



BARTŁOMIEJ KRAWCZYK¹⁾
 ANTONI SZYDŁO²⁾
 PIOTR MACKIEWICZ³⁾
 DARIUSZ DOBRUCKI⁴⁾

ASSESSMENT CRITERIA OF THE RECYCLED AGGREGATE CEMENT BOUND BASES

KRYTERIA OCENY PODBUDÓW ZWIĄZANYCH CEMENTEM ZAWIERAJĄCYCH KRUSZYWA POCHODZĄCE Z RECYKLINGU

STRESZCZENIE. Tematem artykułu są badania nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych w kruszarkach do wytworzenia nowych mieszanek związanych cementem, przeznaczonych na warstwy podbudowy konstrukcji nawierzchni drogowej. Z ekonomicznego i technicznego punktu widzenia rozdrobnione (przekruszone) odpady betonowe stanowią alternatywne źródła kruszyw, zastępując w mieszankach związanych cementem kruszywa naturalne. W pierwszym etapie wykonano badania kruszywa betonowego z recyklingu z uwzględnieniem obowiązujących wymagań stawianych kruszywom stosowanym w podbudowach związanych cementem. W drugim etapie wykonano badania wytrzymałości i mrozoodporności mieszanek związanych cementem na bazie kruszywa z recyklingu i kruszywa naturalnego. Przeanalizowano możliwości i ograniczenia w stosowaniu kruszywa betonowego w warstwach podbudowy związanych cementem. Na podstawie otrzymanych wyników badań udowodniono możliwość wykorzystania kruszywa betonowego pochodzącego z recyklingu do budowy trwałych podbudów związanych cementem, mimo niespełnienia przez takie kruszywo wymaganej nasiąkliwości i mrozoodporności.

SŁOWA KLUCZOWE: kruszywo betonowe z recyklingu, podbudowa zasadnicza i pomocnicza, recykling, warstwy związane cementem.

ABSTRACT. The paper deals with investigations into the possibility of using crushed concrete reclaimed from road pavements to produce new cement bound mixtures for roadbase courses. From the economic and technical points of view crushed concrete waste constitutes an alternative source of aggregates which can replace natural aggregates in cement bound mixtures. First, recycled concrete aggregate was tested with regard to the current requirements which aggregates for cement bound roadbases must meet. Then, the strength and frost resistance tests were carried out on cement bound mixtures based on recycled concrete aggregates and natural aggregates. The possibilities and limitations of the use of recycled concrete aggregate for cement bound roadbase courses were examined. The results of the performed tests proved that recycled concrete aggregate, even though it does not meet the water absorption and frost resistance requirements, can be used to build durable cement bound roadbases.

KEYWORDS: base and subbase, cement stabilized layers, concrete, recycling.

DOI: 10.7409/rabdim.019.007

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; b.krawczyk@pwr.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; antoni.szydlo@pwr.edu.pl

³⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

⁴⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; dariusz.dobrucki@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Użycie recyklowanego kruszywa betonowego w mieszankach betonowych, jako częściowo lub w pełni zastępującego kruszywa naturalne, cieszy się rosnącym zainteresowaniem w przemyśle budowlanym. Wykorzystanie destruktu betonowego do produkcji kruszywa betonowego z recyklingu (ang. *Recycled Concrete Aggregate*, RCA) pozwala na znaczne zredukowanie zapotrzebowania na drogę i coraz trudniej dostępne kruszywa naturalne. Ponadto użycie kruszywa recyklowanego prowadzi do praktycznego rozwiązania problemu środowiskowego, spowodowanego przez odpady betonowe oraz redukuje negatywny wpływ na środowisko, związany z wydobyciem kruszywa z zasobów naturalnych. Potencjał wykorzystania kruszywa betonowego jest znaczący. Oszczędności mogą zostać osiągnięte poprzez przekształcenie recyklowanego kruszywa betonowego w przydatne zasoby do produkcji nowego betonu, uwzględniając jednak pewne ograniczenia dla stosowania tego materiału. RCA jest przydatne jako substytut kruszywa naturalnego (ang. *Natural Aggregate*, NA) do produkcji betonu o akceptowalnych właściwościach i trwałości, jednakże głównym problemem z zastosowaniem RCA w nowym betonie jest jego zróżnicowana jakość, zwłaszcza gdy jest uzyskiwany w procesie wyburzania wyeksploatowanych konstrukcji betonowych. Obecnie w kraju i zagranicą prowadzone są intensywne badania nad właściwościami fizyko-mechanicznymi recyklowanego kruszywa betonowego, nie dają one jednak jak do tej pory jednoznacznej odpowiedzi, co do możliwości zastąpienia kruszywa naturalnego przez kruszywo betonowe w mieszankach betonowych. Wg niektórych badań, betony cementowe zawierające w swym składzie RCA charakteryzują się porównywalnymi parametrami wytrzymałościowymi do konwencjonalnych betonów cementowych [1]. Według innych badań, wytrzymałości betonów wytworzonych z kruszywa recyklowanego są niższe w stosunku do betonów wytworzonych z kruszywa naturalnego. Niższe są też moduły sprężystości, gorsza urabialność, niższa mrozoodporność, większy skurcz i odkształcenia przy pełzaniu [2]. Zastosowanie dodatków dyspersyjnych oraz domieszek mineralnych do świeżo zmieszanego betonu może przyczynić się do poprawienia właściwości mechanicznych betonów powstałych z recyklowanego kruszywa betonowego. Poprawa wytrzymałości na ściskanie może być uzyskana np. poprzez odpowiednie domieszki na bazie mineralnej. Właściwości betonu, takie jak mrozoodporność, wytrzymałość na ściskanie i rozłupywanie oraz nasiąkliwość zależą od procentowej zawartości kruszywa z recyklingu. Betony z kruszywem RCA charakteryzują się nieco mniejszą sztywnością w porównaniu z tradycyjnymi betonami cementowymi i z tego względu kruszywo RCA

1. INTRODUCTION

The use of recycled concrete aggregate (RCA) in concrete mixtures, as partially or completely replacing natural aggregates, has been attracting growing interest from the building industry. Thanks to the use of crushed concrete for producing recycled concrete aggregate the demand for expensive and increasingly scarcer natural aggregates can be considerably reduced. Moreover, the use of RCA leads to the practical solution of the environmental problem caused by concrete waste and reduces the adverse environmental impact connected with the extraction of aggregate from natural resources. The potential for the use of recycled concrete aggregate is considerable. Savings can be achieved by converting recycled concrete aggregate into useful resources for the production of new concrete, provided certain limitations are introduced as to the use of this material. RCA as a substitute of natural aggregate (NA) is suitable for the production of concrete characterized by acceptable properties and durability, but the main problem with the use of recycled concrete aggregate in new concrete is its variable quality, especially when RCA is obtained from the demolition of end-of-life concrete structures. Currently intensive research into the physicomaterial properties of recycled concrete aggregate is conducted in Poland and abroad. But so far it has not provided a definite answer whether in concrete mixtures natural aggregate can be replaced with RCA. According to some studies, cement concretes containing RCA are characterized by similar strength properties as conventional cement concretes [1]. According to other studies, the strength of concretes produced using recycled concrete aggregate is lower than that of concretes made of natural aggregate. Also their elastic modulus is lower, their workability worse, their frost-resistance weaker and their shrinkage and creep deformation larger [2]. The addition of dispersing agents and mineral admixtures to freshly mixed concrete can improve the mechanical properties of concretes made of recycled concrete aggregate. Their compressive strength can be improved through the use of appropriate mineral-based admixtures. The properties of concrete, such as freeze-thaw durability, compressive and splitting strength and water absorption depend on the percentage of the recycled concrete aggregate. Considering that concretes containing RCA are characterized by slightly lower stiffness than conventional cement concretes, recycled concrete aggregate will be more suitable for the lower lying (concrete base) pavement courses than the surface ones. If RCAs were to be used in pavement quality concretes, appropriate modifications

przydatne będzie raczej do stosowania w niżej leżących warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej (podbudowy z betonu), niż w nawierzchniowych betonach cementowych. Aby zastosować kruszywa betonowe z recyklingu do betonów nawierzchniowych należałoby wprowadzić i zweryfikować w badaniach odpowiednie modyfikacje składu betonu cementowego, poprzez zastosowanie specjalnego cementu lub kruszywa doziarniającego.

Wnioski wynikające z badań betonów na bazie kruszywa recyklowanego (ang. *Recycled Aggregate Concrete*, RAC), prowadzonych w ostatnich latach na całym świecie, zebrano w [3]. Analizowane są zwłaszcza możliwości częściowego i całkowitego zastąpienie kruszywa grubego w mieszance betonowej kruszywem z recyklingu. Możliwości całkowitego zastąpienia kruszywa naturalnego kruszywem recyklowanym zweryfikowano pozytywnie w przypadku betonów o wytrzymałości do C25/C30 [4], [5] (odpowiednik betonu konstrukcyjnego w budownictwie kubaturowym). Użycie drobnych frakcji RCA w nowej mieszance betonowej wymaga dokładnego zbadania, ponieważ recyklowane drobne cząstki redukują wytrzymałość betonu. Przyjmuje się, że akceptowalne jest zastąpienie 20% naturalnego piasku przez recyklowane drobne cząstki betonowe [3]. Badane były właściwości świeżego i utwardzonego betonu o różnej zawartości drobnego kruszywa recyklowanego (ang. *Fine Recycled Aggregate*, FRA) [6]. Wyniki badań potwierdziły, że użycie drobnego kruszywa z recyklingu do mieszanek betonowych może być alternatywą, jeśli kruszywo to spełnia odpowiednie wymagania. Zauważyć należy, że wszystkie betony z dodatkiem FRA miały niższą konsystencję (konsystencja metodą stożka opadowego), w stosunku do konsystencji betonu konwencjonalnego wytworzonego z naturalnego kruszywa. Wartości konsystencji były niższe z powodu szybkiej redukcji ilości wody w mieszance, jako wynik wysokiej absorpcji wody przez FRA. Na wodorzadność kruszywa z recyklingu w mieszankach betonowych zwracali również uwagę polscy autorzy w [7]. Hiszpańskie doświadczenia [8] wskazują na przydatność kruszywa z recyklingu do zastosowania w produkcji betonu jako kruszywo grube, kosztem jednak niewielkich strat właściwości mechanicznych. Strat tych da się uniknąć po zastosowaniu w produkcji betonu materiału doziarniającego w postaci kruszywa pochodzenia naturalnego.

