in concrete mixtures. It is usually concluded, that the use of RC aggregate affects the properties of fresh concrete mix negatively (13 – 17). However; in this study in order to reduce this effect, RC aggregate

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY ORAZ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU I POPIOŁU LOTNEGO
 CHEMICAL COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT AND FLY ASH

Składnik Component, %	Cement	Popiół lotny Fly ash	Skład fazowy cementu [Bogue], % / Cement phase composition [Bogue], %	Cement	Popiół lotny Fly ash	
SiO ₂	19.52	47.07	C ₃ S C ₂ S (%) C ₃ A (%) C ₄ AF (%)	57	-	
Al ₂ O ₃	5.39	11.56	C ₂ S	14	-	
Fe ₂ O ₃	2.48	7.22	C ₃ A	10	-	
CaO	62.5	15.94	C ₄ AF	8	-	
MgO	1.09	7.77	Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	Cement	Popiół lotny Fly ash	
K ₂ O	0.8	3.04	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa 28-day/dni	7-day/dni	39.3	-
Na ₂ O	0.27	1.59		49.6	-	-
SO ₃	3.41	2.78	Wskaźnik pucolanowości Strength activity index, % 28-day/dni	7-day/dni	-	69
Cl	0.0074	-		-	79	-
straty prażenia / LOI	1.42	-	Uziarnienie / Fineness	Powierzchnia wg. Blaine'a, m ² /kg Blaine specific surface, m ² /kg/	356	398
Pozostałość nierozpuszczalna Insoluble residue	0.63	-		Pozostałość na sicie 0,090 mm, % Residue on 0.090 mm sieve, %	1.2	6.3
Suma / Total	99.87	98.89		Pozostałość na sicie 0,032 mm, % Residue on 0.032 mm sieve, %	24.1	12.8

Jest wiele badań dotyczących zastosowania kruszyw z recyklingu w mieszankach betonowych. Zazwyczaj wynika z nich, że kruszywa takie niekorzystnie wpływają na właściwości świeżego betonu (13–17). Żeby zminimalizować ten efekt, w opisywanych badaniach zastosowano kruszywo z recyklingu po wstępnym zwilżeniu. Przygotowano pięć składów betonu samozagęszczającego [BSZ] zawierającego 25%, 50%, 75% i 100% oraz bez kruszywa z recyklingu, zastępującego grube kruszywo wapienne. Zbadano rozpliw, czas wypływu z V-lejka oraz współczynnik przepływu w L-pojemniku mieszanek BSZ. Zmierzono wytrzymałość na ściskanie, zginanie i rozciąganie oraz energię pęknięcia dojrzałych betonów.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

W doświadczeniach stosowano cement portlandzki CEM I 42.5R zgodny z normą EN 197-1 oraz popiół lotny wapienny. Składy chemiczne oraz właściwości fizyczne stosowanych materiałów do badań deklarowane przez dostawców pokazano w tablicy 1.

Zastosowano dwa rodzaje kruszyw grubych o maksymalnym uziarnieniu 15 mm, natomiast drobne kruszywo było tylko wapienne, a beton wzorcowy wykonano z drobnego i grubego kruszywa

were used in water saturated surface dry [SSD] state. Five SCC mixtures were produced using 25%, 50%, 75%, 100% and without RC aggregate instead of limestone coarse aggregate. Slump flow, V-funnel flow time and L-box passing ratio of fresh SCC mixes were measured. Compressive, splitting tensile and flexural strength of the hardened SCC, as well as the impact of fracture energy, were also determined.

2. Materials and methods

2.1. Materials

CEM I 42.5R Portland cement compatible with EN 197-1 standard and class C fly ash were used as binders. The chemical and physical properties of cement and fly ash given by the producers are shown in Table 1.

Two different types of aggregate with maximum size of 15 mm were used. Crushed limestone was used as reference fine and coarse aggregate. RC aggregate was obtained from waste concrete of compressing strength within the range of 7 to 25 MPa. Concrete wastes were crushed into small pieces by a hammer at first, and then crushed in laboratory-type jaw crusher. Then they were sieved in order to obtain 5-15 mm sized aggregate.

wapiennego. Kruszywo z recyklingu otrzymano z odpadowych betonów o wytrzymałości na ściskanie od 7 do 25 MPa. Gruz betonowy pokruszono na mniejsze kawałki młotkiem, a następnie rozdrobniono w laboratoryjnej kruszarce szczękowej. Następnie materiał przesiano w celu otrzymania frakcji 5-15 mm. Wyniki analizy sitowej podano w tablicy 2. Gęstość oraz nasiąkliwość kruszyw określono zgodnie z normą EN 1097-6. Skład chemiczny oraz właściwości fizyczne kruszyw przedstawiono w tablicach 3 oraz 4. Zdjęcia mikroskopowe kruszyw przedstawiono rysunkach 1 oraz 2. Na podstawie zdjęć przedstawionych na rysunkach 1 i 2 można stwierdzić, iż kruszywo z recyklingu ma bardziej nieregularną teksturę powierzchni niż kruszywo wapienne. Na podstawie danych przedstawionych w tablicy 4 można stwierdzić, iż kruszywo z recyklingu ma większą nasiąkliwość ze względu na większą porowatość, co wpływa niekorzystnie na właściwości świeżej mieszanki betonowej. W celu uniknięcia tego efektu, kruszywo betonowe zanurzono w wodzie na 24 godziny i wprowadzono do mieszanki betonowej w stanie nasyconym, ale powierzchniowo suchym [SSD].