Właściwości mechaniczne betonu z kruszywa recyklowanego (ang. *Recycled Aggregate Concrete*, RAC) zostały obszernie omówione w [9]. Badania wieloosiowe zostały wykonane na próbkach sześciennych o wymiarach 150 mm × 150 mm × 150 mm, w różnych stopniach naprężenia przy zastosowaniu aparatu trójosiowego do badania dużych obciążeń statyczno-dynamicznych. Zaobserwowano charakterystyczne sympto-

(through the use of special cement or virgin aggregate) of the cement concrete composition should be introduced and experimentally verified.

The conclusions emerging from the research on recycled aggregate concretes (RAC) conducted in the world in recent years have been collected in [3]. Particularly the possibilities of partially or completely replacing the coarse aggregate in the mixture with reclaimed aggregate are studied. The possibilities of completely replacing natural aggregate with recycled concrete aggregate were positively verified for concretes with a strength of up to C25/C30 (an equivalent of structural concrete in residential and commercial construction) [4], [5]. The use of the fine-grain fraction of RCA in a new concrete mixture needs to be thoroughly tested since the recycled fine particles reduce the strength of the concrete. It is assumed that it is acceptable to replace 20% of the natural sand in the mixture with fine recycled concrete particles [3]. The properties of fresh and hardened concrete with a different fine recycled aggregate (FRA) content were studied [6]. The results of the studies confirmed that the use of FRA in concrete mixtures can be an alternative if the aggregate meets proper requirements. One should note that all concretes with an addition of FRA had a lower consistency (determined by the slump test) than that of the conventional concrete made using natural aggregate. The consistency values were lower due to the rapid reduction of the amount of water in the mixture as a result of the high absorption of water by FRA. Also Polish researchers [7] noted the high water demand of recycled concrete aggregates. Spanish research [8] indicates that RCA can be used as coarse aggregate in concrete production, but at the expense of a slight deterioration in the mechanical properties. Such a deterioration can be avoided by adding virgin (natural) aggregate.

The mechanical properties of recycled aggregate concrete are extensively discussed in [9]. Multi-axial tests were carried out on 150 mm × 150 mm × 150 mm concrete cubes subjected to different degrees of stress in a triaxial heavy static-dynamic load testing machine. Characteristic symptoms of the failure of the specimens and the directions of the fracture were observed. Also the triaxial strength of the recycled aggregate concrete was analysed. The test results showed that the ratio of triaxial failure criterion s_{3f} to corresponding uniaxial compressive strength criterion f_c was higher for RAC than for conventional concrete (CC). Therefore a new failure criterion for unreinforced recycled aggregate concrete in different states of multi-axial stress was proposed. This provided an experimental basis for the

my uszkodzenia próbek oraz kierunki pęknięcia. Analizie poddano również wytrzymałość trójosiową betonu RAC. Wyniki badań wykazały, że stosunek kryterium trójosiowego uszkodzenia s_{3f} do odpowiadającego mu kryterium jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie f_c dla RAC był wyższy niż analogiczny stosunek dla betonu konwencjonalnego (ang. Conventional Concret, CC). Na tej podstawie zaproponowano nowe kryterium uszkodzeń dla betonu niezbrojonego z kruszywa recyklowanego (RAC), w różnych stanach wieloosiowego naprężenia. Dostarcza to eksperymentalne podstawy (fundamenty) do analizy wytrzymałości konstrukcji z RAC, poddanych złożonemu obciążeniu. Na uwagę zasługują również badania nad modelami pozwalającymi przewidywać, na podstawie składu, wytrzymałość betonów z kruszywa recyklowanego [10]. Znane są również badania nad wykorzystaniem kruszywa betonowego do produkcji betonu wałowanego (ang. *Roller Compacted Concrete*, RCC), w połączeniu z włóknami stalowymi [11]. Stwierdzono, że mieszanki betonu wałowanego wzmocnionego włóknem stalowym (ang. *Steel Fibre Reinforced*, SFR) o niskiej zawartości cementu (mniej niż 300 kg/m^3) są podatne na gromadzenie włókna, dlatego zalecane są mieszanki SFR-RCC z zawartością cementu powyżej 300 kg/m^3 . Stwierdzono ponadto, że mieszanki betonowe z recyklowanego kruszywa murarskiego osiągały o 40% mniejszą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z mieszankami z kruszywa naturalnego (NA), natomiast mieszanki wykonane z wysokiej jakości recyklowanego kruszywa betonowego miały bardzo podobną wytrzymałość do próbek wykonanych w całości z NA. Dotyczy to zarówno mieszanek RCC, jak i SFR-RCC. Dobre wyniki zostały uzyskane po przez dodanie do mieszanki 10% mikrokrzemionki. Jeszcze inne badania wykazały poprawę właściwości mechanicznych betonu z kruszywa recyklowanego po zastosowaniu domieszek krzemianu i dodatków rozproszonych z żywicą epoksydową [12]. W Korei i Japonii analizowano związki pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a modulem sprężystości betonu z kruszywa recyklowanego [13]. Opracowano korelację dla zakresu wytrzymałości 18-65 MPa, odpowiadającemu zakresowi uzyskiwanych wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywa recyklowanego. Badano także właściwości recyklowanego kruszywa betonowego wzmocnionego polimerowym siarczanem glinu [14]. Duża porowatość, wysoka absorpcja wody i liczne mikropełnięcia w recyklowanych kruszywach są głównymi przyczynami słabszych właściwości mechanicznych, wyższego wskaźnika skurczów z powodu suszenia, a nawet podatności na przedwczesne pękanie w betonie RAC.

Opracowana została metoda polegająca na zastosowaniu polimerowego siarczanu glinu (PAS) do wzmocnienia właściwości mechanicznych recyklowanego kruszywa. Wyniki

analysis of the strength of structures made of RAC, subjected to complex loading. Also worth noting are studies on models which make it possible to predict the strength of RACs on the basis of their composition [10]. There were also studies on the use of recycled concrete aggregate combined with steel fibres in the production of roller compacted concrete (RCC) [11]. It was found that mixtures of steel fibre reinforced (SFR) roller compacted concrete with a low cement content (less than 300 kg/m^3) are prone to fibre accumulation. For this reason SFR-RCC mixtures with a cement content higher than 300 kg/m^3 are recommended. It was also found that concrete mixtures containing recycled masonry aggregate would attain about 40% lower compressive strength in comparison with mixtures made of natural aggregate (NA), whereas mixtures produced from high quality recycled concrete aggregate were characterized by strength very similar to that of specimens made entirely of NA. This applies to both the RCC mixtures and the SFR-RCC mixtures. Good results were obtained by adding 10% of fumed silica to the mixture. Still other studies showed an improvement in the mechanical properties of recycled aggregate concrete when silicate admixtures and dispersed additions with epoxy resin were used [12]. In Korea and Japan the subject of investigations were dependences between the compressive strength and the modulus of elasticity of recycled aggregate concrete [13]. A correlation for the strength range of 18-65 MPa, corresponding to the range of the obtained compressive strengths of RAC, was developed. Also the properties of recycled concrete aggregate reinforced with polymer aluminium sulphate were studied [14]. The high porosity and water absorption of recycled concrete aggregates and the numerous microcracks in them are the main causes of the poorer mechanical properties, higher drying shrinkage and even susceptibility to premature cracking of RAC.

A method consisting in the use of polymeric aluminium sulphate (PAS) to enhance the mechanical properties of recycled concrete aggregate was developed. The results of tests show that because of its chemical properties polymeric aluminium sulphate can effectively increase microhardness and reduce surface tension heterogeneity in concrete. The refinements in the structure of RAC resulting from the use of PAS contribute to the improvement in the mechanical properties, a reduction in the drying shrinkage and a delay of the limited shrinkage cracking of RAC. PAS added to RAC can enter into chemical reactions with cement hydration products, as a result of which expanding ettringite (a rare mineral) is produced, and increase the density of surface tensions, whereby the strength increases and the shrinkage cracking risk diminishes. Simultaneously,

testów pokazują, że polimerowy siarczan glinu ze względu na swoje właściwości chemiczne jest w stanie skutecznie zwiększać mikrotwardość i redukować niejednorodność napięć powierzchniowych w betonie. Te udoskonalenia w mikrostrukturze RAC przy zastosowaniu PAS przyczyniają się do ulepszenia właściwości mechanicznych, zmniejszenia skurczów spowodowanych wysuszeniem i opóźnienia okresu ograniczonych pęknięć skurczowych RAC. PAS dodany do RAC może wchodzić w reakcje chemiczne z produktami uwodnienia (hydratacji) cementu, wytwarzając rozszerzający się ettringit (rzadki minerał) i zwiększać zagęszczenie napięć powierzchniowych, co sprzyja poprawieniu wytrzymałości i zredukowaniu ryzyka pęknięć skurczowych. Jednocześnie konsumpcja wodorotlenku wapnia nie tylko przyspiesza hydratację cementu, zwiększając początkową (wczesną) wytrzymałość RAC, ale również wpływa na poprawienie trwałości RAC. Stwierdzono, że PAS może znacząco poprawić właściwości mechaniczne RAC, a przez to sprzyjać dalszemu użyciu RAC. Inne prowadzone na świecie badania wskazują również na możliwość wykorzystania kruszywa betonowego do wytworzenia mieszanek mineralno-asfaltowych na zimno [15] oraz betonów termoizolacyjnych [16], prefabrykowanych płyt ściennych [17] i betonu konstrukcyjnego [4], wykorzystywanego w budownictwie kubaturowym.

W warunkach polskich jednym z głównych kryteriów przydatności jest mrozoodporność kruszywa betonowego pochodzącego z recyklingu. Problem projektowania i sprawdzania mrozoodporności betonu przeznaczonego na konstrukcje drogowe omówiono szczegółowo w [18]. W Czechach prowadzone były w tym temacie analizy zastosowania kruszywa betonowego pochodzącego z recyklingu do betonów konstrukcyjnych ze zbrojeniem rozproszonym. W badanym składzie betonu znajdowało się jedynie kruszywo z recyklingu bez materiału doziarniającego [19]. Betony zostały poddane ocenie odporności na zamrażanie oraz odporności na niekorzystne działanie soli. W przypadku betonowych nawierzchni drogowych takie czynniki mogą decydować o trwałości konstrukcji drogowej. W badaniach wykazano, że kruszywo betonowe pochodzące z recyklingu nie spełnia wymagań dotyczących nasiąkliwości oraz mrozoodporności. Betony wytworzone na jego bazie o wytrzymałości około 23,5 MPa mogą zostać wykorzystane do konstrukcji elementów nie narażonych na jednoczesne działanie ujemnych temperatur i wilgoci.

W artykule autorzy przeanalizowali możliwości wykorzystania recyklowanego kruszywa betonowego do wytworzenia nowych mieszanek związanych cementem na warstwy podbudowy nawierzchni drogowych. Przydatność kruszywa betonowego do wykorzystania w warstwach niezwiązanych oraz warstwach podłoża ulepszanego związanego cementem

the consumption of calcium hydroxide not only accelerates the hydration of cement, increasing the initial (early) strength of RAC, but also contributes to an improvement in the durability of RAC. It was found that PAS can significantly improve the mechanical properties of RAC and so extend its service life. Other research conducted in the world also indicates that recycled concrete aggregate can be used to produce asphalt cold mixes [15], thermally insulating concrete [16], tilt-up concrete walls [17] and structural concrete used in residential and commercial constructions [4].

In the conditions prevailing in Poland one of the main criteria of suitability is the frost resistance of recycled concrete aggregate. The problem of design and testing of the frost resistance of concrete for road structures was addressed in detail in [18]. Studies of the use of recycled concrete aggregate in construction concretes with fibre reinforcement are conducted in the Czech Republic. The tested concrete composition included only recycled concrete aggregate without any virgin material [19]. The resistance of the concretes to freezing and thawing and to de-icing salts was evaluated. In the case of concrete road pavements, such factor can be decisive for the durability of the pavement structure. The tests showed that the recycled concrete aggregate did not meet the water absorption and freeze-thaw resistance requirements. Concretes based on such RCA can be used for elements not exposed to the simultaneous action of negative temperatures and moisture.

This paper examines the possibilities of using recycled concrete aggregate to produce new cement bound mixtures for roadbase courses. The suitability of recycled concrete aggregate for unbound roadbase courses and layers of treated subgrade stabilised with cement was analysed by the authors in [20]. The strength and frost resistance of twelve mixtures for roadbase courses were tested. The test results indicate that recycled concrete aggregate can be used to produce new cement bound mixtures. However, it would be necessary to update the national guidelines and specifications concerning the use of RCA in new cement bound mixtures. As of today, several technical documents apply to roadbase courses. In Poland the guidelines WT-5 [21], which set the strength requirements at C3/4-C8/10 (for bases) and C1,5/2-C5/6 (for subbases) depending on the traffic class (TC), should be regarded as the primary ones. At the same time the standard PN-S-96013:1997 [22], according to which the required compressive strength of the base after 28 days should be in the range 6-9 MPa, is still in force. Also the standard PN-S-96014:1997 [23], which sets the minimum

przeanalizowana została przez autorów w [20]. Przeprowadzono badania wytrzymałości i mrozoodporności dwunastu mieszanek przeznaczonych do warstw podbudowy. Wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania kruszywa betonowego do wytworzenia nowych mieszanek związanych cementem. Konieczne przy tym wydaje się usankcjonowanie krajowych wymagań w postaci aktualizacji wytycznych i specyfikacji dotyczących sposobów wykorzystania kruszywa betonowego w mieszankach związanych cementem. Do warstw podbudowy nawierzchni drogowej odnosi się na dzień dzisiejszy kilka dokumentów technicznych. W kraju za podstawowe należy uznać wytyczne WT-5 [21], w których wymagania wytrzymałości ustalono na C3/4-C8/10 (dla podbudów zasadniczych) i C1,5/2-C5/6 (dla podbudów pomocniczych), w zależności od kategorii ruchu KR. Jednocześnie wciąż obowiązująca i często przywoływana jest norma PN-S-96013:1997 [22], w której wymagana wytrzymałość na ściskanie podbudowy po 28 dniach zawiera się w przedziale od 6 MPa do 9 MPa. Funkcjonuje również w dalszym ciągu norma PN-S-96014:1997 [23], w której minimalną wytrzymałość podbudowy określono na B15. Najnowszym dokumentem odniesienia jest norma europejska PN-EN 14227-1 [24] w wersji angielskiej. Zastąpiła ona wersję polską [25] z 2007 r. wprowadzając szerszy zakres wytrzymałości mieszanek związanych cementem od C 0,4/0,5 do C 36/48, w porównaniu z zakresem C 1,5/2 - C 20/25 w wersji polskiej. Do wersji polskiej (wycofanej) z 2007 r. odwołują się z kolei obowiązujące krajowe wytyczne (WT-5) oraz Katalogi Typowych Nawierzchni [26], [27]. Równoległe powszechnie stosowane są Ogólne Specyfikacje Techniczne: „Podbudowa z chudego betonu” [28] oraz „Podbudowa z betonu cementowego” [29].

2. BADANIA KRUSZYWA BETONOWEGO Z RECYKLINGU

Kruszywo betonowe do badań pozyskano w trakcie rozbiórki istniejących nawierzchni betonowych dróg na terenie Wrocławia. Przybliżony wiek rozbieranych nawierzchni określono na 30 - 40 lat. Na próbkach odwierconych z rozbieranych nawierzchni określono wytrzymałość, nasiąkliwość oraz gęstość betonu przeznaczonego do recyklingu. Wyniki badań będące średnią z 9 próbek zestawiono w Tabl. 1. Widok rdzeni betonowych z odwiertów przedstawia Rys. 1.

strength of the base at B15, is still in use. The latest reference document is the European standard PN-EN 14227-1 [24] in its English version. It has replaced the Polish version of 2007 [25], introducing a wider strength range for cement bound mixtures, i.e. from C 0.4/0.5 to C 36/48, in comparison with C 1.5/2-C 20/25 in the Polish version. The current national guidelines (WT-5) and the Catalogues of Typical Road Pavements [26], [27] refer to the Polish (withdrawn) version of 2007. At the same time, the General Technical Specifications: “Roadbase made of lean concrete” [28] and “Roadbase made of cement concrete” [29] are commonly used.

2. TESTING RECYCLED CONCRETE AGGREGATES

The recycled concrete aggregate for the tests was obtained from the dismantling of concrete road pavements in the Wrocław city area. The dismantled pavements were approximately 30-40 years old. The strength, water absorption and density of the concrete to be recycled were determined on concrete cores bored out from the dismantled slabs. The test results, as the mean for 9 samples, are presented in Table 1. The extracted concrete cores are shown in Fig. 1.



Fig. 1. Concrete cores bored out from slabs
Rys. 1. Widok rdzeni betonowych z odwiertów płyt

Table 1. Results of the concrete cores tests
Tablica 1. Zestawienie wyników badań odwiertów

Tested characteristic / Badana cecha	Standard / Norma	Unit / Jednostka	Test result / Wynik badania
Absorbability / Nasiąkliwość	PN-88/B-06250	[%]	6.3
Bulk density (hydrostatic metod) / Gęstość objętościowa (metoda hydrostatyczna)	PN-EN 12390-7:2011	[g/cm ³]	2.211
Mean compressive strength / Średnia wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 12504-1:2011	[MPa]	53.5
Mean split tensile strength / Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	PN-EN 12390-6:2011	[MPa]	3.73

Oceny wytrzymałości odwiertów dokonano na podstawie PN-EN 13791 [30] oraz wymagań funkcjonalnych zawartych w PN-EN 13877-2 [31] dla rdzeni 10×10 cm, pochodzących z konstrukcji. Wyniki przedstawiono w Tabl. 2 i 3.

The strength of the concrete cores was evaluated according to PN-EN 13791 [30] and the PN-EN 13877-2 functional requirements for 10×10 cm cores extracted from structures [31]. The results are presented in Tables 2 and 3.

Table 2. Evaluation of compressive strength of cores derived from pavement structures
Tablica 2. Ocena wytrzymałości na ściskanie elementów pochodzących z konstrukcji

Mean compressive strength of concrete f_{cm} [MPa] acc. to PN-EN 12504-1 Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} [MPa] wg PN-EN 12504-1	Characteristic compressive strength of concrete in a structure f_{ck} [MPa] acc. to PN-EN 13791 Charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji f_{ck} [MPa] wg PN-EN 13791	Compressive strength class of concrete f_{ck} [MPa] acc. to PN-EN 13791 Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie f_{ck} [MPa] wg PN-EN 13791	Compressive strength class of concrete acc. to PN-EN 13877-2 Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie wg PN-EN 13877-2
53.5	47	C 45/55	CC45

Table 3. Evaluation of split tensile strength of cores derived from pavement structures
Tablica 3. Ocena wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu elementów pochodzących z konstrukcji

Mean split tensile strength of concrete f_{tm} [MPa] acc. to PN-EN 12390-6 Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{tm} [MPa] wg PN-EN 12390-6	Characteristic split tensile strength of concrete f_{tk} [MPa] acc. to PN-EN 206-1 Charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{tk} [MPa] wg PN-EN 206-1	Class of split tensile strength of concrete acc. to PN-EN 13877-2 Klasa wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 13877-2
3.73	3.23	SC2.7

Wstępnie rozkruszoną (przy użyciu młota wyburzeniowego) nawierzchnię betonową rozdrobnilo w kruszarce zamocowanej do ramienia koparki, uzyskując frakcje zbliżone do typowej mieszanki 0/31,5 (Rys. 2).