2.2. Składy mieszanek

Przygotowano pięć mieszanek BSZ, w których 25%, 50%, 75% i 100% grubego kruszywa wapiennego zastąpiono kruszywem z recyklingu, natomiast beton wzorcowy wykonano z kruszywa wapiennego. We wszystkich mieszankach stosunek woda/spoiwo oraz udział kruszywa grubego wynosił odpowiednio 0,44 i 0,45-0,47. Rozpływ wszystkich mieszanek wynosił 670 ± 20 mm. W celu otrzymania odpowiedniego rozplywu zastosowano eter polikarboxylowy jako superplastyfikator. Właściwości tej domieszki podano w tablicy 5. W tablicy 6 przedstawiono składy mieszanek betonowych.

2.3. Metody

Test rozplywu, czas wyplywu z V-lejka oraz współczynnik przepływalności dla L-pojemnika zostały oznaczone zgodnie z EFNARC-2005 (18). Gęstość mieszanek oraz dojrzałych betonów

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD CHEMICZNY KRUSZYW

CHEMICAL COMPOSITION OF AGGREGATES

Składnik Component, %	Kruszywo węglanowe Limestone aggregate	Kruszywo z recyklingu RC aggregate
SiO ₂	1.41	15.41
Al ₂ O ₃	0.38	4.49
Fe ₂ O ₃	0.35	1.40
CaO	55.10	65.19
MgO	0.50	0.84
SO ₃	0.06	0.90
Na ₂ O	-	0.44
K ₂ O	0.20	0.62
LOI	40.3	9.56
Suma / Total	98.30	98.85

Tablica 2 / Table 2

ANALIZA SITOWA KRUSZYW

SIEVE ANALYSIS OF AGGREGATES

Rozmiar sita Sieve size, mm	Przechodzi, % / Passing, %		
	Kruszywo węglanowe Limestone aggregate		Kruszywo z recyklingu RC aggregate
	5/15 mm	0/5 mm	5/15 mm
31.5	100	100	100
25	100	100	100
16	100	100	100
8	41	100	23.3
4	6	97	1
2	2	75	0
1	0	51	0
0.5	0	31	0
0.25	0	20	0
0.125	0	12	0

Sieve analysis of obtained aggregates is shown in Table 2. Specific gravity and water absorption capacity of aggregates were determined according to the EN 1097-6 standard.

Chemical composition and physical properties of aggregates are shown in Table 3 and Table 4 respectively.

Microstructure of aggregates under light microscope are shown in Figs. 1 and 2.

RC aggregate has a higher surface roughness than the limestone aggregate as can be seen on Figs. 1 and 2. The measurements [Table 4] are showing that RC aggregates have higher water absorption capacity since they are more porous. It is known that the properties of concrete mixtures would be affected negatively because of the high water absorption capacity of RC aggregate. In order to dispose this negative effect, RC aggregates were soaked in water for 24 hours before mixing and used as SSD in concrete mix.

2.2. Mix proportions

Five SCC mixes were prepared without and with 25%, 50%, 75% and 100% replacement of limestone coarse aggregate by RC aggregate. In all mixes water/binder ratio and coarse aggregate/total aggregate ratio was kept constant as 0.44 and 0.45-0.47, respectively. Moreover, flow value of all of the SCC mixtures were kept constant equal 670 ± 20 mm. A polycarboxylate-ether based admixture was used to provide the required flow. Properties of this admixture were given by producer and shown in Table 5. Corrected mix proportions of SCC mixtures are shown in Table 6.

2.3. Test procedures

Slump flow, V-funnel flow time and L-box passing ratio tests were performed in accordance with EFNARC-2005 (18). The density of the concrete mixtures both in fresh and hardened states were

oznaczono zgodnie z normami EN 12350-6 oraz EN 12390-7. Badanie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie po 28 dniach wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 mm zgodnie z normami EN 12390-3 oraz EN 12390-6. Dodatkowo zbadano wytrzymałości na zginanie po 28 dniach dojrzewania na próbkach o rozmiarze 100x100x600 mm zgodnie z normą EN 12390-5. Badania udarności przeprowadzono na próbkach w kształcie walca o średnicy 150 mm i wysokości 64 mm, wyciętych z cylindrów 150x300 mm po 28 dniach dojrzewania. Podczas badania młot ważący 4.5 kg [m] opuszczano z wysokości 450 mm [h], zgodnie z normą ACI 544.2R-89 (19). Obciążenie pomiędzy młotem i próbką było przenoszone przez stalową kulę o średnicy 64 mm. Zmierzono liczbę uderzeń [N] po której nastąpiło pęknięcie próbki. Na podstawie równania 1 obliczono energię pęknięcia [E] w dżulach (20):

$$E = m \cdot g \cdot h \cdot N \quad [1]$$

gdzie g to przyspieszenie ziemskie [9.81 m/s²].

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Właściwości mieszanek betonowych

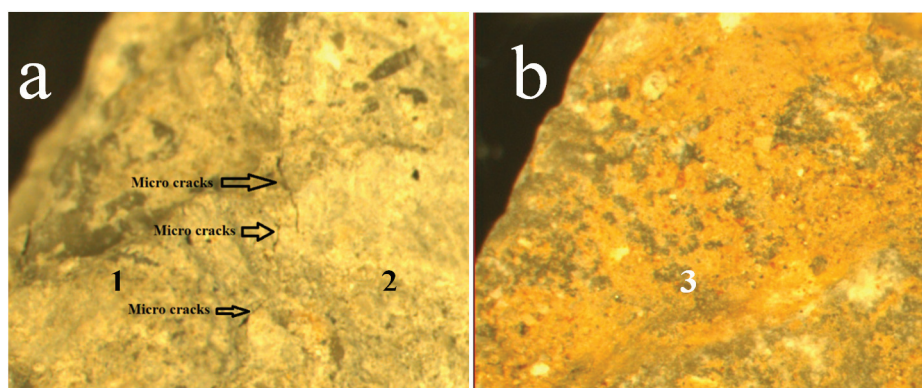
Zwiększenie udziału kruszywa z recyklingu zmniejsza gęstość mieszanek Wyniki przedstawione w tabelicy 4 pokazują mniejszą gęstość kruszywa z recyklingu w stosunku do kruszywa wapiennego. Analiza składów mieszanek przedstawionych w tabelicy 6 wykazuje, że zwiększenie ilości kruszywa z recyklingu zmniejsza wymaganą ilość stosowanego superplastyfikatora niezbędną do uzyskania zakładanego rozptywu świeżej mieszanki. Rozptyw, czas przepływu przez V-lejek oraz współczynnik przepływalności w L-pojemniku dla badanych mieszanek BSZ przedstawiono w tabelicy 7. Rozptyw mieszanek zawierał się w granicach od 660 mm do 690 mm. Wartości te są zgodne z wymaganiami EFNARC 2005 (18). Wraz ze zwiększeniem udziału kruszywa z recyklingu rozptyw nieznacznie się zwiększał, co może być efektem zmniejszenia się granicy płynięcia mieszanek. Co więcej, czas przepływu przez V-lejek skraca się z 34 sekund do 8 sekund przy zwiększeniu udziału kruszywa z recyklingu: czas przepływu przez V-lejek był czterokrotnie krótszy w przypadku mieszanki zawierającej 100% kruszywa z recyklingu w stosunku do mieszanki wzorcowej. Większy czas wypływu wskazuje na

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYW

PHYSICAL PROPERTIES OF AGGREGATE

	Kruszywo węglanowe Limestone aggregate		Kruszywo z recyklingu RC aggregate
	0/5 mm	5/15 mm	5/15 mm
Gęstość nasypowa [zagęszczone], kg/m ³ Bulk density [compacted], kg/m ³ /	1889	1573	1368
Gęstość nasypowa [luźno usypane], kg/m ³ Bulk density [loosely packed], kg/m ³	1673	1480	1215
Gęstość właściwa [nasycone, powierzchniowo suche], g/cm ³ Specific gravity [saturated surface dry], g/cm ³	2.65	2.68	2.45
Nasiąkliwość, % Water absorption, %	0.92	0.30	4.88
Młyn Los Angeles, Utrata masy, % Los Angeles, Loss on mass, %	-	25	33



Rys. 1. Powierzchnia kruszyw pod mikroskopem optycznym, a: kruszywo z recyklingu, b: kruszywo z wapienia

Fig. 1. Surface of aggregates under light microscope, a: recycled concrete aggregate, b: crushed limestone aggregate

determined in accordance with EN 12350-6 and EN 12390-7 standards, respectively. The 28-day compressive strength, splitting tensile strength were obtained on 150 mm cube specimens in accordance with EN 12390-3 and EN 12390-6 respectively. In addition, center point flexural strength of 100x100x600 mm prism specimens were determined after 28 days of curing in accordance with EN 12390-5. Impact resistance tests were performed on 150 mm in diameter and 64 mm high discs that were cut from 150x300 mm cylindrical concrete samples at 28 days age. In this test, a hammer weighing 4.5 kg [m] was dropped from a height of 450 mm [h] in accordance with ACI 544.2R-89 (19). Load between the hammer and the sample was transferred via a 64 mm wide steel ball. Number of drops [N] required to fracture the specimens were observed and recorded. Impact energy [E] was calculated in joule by using Equation 1 (20):

$$E = m \cdot g \cdot h \cdot N \quad [1]$$

where g is acceleration of gravity [9.81 m/s²].

większą lepkość mieszanki. Zależność rozplywu i czasu wypływu z V-lejka dla badanych mieszanek BSZ przedstawiono na rysunku 3. Istnieje silna zależność pomiędzy rozplywem a czasem wypływu z V-lejka. Wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z recyklingu następował spadek szybkości przepływu w L-pojemniku. Wymagania stawiane mieszankom BSZ (18) określają stosunek H_2/H_1 , uzyskany z badania przepływu w L-pojemniku jako większy lub równy 0,8. Mieszanki o zawartości kruszywa z recyklingu do 75% spełniały to wymaganie. Niemniej jednak, wraz ze wzrostem udziału kruszywa z recyklingu zmniejszał się przepływ mieszanek, co wynikało najprawdopodobniej z mniejszej lepkości. Podsumowując, badania świeżych mieszanek betonowych pokazały, że można uzyskać mieszanki samozagęszczające się zgodnie z wymaganiami EFNARC 2005 (18) przy zastosowaniu kruszywa z recyklingu w ilości do 75% masy kruszywa grubego.