The pre-crushed (by means of a demolition hammer) concrete pavement was broken down (in a crusher mounted on the arm of an excavator) to fractions close to typical mixture 0/31.5 (Fig. 2).



Fig. 2. Recycled concrete aggregate obtained by crushing slabs
Rys. 2. Kruszywo betonowe uzyskane z przekruszenia płyt

Określono właściwości fizyko-mechaniczne pozyskanego kruszywa betonowego w podstawowych badaniach laboratoryjnych. Przeanalizowano możliwości wbudowania uzyskanej po kruszeniu mieszanki do warstw podbudowy związanych cementem. Przydatność do warstw podłoża ulepszonego związanego cementem omówiono szerzej w [20]. Wyniki badań, w porównaniu z mieszanką granitową 0/31,5, odniesiono do wymagań krajowych WT-5 [21] i zestawiono w Tabl. 4.

The physical and mechanical properties of the crushed concrete aggregate were determined through basic laboratory tests. The possibilities of incorporating the crushed concrete aggregate mix into cement bound roadbase courses were examined. The suitability of recycled concrete aggregate for the cement bound layers of a treated subgrade are discussed in more detail in [20]. The test results, in comparison with granite mixture 0/31.5, are related to national requirements WT-5 [21] and presented in Table 4.

Table 4. Comparison of results of tests on recycled concrete aggregate
 Tablica 4. Zestawienie wyników badań kruszywa betonowego z recyklingu

Tested characteristic Badana cecha	Standard Norma	Unit Jednostka	Concrete aggregate Kruszywo betonowe	Granit aggregate Kruszywo granitowe	Requirements acc. to WT5 Wymagania wg WT5	
					subbase and the improved subgrade podbudowa pomocnicza i podłoże ulepszone	roadbase podbudowa zasadnicza
Absorbability Nasiąkliwość	PN-EN 1097-6:2013 (pycnometric method) (met. piknometryczna)	[%]				
0.063/4			7.53	0.51	WA ₂₄₂	WA ₂₄₂
4/8			7.23	1.16		
8/16			8.11	0.84		
16/31.5			7.53	0.64		
Frost resistance Mrozoodporność	PN-EN 1367-1:2007	[%]				
4/8	*)		7.01	0.31	F10	F4
8/16			12.83	0.18	(recycled aggregates)	(all aggregates)
16/31.5			24.73	0.13	(kruszywa z recyklingu)	(wszystkie kruszywa)

*) testing frost resistance is required only for aggregates of absorbability higher than 2%
 badanie mrozoodporności jest wymagane tylko dla kruszyw o nasiąkliwości powyżej 2%.

Zarówno mrozoodporność, jak i nasiąkliwość kruszywa betonowego jest znacznie niższa niż kruszywa granitowego i nie spełnia wymagań stawianym kruszywom do podbudów zasadniczych wg WT-5. Doświadczenia autorów, jak i studia literaturowe wskazują, że niska mrozoodporność oraz duża nasiąkliwość kruszywa z recyklingu są głównymi ograniczeniami w stosowaniu tego typu materiałów w warunkach polskich. Nie są również spełnione wymagania stawiane kruszywom do podbudów pomocniczych (F10). Według wytycznych WT-5 dopuszczalne jest jednak stosowanie w mieszance związanej na podbudowę pomocniczą do 50% kruszywa z recyklingu, którego mrozoodporność nie przekracza 25% i przy spełnionych wymaganiach (F25). Warto zauważyć, że wysoka wytrzymałość na ściskanie próbek odwierconych z nawierzchni przed kruszeniem nie gwarantuje wystarczającej nasiąkliwości i mrozoodporności kruszywa betonowego. Autorzy w [20] wskazali na graniczną dolną klasę wytrzymałości na ściskanie odwiertów z nawierzchni betonowych przeznaczonych do recyklingu – CC30, przy jednoczesnej wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu SC2,0. Jednak w warunkach polskich konieczne jest niezależne zweryfikowanie mrozoodporności i nasiąkliwości pozyskanego kruszywa betonowego, w zależności od przeznaczenia do konkretnej warstwy (podłoże ulepszone, podbudowa pomocnicza, podbudowa zasadnicza). Autorzy uzyskali akceptowalną, dla

Both the frost resistance and water absorption of the RCA are considerably lower than those of the granite aggregate and do not meet the requirements for roadbases according to WT-5. The experimental studies and literature research carried out by the authors indicate that the low frost resistance and high water absorption of recycled concrete aggregate are the main limitations for the use of such materials in Poland. Neither does RCA meet the requirements (F10) set for aggregates for subbases. However, according to the WT-5 guidelines, up to 50% of RCA with frost resistance below 25% can be used in a cement bound mixture for a subbase when the F25 requirements are met. It should be noted that the high compressive strength of core samples extracted from road pavements before crushing does not guarantee that the recycled concrete aggregate will be characterized by adequate water absorption and frost resistance. In [20] the authors indicated CC30, at splitting tensile strength SC2.0, as the lower limit compressive strength class of cores drilled out of concrete road pavements to be recycled. However in the conditions prevailing in Poland it is necessary to separately verify the frost resistance and water absorption of the reclaimed concrete aggregate depending on the specific layer (the treated subgrade, the subbase or the base) for which it is to be used. The authors achieved the frost resistance of 5.6%

podbudowy zasadniczej zgodnie z WT-5, mrozoodporność na poziomie 5,6%, dla mieszanki kruszywa granitowego i kruszywa betonowego w proporcjach 1:1.

3. BADANIA MIESZANEK ZWIĄZANYCH CEMENTEM

Zweryfikowano możliwości wykorzystania kruszywa betonowego do mieszanek związanych cementem przeznaczonych na warstwy podbudowy. Wyniki badań odniesiono do wymagań WT 5 [21]. Nie analizowano trwałości zmęczeniowej mieszanek wg kryteriów przedstawionych w [32]. Zaprojektowano 12 mieszanek o różnej zawartości cementu (od 6% do 10%) i różnych frakcjach kruszywa betonowego z recyklingu. Porównano mieszanki z naturalnego kruszywa granitowego z mieszankami, w których następne frakcje grube lub drobne zastąpiono kruszywem betonowym. Skład ziarnowy mieszanki granitowej oraz kruszywa z recyklingu, użytych w mieszankach związanych cementem przedstawiono w Tabl. 5 oraz na Rys. 3.

for a 1:1 mixture of granite aggregate and recycled concrete aggregate, which according to WT-5 is acceptable if the mixture is intended for roadbase courses.

3. TESTING CEMENT BOUND MIXTURES

The possibilities of using recycled concrete aggregate in cement bound mixtures for roadbase courses were verified. The test results were related to the WT 5 requirements [21]. Fatigue resistance of the mixtures, according to criteria shown in [32], was not analyzed. Twelve mixtures differing in their cement content (ranging from 6% to 10%) and in their RCA fractions were designed. The mixtures made of natural granite concrete were compared with the mixtures in which the other coarse- or fine-grain fractions had been replaced with recycled concrete aggregate. The grading of the granite mixture and that of the recycled concrete aggregate, used in the cement bound mixtures, is presented in Table 5 and Fig. 3.

Table 5. Sieve analysis acc. to PN-EN 933-1:2012
Tablica 5. Badanie składu ziarnowego kruszyw wg PN-EN 933-1:2012

The mesh size of the sieve Rozmiar oczka sita #	Concrete aggregate Kruszywo betonowe		Concrete aggregate after correction Kruszywo betonowe po korekcje		Granite Granit		Limit curves acc. to WT5 for mixture 0/31.5 Krzywe graniczne wg WT5 dla MM 0/31,5	
	remaining on the sieve pozostaje na sicie	grading curve krzywa uziarnienia	remaining on the sieve pozostaje na sicie	grading curve krzywa uziarnienia	remaining on the sieve pozostaje na sicie	grading curve krzywa uziarnienia		
[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
45	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	100	100
31.5	0.0	100.0	0.0	100.0	0.6	99.4	85	100
22.4	2.2	97.8	3.1	96.9	8.6	90.7	70	100
16	9.4	88.3	13.3	83.6	10.2	80.5	57	88
11.2	7.8	80.5	11.0	72.6	11.2	69.3	46	80
8	7.8	72.7	11.1	61.5	9.3	60.0	40	70
5.6	7.3	65.4	10.3	51.2	8.0	52.0	30	65
4	7.2	58.1	10.2	41.0	7.9	44.1	26	61
2	9.9	48.2	7.0	34.0	10.6	33.5	18	50
1	11.9	36.3	8.4	25.6	9.7	23.8	12	40
0.5	12.1	24.2	8.5	17.1	7.6	16.2	8	30
0.25	9.9	14.3	7.0	10.1	5.7	10.5	6	24
0.125	5.0	9.3	3.5	6.6	3.0	7.5	4	17
0.063	2,8	6.5	2.0	4.6	3.5	3.9	3	11
0	6.5	0.0	4.6	0.0	3.9	0.0		
Total / Suma	100.0		100.0		100.0			

Uziarnienie kruszywa betonowego skorygowano tak, by było jak najbliższe uziarnienia mieszanki granitowej i spełniało wymagania uziarnienia stawiane kruszywom do warstw związanych cementem na podbudowy wg WT-5. Celem badania było ustalenie wpływu rodzaju kruszywa (naturalne/recyklowane) na właściwości betonu. Dlatego wyeliminować należało wpływ różnicy w uziarnieniu, poprzez usunięcie z kruszywa betonowego 50% ziaren z frakcji 0/4. W dalszych badaniach posługiwano się wyłącznie kruszywem betonowym o skorygowanym uziarnieniu.

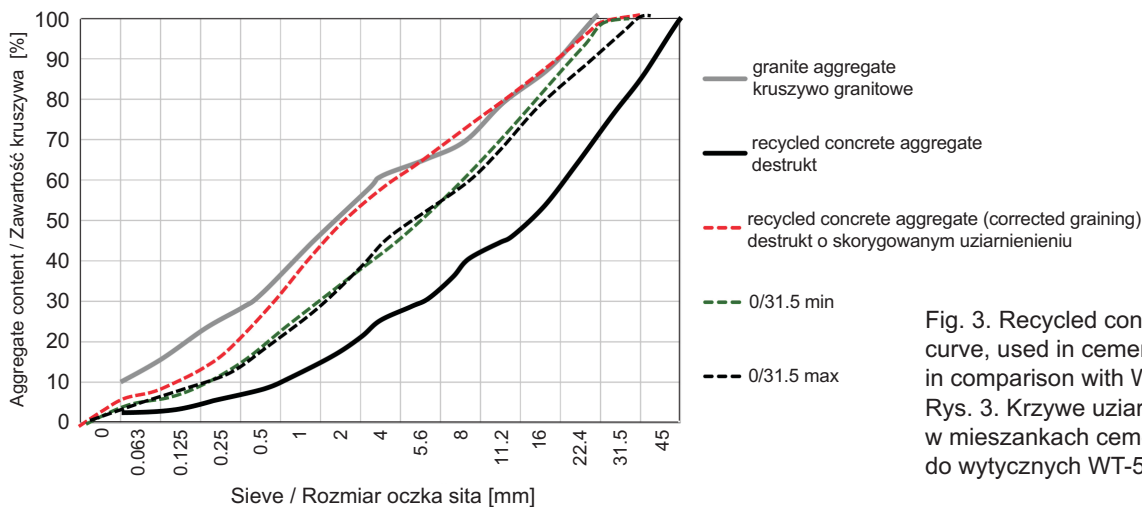


Fig. 3. Recycled concrete aggregate grading curve, used in cement bound mixtures, in comparison with WT-5 requirements
Rys. 3. Krzywe uziarnienia kruszyw użytych w mieszankach cementowych w odniesieniu do wytycznych WT-5

Umowną granicę między kruszywem grubym, a drobnym ustalono na 5,6 mm, jako że przez sito o tym wymiarze przechodzi około 50% ziaren kruszywa granitowego (52%) i betonowego (51,2%). Oznaczenia mieszanek kruszywa (granitowe/betonowe) przedstawiono w Tabl. 6.

The arbitrary boundary between coarse aggregate and fine aggregate was set at 5.6 mm since about 50% of coarse granite aggregate particles (52%) and recycled concrete aggregate (51.2%) pass through the sieve of this size. The sieve analysis of the (granite/recycled concrete) aggregate mixtures is presented in Table 6.

Table 6. Aggregate mixes used in the cement bound bases

Tablica 6. Oznaczenie mieszanek kruszywowych użytych w mieszankach związanych cementem

Mixture Mieszanka	Fraction 0/5.6 mm Fracja 0/5,6 mm	Fraction 5.6/31.5 mm Fracja 5,6/31,5 mm
Granite aggregate / Kruszywo granitowe	Granite / Granit	Granite / Granit
Granite skeleton/concrete gritting material Szkielet granitowy/drobne kruszywo bet.	Granite / Granit	Concrete aggregate / Kruszywo betonowe
Concrete aggregate skeleton/granite gritting material Szkielet kruszywo bet./drobne kruszywo granit.	Concrete aggregate / Kruszywo betonowe	Granite / Granit
Concrete aggregate / Kruszywo betonowe	Concrete aggregate / Kruszywo betonowe	Concrete aggregate / Kruszywo betonowe

Dla każdego z czterech typów mieszanek, zgodnie z Tabl. 6, wykonano zaroby próbne o zawartości cementu 6%, 8% i 10%. Zastosowano cement CEM II 32,5 R. W przypadku każdej z 12 mieszanek (3 × 4) przeprowadzono badania zagęszczenia i ustalono wilgotność optymalną zgodnie z Tabl. 7.

Trial batches with a cement content of 6%, 8% and 10% were made for each of the four types of mixtures presented in Table 6. CEM II 32.5 R cement was used for this purpose. The degree-of-compatibility test was carried out for each of the twelve (3 × 4) mixtures, and the optimum moisture content as shown in Table 7 was determined.

Table 7. Compactability of aggregate mixes acc. to PN-EN 13286-50
 Tablica 7. Badanie zagęszczalności mieszanek wg PN-EN 13286-50

Mixture Mieszanka	Optimum moisture [%] Wilgotność optymalna [%]	Maximum volume density of the aggregate skeleton [g/cm ³] Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu [g/cm ³]
Granit aggregate / Kruszywo granitowe	8	2.175
Granit skeleton/concrete gritting material Szkielet granit./drobne krusz. bet.	11	2.025
Concrete aggregate skeleton/granit gritting material Szkielet krusz. bet./drobne krusz. granit.	10	2.039
Concrete aggregate / Kruszywo betonowe	13	1.900

W przypadku każdej z mieszanek wykonano próbki do badań wytrzymałościowych i badań mrozoodporności. Celem badania było sprawdzenie wpływu rodzaju kruszywa (naturalne/recyklowane) na wytrzymałość i mrozoodporność mieszanek związanych przeznaczonych na warstwy podbudowy, w zależności od zawartości cementu. Zbadano 108 próbek, przy różnej zawartości cementu (od 6% do 10%) w 12 kombinacjach. Dla każdej kombinacji przeanalizowano wstępne 7-dniowe i 28-dniowe wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz mrozoodporność w zależności od zawartości cementu i rodzaju użytego kruszywa. Średnie wytrzymałości mieszanek, wraz z odchyleniami standardowymi wyników przedstawiono na Rys. 4 i 5. Dane te, wg [24], odpowiadają wytrzymałościom charakterystycznym i są podstawą przyjęcia odpowiednich klas wytrzymałości mieszanki. Wytrzymałość charakterystyczną mieszanki związanej cementem oraz jej zaklasyfikowanie do odpowiedniej klasy, inaczej niż w przypadku betonów wg PN-EN 206 [33], którą uzyskuje się na podstawie średniej z badania trzech próbek. Jeżeli pojedynczy wynik badania różni się ponad 20% od średniej z oznaczenia pozostałych dwóch próbek, wartość ta powinna zostać odrzucona, a za miarodajną należy przyjąć wartość średnią z dwóch pozostałych próbek. Zdaniem autorów należałoby w przyszłości zmodyfikować procedurę określania wytrzymałości charakterystycznych dla mieszanek związanych z cementem. Wartość średnia, jak to proponują normy PN-EN 14227-1 [24], [25] oraz WT-5 [21], przedstawia wytrzymałość charakterystyczną w sposób niewłaściwy. Dla klas mieszanek pokrywających się z klasami betonu (tj. C8/10 do C20/25 [25] i C36/48 [24]) należałoby ujednoczyć sposób oznaczania wytrzymałości charakterystycznej, korzystając z doświadczeń normy betonowej PN-EN 206 [33]. W celu przeprowadzenia takiej zmiany konieczne jest zebranie dużych zbiorów statystycznych badań wytrzymałości takich mieszanek.

W oczywisty sposób wytrzymałość na ściskanie zależy od zawartości cementu w mieszance. Jednak widoczne są także

In the case of each of the mixtures, specimens for strength tests and frost resistance tests were made. The aim of the tests was to verify the effect of the type of aggregate (natural/recycled) on the strength and frost resistance of cement bound mixtures intended for roadbase courses depending on the cement content. 108 specimens, differing in their cement content (from 6% to 10%), in 12 combinations were tested. For each of the combinations the initial 7-day and 28-day compressive strength resistance and frost resistance results were analysed depending on the cement content and the type of aggregate. The mean strengths of the mixtures together with the standard deviations are presented in Figs 4 and 5. According to [24], these data correspond to the characteristic strengths and are the basis for assigning appropriate strength classes to the mixtures. Differently than in the case of concretes according PN-EN 206 [33], the characteristic strength of a cement bound mixture and the classification of the latter into a proper class are based on the mean for three specimens. If a single test result differs by more than 20% from the mean value for the other two specimens, this result should be rejected and the mean value for the other two specimens should be adopted as reliable. In the authors' opinion, the procedure for determining the characteristic strengths of cement bound mixtures should be modified in the future. The mean value proposed by PN-EN 14227-1 [24], [25] and WT-5 [21] incorrectly represents the characteristic strength. For the mixture classes coinciding with the concrete strength classes (i.e. C8/10 to C20/25 [25] and C36/48 [24]) the method of determining the characteristic strength should be standardized on the basis of the experience relating to concrete standard PN-EN 206 [33]. In order to effect such a change it is necessary to collect large statistical sets of the results of strength tests carried out on such mixtures.

The compressive strength of a mixture evidently depends on the type of aggregate used. The mixture containing

istotne różnice zależne od rodzaju użytego kruszywa. Mieszanka, w której użyto wyłącznie kruszywa granitowego ma największą wytrzymałość na ściskanie (od 7 MPa do ponad 20 MPa po 28 dniach, zależnie od zawartości cementu). Nieco mniejsze wytrzymałości uzyskano w przypadku mieszanki, w której drobne frakcje zastąpiono kruszywem betonowym, pozostawiając granitowy szkielet. Najmniejsze i bardzo zbliżone wytrzymałości (od około 4,5 MPa – C3/4 do 16 MPa – C12/16) uzyskano w przypadku mieszanki, w której użyto wyłącznie kruszywa betonowego oraz mieszanki, w której kruszywo betonowe stanowiło frakcje grube (szkielet > 5,6 mm).

solely granite aggregate has the highest compressive strength (from 7 MPa to over 20 MPa after 28 days, depending on the cement content). Slightly lower strengths were obtained in the case of the mixtures in which the fine-grain fraction had been replaced with recycled concrete aggregate, leaving the granite skeleton intact. The lowest and very similar strengths (from about 4.5 MPa – C3/4 to 16 MPa – C12/16) were obtained in the case of the mixture in which exclusively recycled concrete aggregate had been used and the mixture in which RCA constituted the coarse-grain fractions (skeleton > 5.6 mm).