Wyniki opublikowane do tej pory wykazują, iż zastosowane kruszywo z recyklingu wpływa niekorzystnie na właściwości świeżych mieszanek betonowych (7). Niemniej jednak, wyniki przedstawione powyżej wskazują, że zastosowanie tych surowców odpadowych może korzystnie wpływać na właściwości świeżych mieszanek betonu samozagęszczającego się. Jednak aby osiągnąć pożądane wyniki, należy zastosować kruszywo z pokruszonego betonu w stanie nasyconym wodą, co ogranicza zdolności absorpcyjne oraz poprawia efektywność działania superplastyfikatorów stosowanych w mieszance betonowej.

3.2. Właściwości stwardniałego betonu

3.2.1. Wytrzymałość

Wytrzymałość na ściskanie betonów przedstawiono w tabelicy 8. Każdy wynik jest średnią z trzech pomiarów. Na rysunku 4 przedstawiono względną wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i zginanie betonów zawierających kruszywo z recyklingu w odniesieniu do wytrzymałości betonu wzorcowego. Zamiana kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu do 75% nie wpływa znacząco na wytrzymałość na ściskanie badanych betonów. Natomiast w przypadku zastąpieniu kruszywa wapiennego w 100%, wytrzymałość na ściskanie maleje o 16%. Powodem tak znacznego spadku może być większa wytrzymałość kruszywa wapiennego, wynikająca z jego mniejszej porowatości. Wiadomo, że powierzchnia kruszywa z recyklingu pokryta jest warstwą zaprawy, która może ulec uszkodzeniu podczas kruszenia. Co więcej, kruszywo z recyklingu pochodzi z gruzu betonowego o małej wytrzymałości.

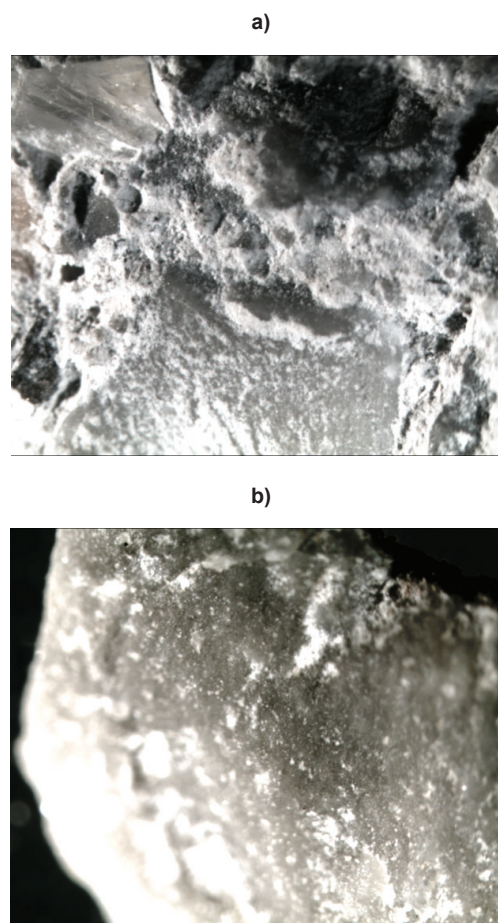
Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI SUPERPLASTYFIKATORA

PROPERTIES OF HIGH RANGE WATER REDUCING ADMIXTURE

Typ / Type	Zawartość alkaliów Alkali content % _{Na2O}	Gęstość Density, g/cm ³	Zawartość substancji stałej Solid content, %	Chlorki Chloride content, %	pH, 25 °C	Zakres dozowania Operating range %*
Eter polikarboksylowy/ Polycarboxylate ether	< 5	1.10	35.7	0.012	6.0	0.6 - 2.0

* Względem masy cementu / By mass of cement



Rys. 2. Powierzchnia kruszywa pod mikroskopem optycznym [x10], a: kruszywo z recyklingu, b: kruszywo wapienne

Fig. 2. Surface of aggregates under light microscope [x10], a: recycled concrete aggregate, b: crushed limestone aggregate

3. Test results and discussion

3.1. Properties of fresh concrete mix

The increase in ratio of limestone aggregate replacement by RC aggregate results in decrease of density of SCC mixtures. Data presented in Table 4 shows that the RC aggregate has lower specific gravity than limestone aggregate. Analysis of mix proportions shown in Table 6, indicates, that increase in aggregate replacement by RC, reduce the dosage of superplasticizer needed to provide the same flow value. Flow, V-funnel flow time and L-box passing ratio of produced SCC mixes are shown in Table 7.

Tablica 6 / Table 6

SKŁADY BETONÓW

CONCRETE MIX PROPORTIONS

Składnik, kg/m ³ / Component, kg/m ³		Zawartość grubego kruszywa z recyklingu, % RC aggregate content, %				
		25	50	75	100	
Cement		346	347	347	348	349
Popiół lotny / Fly ash		99	99	99	99	100
Woda / Water		198	198	199	199	199
Kruszywo Aggregate	Węglanowe drobne Fine limestone	903	887	870	855	840
	Węglanowe grube Coarse limestone	744	560	374	187	0
	Kruszywo z recyklingu Coarse RC	0	187	374	561	750
Superplastyfikator / Superplasticizer		2.19	2.20	2.13	2.03	1.84
Stosunek woda/spoiwo / Water to binder ratio		0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
Udział kruszywa grubego / Coarse agg. fraction.		0.45	0.46	0.46	0.47	0.47
Gęstość mieszanki / Mix density, kg/m ³		2292	2279	2265	2251	2239
Pyły / Powder		450	450	450	450	450