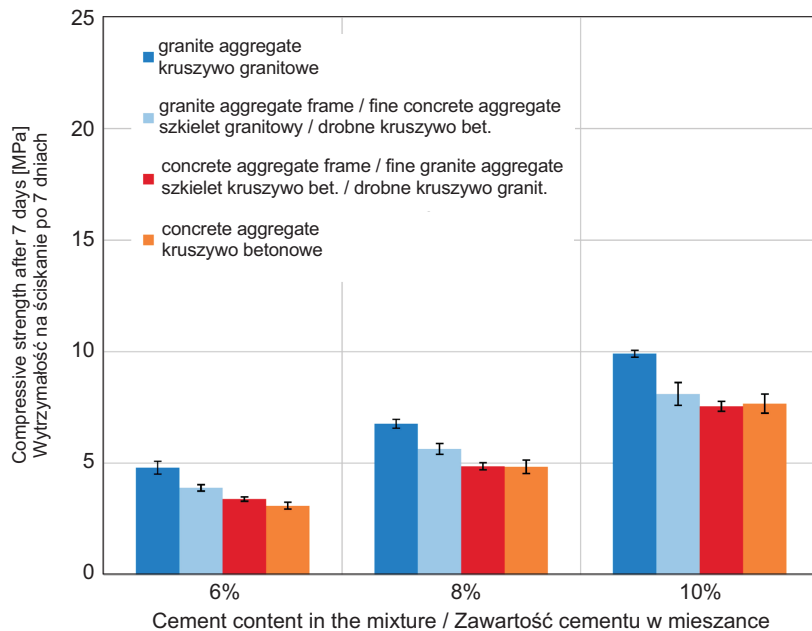


Fig. 4. Compressive strength after 7 days depending on the content of cement C
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie mieszanek po 7 dniach, w zależności od procentowej zawartości cementu C

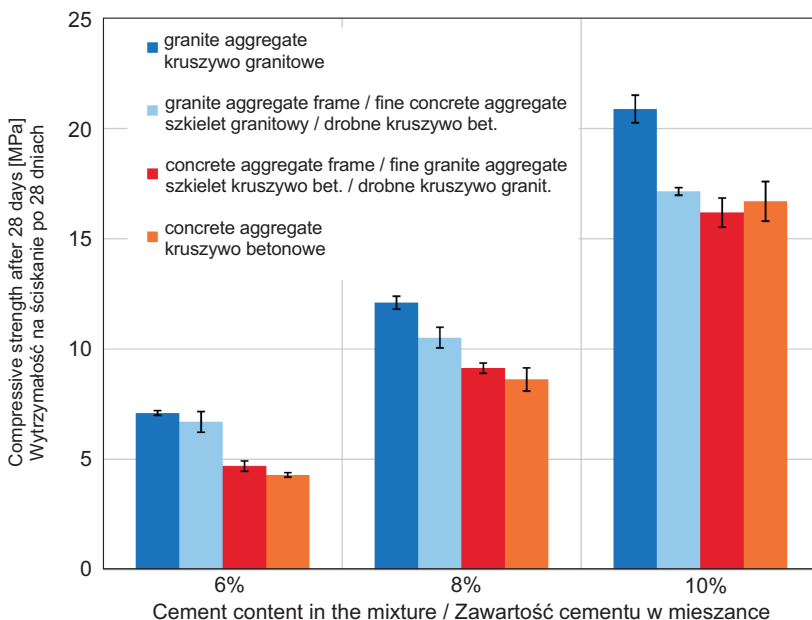


Fig. 5. Compressive strength after 28 days depending on the content of cement C
Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie mieszanek po 28 dniach, w zależności od procentowej zawartości cementu C

Pomimo, że wytrzymałość na ściskanie mieszanki powstałej na podstawie kruszywa granitowego jest istotnie wyższa w porównaniu z mieszankami z kruszywa betonowego, to jednak w obu przypadkach, w zależności od zawartości cementu, spełnione są wymagania wytrzymałości stawiane mieszankom cementowym w warstwach podbudów pomocniczych i zasadniczych wg WT-5. W mieszance wykonanej w całości na podstawie kruszywa betonowego, przy zawartości cementu na poziomie 10%, uzyskuje się wytrzymałości około 16 MPa, w porównaniu z wymaganą klasą C8/10 dla podbudów zasadniczych KR5-7. Jednocześnie przy tej samej zawartości cementu w mieszance granitowej uzyskiwana jest wytrzymałość większa niż zalecana w wytycznych (> 20 MPa) dla podbudów zasadniczych KR5-7. Wymagania dotyczące wytrzymałości na ściskanie mieszanek stabilizowanych cementem wg WT-5 zestawiono w Tabl. 8.

Even though the compressive strength of the mixture based on granite aggregate is significantly higher than that of the mixtures made of recycled concrete aggregate, in both cases the strength requirements set by WT-5 for cement-aggregate mixtures to be used in base and subbase courses are satisfied. In the case of the mixture entirely based on recycled concrete aggregate, at the cement content of 10%, strengths of about 16 MPa are obtained, whereas the required class for road bases KR5-7 is C8/10. At the same time, for the same cement content in the granite mixture the obtained strength is higher (> 20 MPa) than the one recommended in the guidelines for roadbases KR5-7. The WT-5 requirements concerning the compressive strength of cement-stabilised mixtures are presented in Table 8.

Table 8. Compressive strength requirements for cement bound mixtures acc. to WT-5

Tablica 8. Wymagania dotyczące klasy wytrzymałości na ściskanie mieszanek stabilizowanych cementem w zależności od przeznaczenia warstwy wg WT-5

Type of layer in a pavement structure Rodzaj warstwy w konstrukcji nawierzchni	Grades of compressive strength / Klasy wytrzymałości na ściskanie		
	KR1 - KR2	KR3 - KR4	KR5 - KR7
Subbase / Podbudowa pomocnicza	C _{1,5/2,0}	C _{3/4}	C _{5/6}
Roadbase / Podbudowa zasadnicza	C _{3/4} (less than 6 MPa (nie więcej niż 6 MPa))	C _{5/6} (less than 10 MPa (nie więcej niż 10 MPa))	C _{8/10} (less than 20 MPa (nie więcej niż 20 MPa))

Różnice wytrzymałości mieszanek cementowych na podstawie kruszywa betonowego w stosunku do mieszanek z kruszywa kamiennego są znaczne i zależne od zawartości cementu w mieszance (Rys. 6). Z przeprowadzonych analiz statystycznych na poziomie $\alpha = 0,05$ wynika, że różnice te są istotne, a wyniki nie należą do wspólnych zbiorów. Natomiast na podstawie przeprowadzonych badań, różnice wytrzymałości mieszanek cementowych wykonanych w całości na bazie kruszywa betonowego w stosunku do mieszanek, w których kruszywo betonowe stanowi szkielet mieszanki (a frakcją drobną jest kruszywo kamienne), są one statystycznie nieistotne na poziomie $\alpha = 0,05$, a wyniki mogą należeć do wspólnych zbiorów.

Większą wytrzymałość związanych mieszanek kamiennych, w stosunku do związanych mieszanek kruszywa betonowego można tłumaczyć ciężarem kruszywa kamiennego w porównaniu do betonowego. Cement w mieszance jest dozowany wagowo w stosunku do masy suchej kruszywa. Kamień jest cięższy od kruszywa betonowego, więc objętościowo cementu jest więcej w mieszankach kamiennych w porównaniu do mieszanek kruszywa betonowego. Dodatkowo kruszywo betonowe jest porowate i ma dużą nasiąkliwość. Aby zapewnić

The differences between the cement bound mixtures based on recycled concrete aggregate and the ones made using natural aggregate are considerable and depend on the cement content in the mixture (Fig. 6). The statistical analyses carried out at $\alpha = 0.05$ show that the differences are significant and the results do not fall into common sets. Whereas the differences between the strength of the mixtures based entirely on recycled concrete aggregate and the mixtures in which RCA constitutes the skeleton (and natural aggregate is the fine-grain fraction) are statistically insignificant at $\alpha = 0.05$ and the results can belong to common sets.

The higher strength of the cement bound natural aggregate mixtures than that of cement bound RCA mixtures can be ascribed to the weight of natural aggregate in comparison with that of recycled concrete aggregate. Cement is batched to the mixture by weight relative to the dry weight of the aggregate. Since natural aggregate is heavier than RCA there is more cement by volume in the natural aggregate mixture than in the RCA mixtures. In addition, recycled concrete aggregate is porous and characterized by high water absorption. Therefore in order to

optymalne warunki zagęszczenia mieszanki do kruszywa betonowego należy więc dodać więcej wody do kruszywa betonowego niż do kamiennego. Wpływa to w niekorzystny sposób na wskaźnik cementowo-wodny, od którego zależy wytrzymałość mieszanki związanej cementem. Jednocześnie zaznaczyć trzeba, że w świetle przeprowadzonych badań, większy wpływ na wytrzymałość mieszanek, niż rodzaj użytego kruszywa, ma procentowa zawartość cementu w mieszance.

ensure optimum mixture compaction conditions, more water should be added to recycled concrete aggregate than to natural aggregate. This has an adverse effect on the cement-water ratio which determines the strength of a cement bound mixture. At the same time one should note that in the light of the tests the percentage of cement in the mixture has a greater effect on the strength of the mixtures than the type of aggregate used.

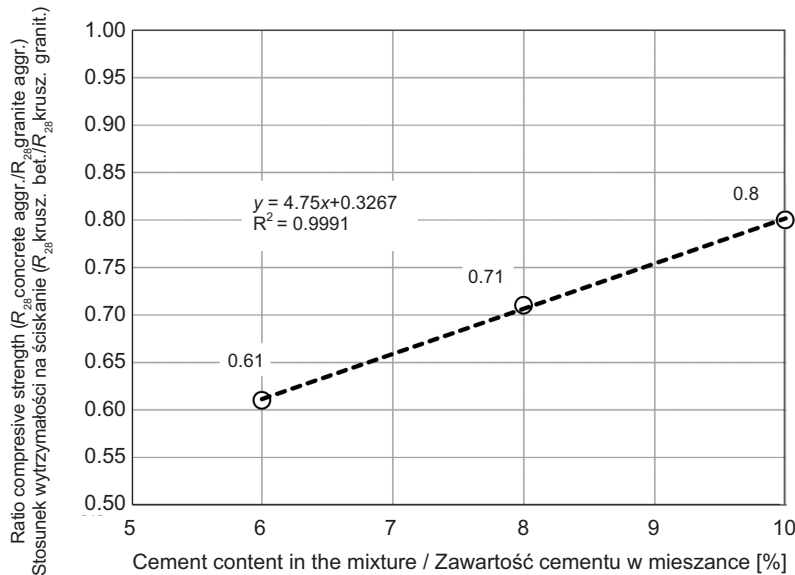


Fig. 6. Comparison of the compressive strength of the recycled concrete aggregate and natural aggregate cement bound mixtures, depending on the content of cement

Rys. 6. Stosunek wytrzymałości mieszanek kruszywa betonowego do wytrzymałości mieszanek kruszywa kamiennego, w zależności od zawartości cementu w mieszance

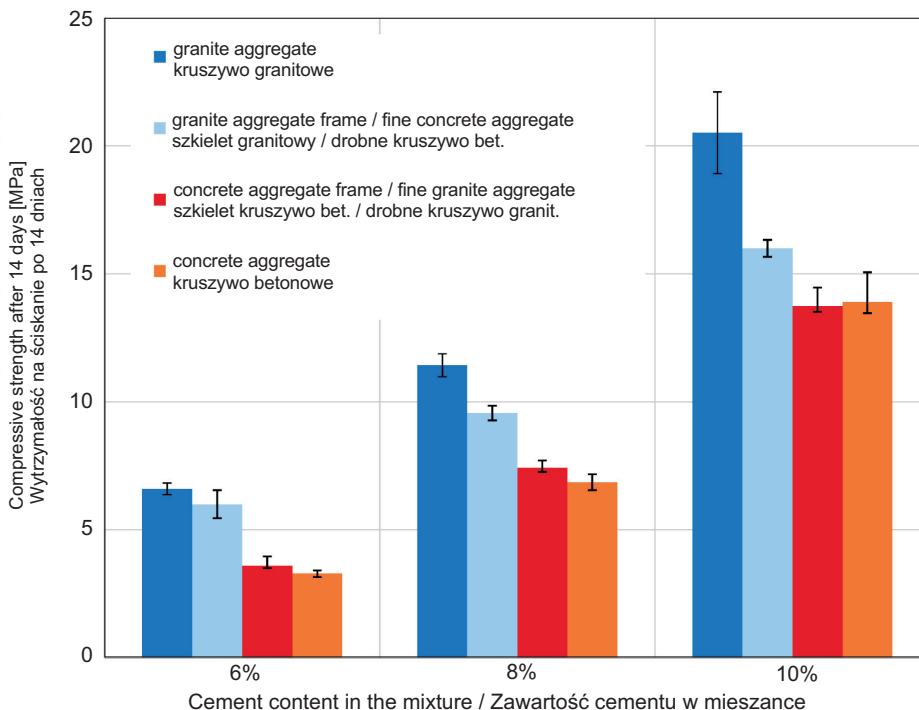


Fig. 7. Compressive strength after 14 freeze-thaw cycles, depending on the content of cement C
Rys.7. Wytrzymałość na ściskanie mieszanek po 14 cyklach zamrażania, w zależności od procentowej zawartości cementu C

Dla każdej z czterech mieszanek przeprowadzono badania na ściskanie po 14 cyklach zamrażania (Rys. 7) i określono mrozoodporność, którą w warunkach polskich i w świetle studiów literaturowych należy uznać za kluczowy parametr decydujący o przydatności mieszanek stabilizowanych cementem z kruszywa recyklowanego. Wyniki badań wskaźnika mrozoodporności mieszanek, w zależności od zawartości cementu, przedstawiono na Rys. 8.

Each of the four mixtures after 14 freeze-thaw cycles was subjected to the compression test (Fig. 7) and their frost resistance (which in the conditions prevailing in Poland should be regarded as the key parameter decisive for the suitability of cement-stabilised mixtures made of recycled concrete aggregate) was determined. The frost resistance index of the tested mixtures versus cement content is presented in Fig. 8.

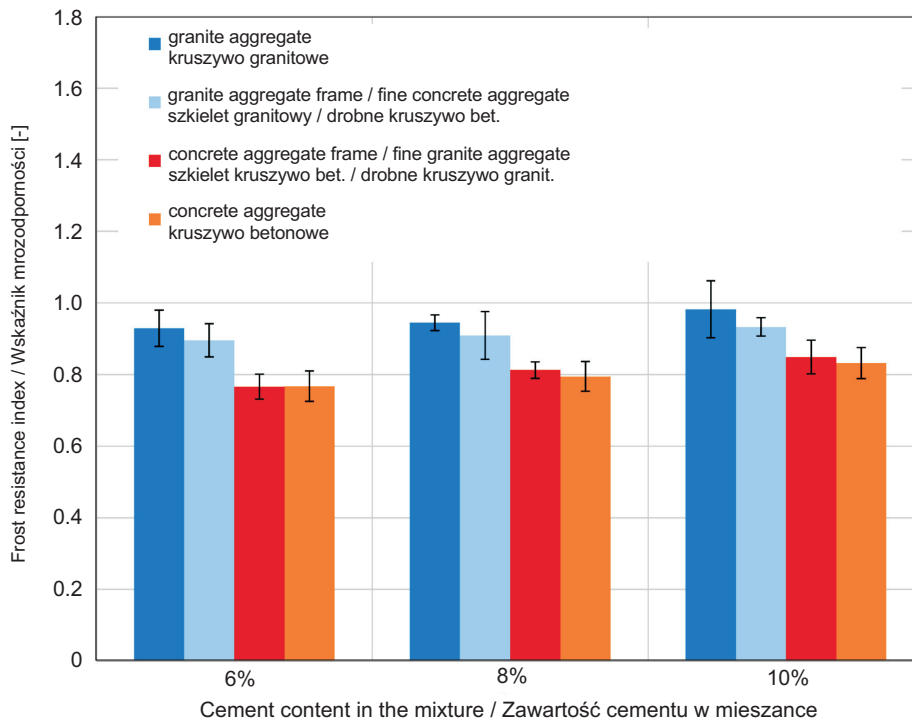


Fig. 8. Frost resistance index depending on the content of cement C
Rys. 8. Wskaźnik mrozoodporności mieszanek, w zależności od procentowej zawartości cementu C

Wyniki badań potwierdzają, że mrozoodporność mieszanek stabilizowanych cementem zależy w głównej mierze od „szkieletu”. Na obniżenie mrozoodporności większy wpływ mają ziarna grube niż ziarna drobne „szkieletu ziarnowego”. Mieszanki wykonane z granitu mają zdecydowanie większą mrozoodporność (> 0,9), niż mieszanki wykonane z kruszywa betonowego (około 0,8, w zależności od zawartości cementu). Jednak trzeba wyraźnie zaznaczyć, że w obu wypadkach spełnione są wymagania stawiane podbudowom pomocniczym i zasadniczym wg WT-5 (Tabl. 9).

The results of the tests confirm that the frost resistance of cement-stabilised mixtures mainly depends on the aggregate skeleton. Frost resistance is reduced more by the coarse particles of the granular skeleton than by its fine particles. The mixtures made of granite are characterized by definitely higher frost resistance (> 0.9) than the mixtures made of recycled concrete aggregate (0.8 depending on the cement content). Nevertheless, it should be emphasized that the requirements set for subbase and base courses by WT-5 are met in both cases (Table 9).

Table 9. Frost resistance requirements for cement bound mixtures acc. to WT-5

Tablica 9. Wymagania dotyczące mrozoodporności mieszanek stabilizowanych cementem w zależności od przeznaczenia warstwy wg WT-5

Type of a layer in pavement structure Rodzaj warstwy w konstrukcji nawierzchni	Frost resistance / Mrozoodporność KR1 - KR7
Subbase / Podbudowa pomocnicza	≥ 0.6
Roadbase / Podbudowa zasadnicza	≥ 0.7

Podobnie jak w przypadku wyników badań wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach, istotne są różnice wskaźnika mrozoodporności (oraz wytrzymałości na ściskanie po 14 cyklach zamrażania) mieszanek cementowych na bazie kruszywa betonowego w stosunku do mieszanek z kruszywa kamiennego. Na poziomie $\alpha = 0,05$ wyniki nie należą do wspólnych zbiorów. Natomiast w przypadku wyników badań wskaźnika mrozoodporności (oraz wytrzymałości na ściskanie po 14 cyklach zamrażania) mieszanek wykonanych w całości na bazie kruszywa betonowego, w stosunku do mieszanek, w których kruszywo betonowe stanowi szkielet mieszanki (a frakcje drobne stanowi kruszywo kamienne), różnice są statystycznie nieistotne na poziomie $\alpha = 0,05$, a wyniki mogą należeć do wspólnych zbiorów.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Autorzy przedstawili możliwości wykorzystania recyklowanego kruszywa betonowego w warstwach podbudowy związanych cementem. Przeprowadzono badania fizyko-mechaniczne kruszywa betonowego, które wykazały większą nasiąkliwość i mniejszą mrozoodporność kruszywa betonowego, w porównaniu z kruszywem granitowym. Niemniej jednak pozytywnie zweryfikowano możliwość wykorzystania takiego kruszywa w mieszankach związanych cementem do warstw podbudowy. Przeanalizowano cztery mieszanki granitowo-betonowe o takim samym uziarnieniu, ale różnej zawartości kruszywa betonowego. Dla każdej mieszanki kruszywowej wykonano zaroby o zawartości cementu od 6% do 10%. Poniżej zestawiono w punktach wnioski z przeprowadzonych badań:

- Wytrzymałość na ściskanie mieszanek związanych cementem z kruszywem granitowym oraz takich, w których kruszywo granitowe stanowiło szkielet (frakcje grube) jest wyższa niż wytrzymałość mieszanek z kruszywem betonowym. Jednak w obu przypadkach spełnione zostały wymagania stawiane podbudowom pomocniczym i zasadniczym wg WT-5.
- W zależności od ilości cementu, mieszanki na bazie kruszywa betonowego osiągały wytrzymałości od 4,5 MPa do 16,0 MPa, przy wymaganych klasach wytrzymałości na podbudowy zasadnicze od C3/4 dla KR1-2, do C8/10 dla KR5-7.
- Mieszanki związane z kruszywem granitowym wykazują większą mrozoodporność (wskaźnik mrozoodporności $> 0,9$), jednak mieszanki z kruszywem betonowym również spełniają wymagania mrozoodporności stawiane podbudowom wg WT-5 (wskaźnik mrozoodporności na poziomie 0,8).