Tabela 7 / Table 7

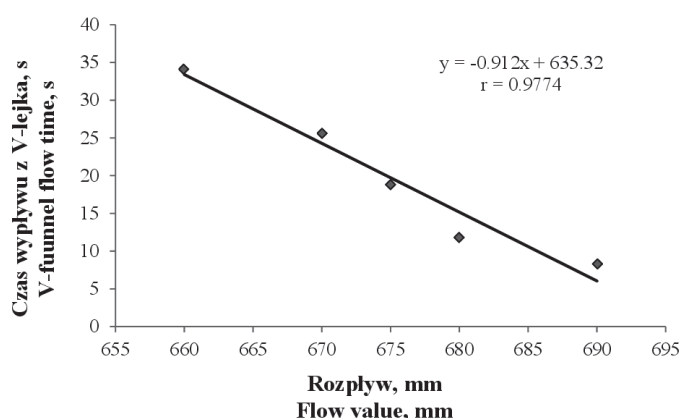
WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH

PROPERTIES OF FRESH SCC MIXES

Zawartość kruszywa z recyklingu RC aggregate content	Rozptyw Slump flow, mm	Wypływ z V-lejka V-funnel flow time, s	L-pojemnik / L-box		
			Flow time to 20 cm, s	Flow time to 40 cm, s	H ₂ /H ₁
0 %	660	34.1	1.2	2.6	0.95
25 %	670	25.6	1.1	2.0	0.93
50 %	675	18.8	0.8	1.5	0.90
75 %	680	11.8	0.8	1.7	0.88
100 %	690	8.3	0.7	1.8	<0.80

Może to być przyczyną mniejszej wytrzymałości kruszywa z recyklingu w stosunku do kruszywa wapiennego. Wyniki ścieralności w bębnie Los Angeles [tablica 4] pokazują większą stratę masy kruszywa z recyklingu w porównaniu z kruszywem wapiennym.

Zastąpienie 25%, 50%, 75% oraz 100% grubego kruszywa wapiennego kruszywem z recyklingu powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie betonów odpowiednio o 5%, 6%, 9% i 11%. Natomiast w przypadku wytrzymałości na zginanie zastąpienie nawet 100% kruszywa wapiennego kruszywem z recyklingu zmniejsza ten parametr jedynie o 5%. Wraz ze wzrostem udziału kruszywa z recyklingu wytrzymałości na rozciąganie i zginanie maleją w mniejszym stopniu niż wytrzymałość na ściskanie. Może to być spowodowane większym wpływem właściwości strefy przejściowej matrycy cementowej z kruszywem na wytrzymałość na zginanie i rozciąganie niż na wytrzymałość na ściskanie. Rysunki 1 i 2 pokazują bardziej szorstką powierzchnię kruszywa z recyklingu, co może powodować mniejszą porowatość strefy przejściowej zaczynu z kruszywem w przypadku betonów z tym kruszywem odpadowym. Dobrą korelację wytrzymałości



Rys. 3. Zależność rozptywu i czasu wypływu z V-lejka dla badanych mieszanek BSZ

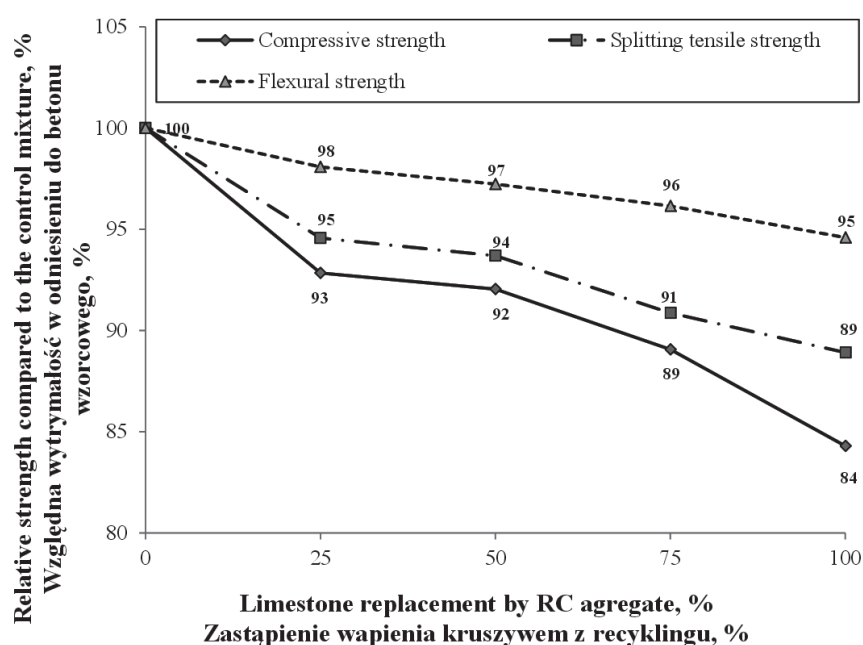
Fig. 3. Relationship between flow value and V-funnel flow time for SCC mixes

Tablica 8 / Table 8

WYTRZYMAŁOŚĆ STWARDNIAŁYCH BETONÓW ORAZ ENERGIA PĘKANIA POD WPLYWEM UDERZEŃ

STRENGTH AND FRACTURE ENERGY UNDER IMPACT LOAD OF HARDENED SCC

Zawartość kruszywa z recyklingu RC aggregate content	Wytrzymałość / Strength, MPa			Liczba uderzeń Number of blows to cause fracture	Energia uderzeń Impact energy, J
	Ściskanie Compressive	Rozciąganie przy rozłupywaniu Splitting tensile	Zginanie Flexural		
0 %	50.3	4.6	8.3	22	437
25 %	46.7	4.4	8.2	18	358
50 %	46.3	4.3	8.1	13	258
75 %	44.8	4.2	8.0	12	238
100%	42.4	4.1	7.9	9	179



Rys. 4. Względne wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i zginanie BSZ zawierających kruszywo z recyklingu w odniesieniu do betonu wzorcowego

Fig. 4. Relative values of compressive, flexural and splitting tensile strengths for concrete containing different RC aggregate addition

na ściskanie z wytrzymałością na rozciąganie oraz na zginanie przedstawiono na rysunku 5.

3.2.2. Udarność badanych BSZ

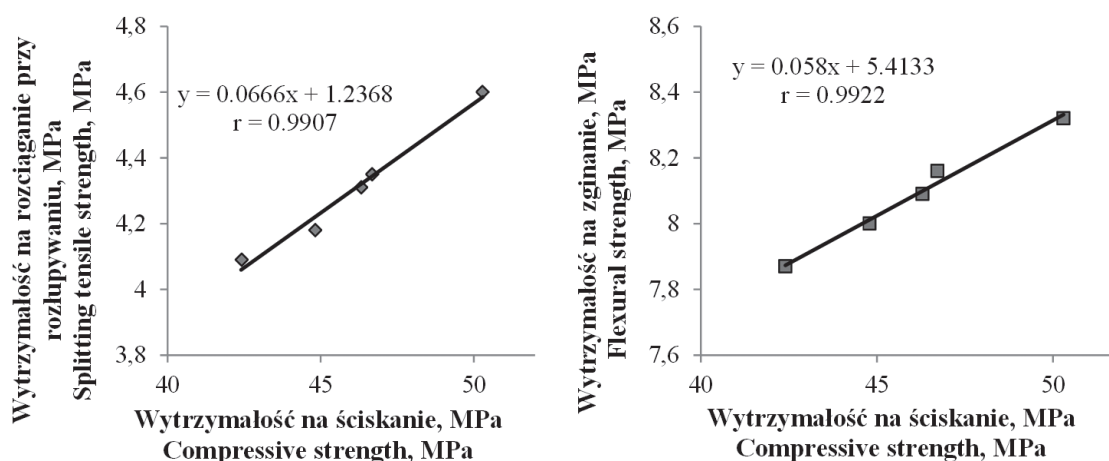
Wyniki badań udarności próbek betonów samozagęszczających się po 28 dniach dojrzewania, podających liczbę uderzeń powodujących pęknięcie i energię pęknięcia zestawiono w tablicy 8. Dodatkowo na rysunku 6 przedstawiono względną energię pęknięcia próbek betonowych zawierających kruszywo z recyklingu w odniesieniu do betonu wzorcowego.

Wyniki przedstawione na rysunku 6 oraz w tablicy 8 pokazują, że energia pęknięcia betonów jest zawarta między 179 J a 437 J, malejąc wraz ze wzrostem udziału kruszywa z recyklingu. Rysunek 6 pokazuje spadek energii pęknięcia betonów o zawartości 25%, 50%, 75% i 100% kruszywa z recyklingu, odpowiednio o 18%, 42%, 47%

Slump flow values of SCC mixes were between 690 mm and 660 mm. Slump flow values are compatible with the SCC definition in accordance with EFNARC 2005 (18). It can be seen from the analysis, that with the increase in RC aggregate replacement level, there was a little increase in slump flow values. The increase in slump flow values of fresh concrete mixes can be a sign of decrease in yield stress of the mixture. Moreover; it can be seen from Table 7, that V-funnel flow times of SCC mixes change from 34 s to 8 s. Also the V-funnel flow time of SCC mixtures decreased with increasing RC aggregate replacement level. V-funnel flow time of the mixture including 100% of RC aggregate as coarse aggregate was 4 times shorter than that of the control mixture. The higher V-funnel flow time is indicating higher plastic viscosity of the mixtures. The relation between the slump flow value of SCC mixtures and V-funnel flow time are shown in Fig. 3. There is a close negative relationship between the slump flow and V-funnel flow time values.

There had been shorter L-box passing time with the increase of RC aggregate content. In order to fulfill SCC requirements (18), L-box test H_2/H_1 value must be between 0.8 and 1.0. Mixes with up to 75% aggregate replacement exhibited H_2/H_1 value greater than 0.8. In general, increase in limestone replacement by RC aggregate lowers the passing ability of SCC mixes. It probably arises from lower plastic viscosity of RC aggregates bearing mixes. As it can be seen from fresh concrete test results, it was found out that SCC mixtures can be produced successfully in this survey in accordance with EFNARC 2005 (18) by using RC coarse aggregate replacing up to 75% of limestone coarse aggregate.

Published data indicate, that the use of RC aggregate negatively affects fresh state properties of concrete mixtures (7). However; in this study, as can be seen from the test results, the use of RC aggregate positively affected the properties of fresh SCC mix. It is known that water absorption capacity of RC aggregate is



Rys. 5. Zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na zginanie badanych betonów

Fig. 5. Relationships between compressive strength-splitting tensile strength and compressive strength-flexural strength

i 59% w stosunku do betonu wzorcowego. Najmniejszą energię pęknięcia miał beton zawierający 100% kruszywa grubego z recyklingu. Niekorzystny wpływ kruszywa z recyklingu jest większy w przypadku badań dynamicznych niż w przypadku kwasi-statycznych badań wytrzymałości. Wynika to ze wspomnianych wcześniej pozostałości zaprawy na ziarnach kruszywa z recyklingu oraz z większej ilości mikropęknięć, również powstałych w procesie produkcji kruszywa z recyklingu. Mikropęknięcia te są podatne na propagację pod wpływem oddziaływania dynamicznego na badany beton, powodując gorsze wyniki badania udarności niż w przypadku badań wytrzymałości.

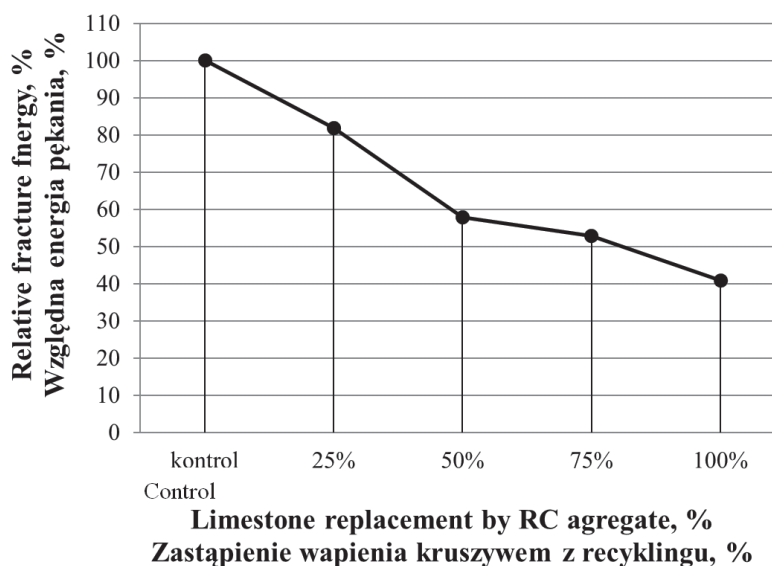
4. Wnioski

Wyniki doświadczeń przeprowadzonych z zastosowanymi materiałami pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

Zwiększenie zawartości kruszywa z recyklingu w mieszankach BSZ wpływa korzystnie na właściwości reologiczne świeżej mieszanki betonowej. Efekt ten osiągnięto dzięki zastosowaniu kruszywa w stanie nasyconym wodą, natomiast powierzchniowo suchym.

Zastąpienie grubego kruszywa wapiennego kruszywem z recyklingu wpływa niekorzystnie na wytrzymałość stwardniałego betonu. Zmniejszenie wytrzymałości było większe w przypadku wytrzymałości na ściskanie niż na rozciąganie i zginanie. Może to być związane z różnicami w budowie strefy przejściowej matrycy cementowej z kruszywem.

Zastąpienie grubego kruszywa wapiennego kruszywem z recyklingu powoduje zmniejszenie odporności na udarność otrzymanego betonu.



Rys. 6 Względna energia pęknięcia BSZ z różnymi ilościami kruszywa z recyklingu

Fig. 6. Relative fracture energy of SCC mixtures containing RC aggregate

higher than for the limestone aggregate. However, in this study, RC aggregates used in the concrete mixtures were in SSD state. The use of RC aggregates in SSD condition can also affect the superplasticizer performance positively.

3.2. Hardened concrete properties

3.2.1. Strength

The strength results of concrete after 28 days of hardening are summarized in Table 8.

Each value is the average of three measurements. Moreover, relative compressive, splitting tensile and flexural strength of RC aggregate-bearing concrete compared to the reference concrete are shown in Fig. 4.

Jest możliwość produkowania mieszanek betonu samozagęszczającego się spełniającego wymagania EFNARC dotyczące właściwości świeżego betonu i nie wykazującego gorszych właściwości mechanicznych betonu stwardniałego w przypadku zastąpienia do 75% grubego kruszywa wapiennego kruszywem z recyklingu.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować za wsparcie finansowe Rady Naukowo-Technicznej Turcji (TUBITAK) w postaci grantu nr. 213M485.

Literatura / References

1. C. Güner, H. Akbulut, G. Kürklü, Recycling in construction industry and re-evaluation of the different building materials as a raw material source, Industrial Raw Materials Symposium, Izmir, Turkey, 28-36 (2007).
2. T. Gönen, O. Onat, S. Cemalgil, B. Yilmazer, Y.T. Altuncu, A Review on new waste materials for concrete technology, Electronic Journal of Construction Technology, **8**, 36-43 (2012).
3. A. Rao, K.N. Jha, S. Misra, Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, Manage. Res. **24**, 225-33 (2007).
4. V. Corinaldesi, M. Giugliolini, G. Moriconi, Use of rubble from building demolition in mortars. Waste Manage. **22**, 893-9 (2002).
5. S.W. Tabsh, A.S. Abdelfatah, Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, Constr. Build. Mater. **23**, 1163-67 (2009).
6. S.C. Kou, C.S. Poon, Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. **77**, 501-8 (2015).
7. F. Faleschini, C. Jiménez, M. Barra, D. Aponte, E. Vázquez, C. Pellegrino, Rheology of fresh concretes with recycled aggregates, Constr. Build. Mater. **73**, 407-416 (2014).
8. J. Xiao, L. Li, L. Shen, C.S. Poon, Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading, Cem. Concr. Res. **71**, 46-55 (2015).
9. B.B. Mukharjee, S.V. Barai, Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete, Constr. Build. Mater. **71**, 570-578 (2014).
10. D. Soares, J. de Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance, Constr. Build. Mater. **71**, 263-272 (2014).
11. S.C. Kou, C.S. Poon, M. Etxebarria, Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. Cem. Concr. Compos. **53**, 73-82 (2014).
12. A.G. Khoshkenari, P. Shafigh, M. Moghimi, H.B. Mahmud, The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete, Mater. Des. **64**, 345-354 (2014).
13. M. Tuyan, A. Mardani-Aghabaglou, K. Ramyar, Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate, Mater. Des. **53**, 983-991 (2014).
14. A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan, K. Ramyar, Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates, Mater. Struct. **48**, 2629-2640 (2015).
15. N.D. Oikonomou, Recycled concrete aggregates, Cem. Concr. Compos. **27**, 315-318 (2005).

The curves of relative strength are showing that the use of RC aggregates up to 75% doesn't affect compressive strength significantly. Nevertheless, when whole coarse limestone aggregate is replaced with the RC aggregate, compressive strength of SCC decreases by 16%. The reason for reduction in compressive strength may be attributed to higher resistance of limestone aggregate compared to RC aggregate, having porous structure. It is known that the surface of RC aggregate is covered with mortar layer and this layer is highly possible to be damaged during the aggregate production process. RC aggregate was prepared from waste concrete of relatively low compressive strength. Therefore, RC aggregate is thought to be having lower strength than that of the limestone aggregate. According to the Los Angeles test results [Table 4], the weight loss in RC aggregate was higher than that of the limestone aggregate.

Data presented in Fig. 4 shows that when 25%, 50%, 75% and 100% of the coarse limestone aggregate is replaced by the RC aggregate, splitting tensile strength of RC aggregate-bearing SCC mixtures is reduced by 5%, 6%, 9% and 11% respectively. As it can be seen from Fig. 4, the usage of 100% of RC aggregate instead of limestone coarse aggregate only slightly affect the flexural strength of the SCC. Decrease in splitting tensile and flexural strengths of SCC caused by the addition of RC aggregate is lower than in case of compressive strength. It may be probably caused by the higher effect of interface transition zone [ITZ] on splitting tensile and flexural strength of concrete. The Figs. 1 and 2 show that RC aggregate has higher surface roughness than the limestone aggregate and it is the reason that the RC aggregate bearing concrete will have the less porous ITZ.

Relationships between compressive strength and splitting tensile strength as well as compressive strength and flexural strength are shown in Fig. 5. It can be seen that there is a strong linear relationship between these values.

3.2.2. Impact resistance of SCC mixtures

Number of blows to cause fracture as well as impact energy results at the end of 28 days on the specimens of SCC mixtures are shown in Table 8. Besides, relative impact energy of SCC mixtures compared to the control mixture without RC aggregate are shown in Fig. 6.

As it can be seen from Table 8 and Fig. 6, in investigated SCC the energy that created fracture due to impact ranged from 179 to 437 J. Besides, as the content of RC coarse aggregate used in SCC mixture was increasing, the fracture energy decreased. Fig. 6 shows the decrease in fracture energy of concrete, which contains 25%, 50%, 75% and 100% of RC coarse aggregate, which are 18%, 42%, 47% and 59% respectively in comparison to the control concrete. The lowest fracture energy under impact load was observed in 100% RC coarse aggregate containing-mixture. As it can be seen from test results, that when RC coarse aggregate was used instead of limestone coarse aggregate in the SCC, the reduction in dynamic effect such as impact test was higher than reduction of properties measured in quasi-static condition, like

16. R.U.D. Nassar, P. Soroushian, Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement, *Constr. Build. Mater.* **29**, 368-377 (2012).
17. K.H. Poutos, A.M. Alani, P.J. Walden, C.M. Sangha, Relative temperature changes within concrete made with recycled glass aggregate, *Constr. Build. Mater.* **22**, 557-565 (2008).
18. EFNARC, Specifications and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org (2005).
19. ACI Committee 544. ACI 544.2R-89: Measurement of properties of fiber reinforced concrete. ACI Manual of Concrete Practice (1996).
20. A. Mardani-Aghabaglou, C. Yüksel, H. Hosseinezhad, K. Ramyar, Performance of steel micro fiber reinforced mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems, *J. Green Build.* **11**, 109-130 (2016).

strength tests. During the crushing of waste concrete for production of RC aggregate, mortar covering the RC aggregate is expected to remain. During the crushing process a higher amount of micro-cracks in this mortar and RC aggregate surface are expected to occur. In RC aggregate-bearing mixture, mentioned cracks are thought to get larger easily under the dynamic impact effect in RC aggregate compared with the quasi – static strength tests.

4. Conclusion

From the results of the tests the following conclusions can be drawn:

Increase of RC aggregate content in SCC mixes affected the rheological properties of concrete mixes positively. The improvement of concrete mix properties is thought to be due to the use of RC aggregate in SSD state.

The replacement of limestone coarse aggregate by RC aggregate negatively affected strength of hardened concrete. The strength decrease was higher in the case of compressive strength than for splitting tensile strength and flexural strength. It may be probably associated with differences in ITZ properties.

Replacement of limestone aggregates by RC aggregates cause decrease in impact resistance of resulting concrete.

It is possible to produce SCC mixes without substantial worsening of mechanical properties and conforming EFNARC requirements for fresh concrete mix using up to 75% replacement of coarse limestone aggregate by RC aggregate.

Acknowledgement

The financial support of Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK) under grant no. 213M485 is greatly acknowledged.