Similarly as in the case of the experimental strengths after 7 and 28 days, there are significant differences between the frost resistance index (and the compressive strength after 14 freeze-thaw cycles) of the cement bound mixtures based on RCA and that of the mixtures made of NA. At $\alpha = 0.05$ the test results do not fall into common sets. Whereas in the case of the frost resistance index (and the compressive strength after 14 freeze-thaw cycles) of the mixtures based entirely on RCA and that of the mixtures in which RCA constitutes the mixture's skeleton (and natural aggregate constitutes the fine-grain fractures) the differences are statistically insignificant at $\alpha = 0.05$ and the results can belong to common sets.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The authors have presented the possibilities of using recycled concrete aggregate for cement bound roadbase courses. Recycled concrete aggregate was subjected to physicomachanical tests which showed that it was characterized by higher water absorption and lower frost resistance in comparison with granite aggregate. Nevertheless, the possibility of using such aggregate in cement bound mixtures for roadbase courses was positively verified. Four granite-concrete mixtures of the same grading, but differing in their recycled concrete content were analysed. Four trial batches with a cement content of 6-10% were made for each of the aggregate mixture. The following conclusions emerge from the investigations:

- The compressive strength of the cement bound mixtures with granite aggregate and that of the mixtures in which granite aggregate constituted the skeleton (the coarse-grain fraction) was higher than that of the mixtures with recycled concrete aggregate. Nevertheless, the WT-5 requirements for subbase and base courses were met in both cases.
- Depending on the cement content, the mixtures based on RCA would reach strengths from 4.5 MPa to 16.0 MPa, as compared with the required strength classes for base courses from C3/4 for KR1-2 to C8/10 for KR5-7.
- The cement bound mixtures with granite aggregates show higher frost resistance (the frost resistance index > 0.9), but the mixtures with recycled concrete aggregates also meet the frost resistance requirements set for roadbase courses by WT-5 (the frost resistance index of 0.8).
- The cement bound mixtures met the frost resistance requirement despite the fact that the frost resistance of the RCA was below that required by WT-5. It is proposed to revise the frost resistance requirements for recycled concrete aggregate in the national guidelines. Currently,

- Mrozoodporność mieszanek związanych cementem została spełniona mimo braku wymaganej wg WT-5 mrozoodporności kruszywa betonowego użytego w mieszankach. Proponuje się zrewidowanie wymagań mrozoodporności kruszywa z recyklingu w wytycznych krajowych. Obecnie wytyczne WT-5 dopuszczają stosowanie w mieszankach związanych cementem na podbudowy pomocnicze na poziomie nie wyższym niż 50% kruszywa z recyklingu, którego mrozoodporność przekracza 10% (lecz nie więcej niż 25%). Stosowanie takich kruszyw w mieszankach przeznaczonych na podbudowy zasadnicze nie jest dozwolone wg WT-5.

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł został napisany w związku z realizacją zadań badawczych w zakresie projektu pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia „Rozwój Innowacji Drogowych (RID)”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Surya M., Kanta Rao V.V.L., Lakshmy P.*: Recycled aggregate concrete for transportation infrastructure. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **104**, 2013, 1158-1167
- [2] *Yang You-Fu, Hou Chao*: Behaviour and design calculations of recycled aggregate concrete-filled steel tube (RACFST) members. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 11, 2015, 611-620
- [3] *Safiuddin M., Alengaram U.J., Rahman M.M., Salam M.A., Jumaat M.Z.*: Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, **19**, 6, 2013, 796-810
- [4] *Ho Nyok Yong, Lee Yang Pin Kelvin, Lim Wee Fong, Chew Keat Chuan, Low Giau Leong, Ting Seng Kiong*: Evaluation of RCA concrete for the construction of Samwoh Eco-Green Building. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 12, 2015, 633-644
- [5] *Joseph M., Boehme L., Sierens Z., Vandewalle L.*: Water absorption variability of recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 11, 2015, 592-597
- [6] *Jang Seok-Joon, Yun Hyun-Do*: Mechanical properties of ready-mixed concrete incorporating fine recycled aggregate. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 12, 2015, 621-632
- [7] *Kubissa J., Koper M., Koper W., Kubissa W., Koper A.*: Water demand of concrete recycled aggregates. The 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015). *Procedia Engineering*, **108**, 1, 2015, 63-71
- the WT-5 guidelines allow the use of not more than 50% of RCA whose frost resistance does not exceed 10% (but not more than 25%) in cement bound mixtures for subbase courses. According to WT-5, the use of such aggregates in mixtures intended for base courses is not allowed.

ACKNOWLEDGEMENT

The paper has been prepared in connection with accomplishment of research tasks in the project entitled “Salvaging recycled materials” as a part of the common enterprise “Development of Road Innovations (RID)” co-financed by the National Center of Researches and Development and The General Directorate for National Roads and Highways.

- [8] *Rodríguez-Robles D., García-González J., Juan-Valdés A., Morán-del P.J., Guerra-Romero I.M.*: Effect of mixed recycled aggregates on mechanical properties of recycled concrete. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 5, 2015, 247-256
- [9] *He Zhen-jun, Cao Wan-lin, Zhang Jia-xing, Wang Lu*: Multiaxial mechanical properties of plain recycled aggregate concrete *Magazine of Concrete Research*, **67**, 8, 2015, 401-413
- [10] *Behnood A., Olek J., Glinicki M.A.*: Predicting compressive strength of recycled aggregate concrete using M5' model. *Proc. Int. Symp. Brittle Matrix Composites, BMC-11, IPPT PAN, Warsaw 2015*, 381-391
- [11] *Angelakopoulos H., Papastergiou P., Pilakoutas K.*: Fibrous roller-compacted concrete with recycled materials - feasibility study. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 15, 2015, 801-811
- [12] *Stehlik M.*: Enhancing the durability of concrete made of concrete recycle by additives and admixtures, *Journal of Civil Engineering and Management*, **20**, 2, 2014, 270-279
- [13] *Park Won-Jun, Noguchi Takafumi, Shin Sang-Heon, Oh Da-Young*: Modulus of elasticity of recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 11, 2015 585-591
- [14] *Song Xuefeng, Qiao Pizhong, Wen Haifang*: Recycled aggregate concrete enhanced with polymer aluminium sulfate. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 10, 2015, 496-502
- [15] *Ge Zhesheng, Li Hui, Han Zhetai, Zhang Qingshan*: Properties of cold mix asphalt mixtures with reclaimed granular aggregate from crushed PCC pavement. *Construction and Building Materials*, **77**, 2015, 404-408

- [16] Wang Wenjing, Zhao Lin, Liu Yuanzhen, Li Zhu: Mix design for recycled aggregate thermal insulation concrete with mineral admixtures. *Magazine of Concrete Research*, **66**, 10, 2014, 492-504
- [17] Banjad Pečur I., Štirmer N., Milovanović B.: Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 11, 2015, 575-584
- [18] Glinicki M.A., Jaskulski R., Dąbrowski M.: Krytyczny przegląd zasad projektowania i sprawdzania mrozoodporności wewnętrznej betonu przeznaczonego na konstrukcje drogowe. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 1, 2016, 21-43, DOI:10.7409/rabdim.016.002
- [19] Šeps K., Fládr J., Broukalová I.: Resistance of recycled aggregate concrete to freeze thaw and deicing salts. *Procedia Engineering*, **151**, 2016, 329-336
- [20] Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.: Suitability of aggregate recycled from concrete pavements for layers made of unbound and cement bound mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 39-53, DOI: 10.7409/rabdim.018.003
- [21] WT 5 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. GDDKiA, Warszawa 2010
- [22] PN-S-96013:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa z chudego betonu. Wymagania i badania
- [23] PN-S-96014:1997 Drogi samochodowe i lotniskowe. Podbudowa z betonu cementowego pod nawierzchnię ulepszoną. Wymagania i badania
- [24] PN-EN 14227-1:2013-10 - wersja angielska. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Wymagania - Część 1: Mieszanki związane cementem
- [25] PN-EN 14227-1:2007 - wersja polska. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Wymagania - Część 1: Mieszanki związane cementem
- [26] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [27] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [28] Ogólna Specyfikacja Techniczna D-04.06.01 Podbudowa z chudego betonu. GDDKiA, 2003
- [29] Ogólna Specyfikacja Techniczna D-04.06.01b. Podbudowa z betonu cementowego. GDDKiA, 2005
- [30] PN-EN 13791 Ocena wytrzymałości na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
- [31] PN-EN 13877-2:2013-08 Nawierzchnie betonowe. Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych
- [32] Pelczyńska K., Gajewski M.: Przegląd wybranych kryteriów zmęczeniowych warstw związanych spoiwami hydraulicznymi w nawierzchniach drogowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 3, 2018, 227-248, DOI: 10.7409/rabdim.018.015
- [33] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność