

Zastosowanie kruszywa betonowego z recyklingu w mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych

Application of recycled concrete aggregate in mineral-cement-emulsion mixtures



Łukasz Skotnicki

Dr inż.

Politechnika Wrocławska,
Zakład Dróg i Lotnisk

lukasz.skotnicki@pwr.edu.pl



Jarosław Kuźniewski

Dr inż.

Politechnika Wrocławska,
Zakład Dróg i Lotnisk

jaroslaw.kuzniewski@pwr.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z realizacją grantu badawczego „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID), współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcyję Dróg Krajowych i Autostrad. Głównym celem projektu była analiza możliwości zastosowania destruktu betonowego, pochodzącego z rozbiórki istniejących dróg, do wytworzenia nowych warstw nawierzchni drogowych. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań, przedstawiające wpływ zawartości destruktu betonowego na parametry wytrzymałościowe mieszank mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Stwierdzono dużą zmienność badanych cech mieszank MCE w zależności od procentowej zawartości materiału z recyklingu. Zaproponowano zaimplementowanie nowych badań do procesu projektowania mieszank MCE oraz określono optymalną zawartość destruktu betonowego, pozwalającą na uzyskanie wymaganych wartości analizowanych parametrów. Stosując destruk betonowy w konwencjonalnych mieszankach MCE uzyskano pozytywne efekty ekonomiczne oraz środowiskowe.

Słowa kluczowe: Recykling; Mieszanka MCE; Destrukt betonowy

Abstract: The article presents selected problems connected with the accomplishment of the research grant ‘Application of reclaimed materials’ as part of the joint project Development of Road Innovations (RID) co-financed by the National Centre of Research and Development as well as the General Directorate for National Roads and Motorways. The main aim of the project was to analyse possibilities of application of reclaimed concrete obtained from the demolition waste from the existing roads to produce new layers of road pavements. The article presents selected test results which show the influence of the reclaimed concrete content on the strength parameters of the MCE mixtures. Significant variation of the tested MCE mixtures properties depending on the percentage of the reclaimed material has been indicated. It has been suggested that new tests should be implemented in the process of MCE mixtures design process. An optimal content of reclaimed concrete has been determined in order to obtain required values of the analysed parameters. The application of reclaimed concrete in conventional MCE mixtures made it possible to achieve positive economical and environmental effects.

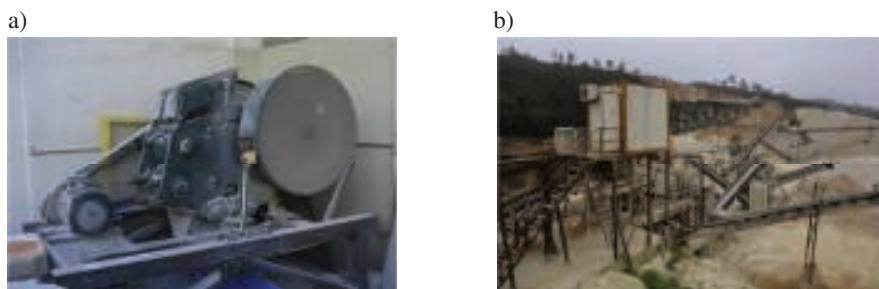
Keywords: Recycling; MCE mixture; Reclaimed concrete

W ramach realizacji grantu badawczego Zakład Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej w latach 2016-2017 brał udział w projekcie: „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”. Zakres tematu badawczego obejmował recykling materiałów betonowych i powtórne wykorzystanie kruszywa betonowego w warstwach nawierzchni drogowych.

Podstawowym celem tematu badawczego były badania właściwości materiałów pochodzących z recyklingu oraz analiza możliwości zastosowania kruszywa betonowego do warstw nawierzchni drogowych. Opracowano procedury badań i oceny właściwości

destruktu betonowego a także wytyczne określające warunki powtórnego wykorzystania materiału, pochodzącego z recyklingu nawierzchni betonowych, w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej, podłoża ulepszonego oraz nasypów drogowych. Jednym z materiałów służącym do wykonania warstw podbudowy drogowej są mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne. Innowacyjne podejście w temacie badawczym polegało na zastosowaniu w składzie tych mieszank destruktu betonowego w połączeniu z emulsją asfaltową i cementem. Podstawą analiz było określenie wpływu procentowej zawarto-

ści destruktu betonowego na parametry wytrzymałościowe mieszank mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). W zakresie badań ujęto: wytrzymałość mieszank MCE na rozciąganie pośrednie ITS, moduł sztywności IT-CY, zawartość wolnych przestrzeni Vm. Dodatkowo dla mieszank MCE zawierających destruk betonowy określono zespolony moduł sztywności określony metodą belki 4-punktowej 4PB-PR. Cecha ta nie jest aktualnie objęta w procesie projektowania oraz w wymaganiach dla warstw podbudowy z mieszank MCE wg [4].



1. Kruszarki stacjonarne a) jednostopniowa, b) dwustopniowa [5]

Kruszywo betonowe z recyklingu

W literaturze anglojęzycznej kruszywo betonowe z recyklingu określane jest jako recycled concrete aggregate (RCA). Większość odpadów, które mogą być powtórnie zastosowane do wykonania nowych elementów, pochodzi z prac rozbiórkowych. Odpady te określane są mianem materiałów construction and demolition waste (CDW).

Podstawowym sposobem pozyskiwania kruszywa betonowego jest kruszenie wyeksploatowanych elementów betonowych w kruszarkach stacjonarnych. Proces pozyskiwania recyklowanego kruszywa betonowego z materiałów CDW składa się z: rozbiórki istniejących elementów konstrukcyjnych, składowania tych mate-

riałów, kruszenia w kruszarkach szczękowych, rozsiewania na poszczególne frakcje, kruszenia w kruszarkach bębnowych, separowania najdrobniejszych frakcji kruszywa, odzyskiwania elementów niepożądanych (np. zbrojenia) w separatorach magnetycznych [3, 17]. W efekcie tego procesu uzyskiwane jest czyste kruszywo betonowe o zadanym uziarnieniu.

Innym przykładem kruszarek stacjonarnych są jednostopniowe kruszarki uderzeniowe lub kruszarki dwustopniowe (kruszarki uderzeniowe w połączeniu z młynami młotkowymi) [5] – rys. 1.

W zależności od zastosowanej metody kruszenia uzyskiwane jest kruszywo betonowe o różnym uziarnieniu i właściwościach użytkowych. Badania prowadzone w Portugalii wskazują

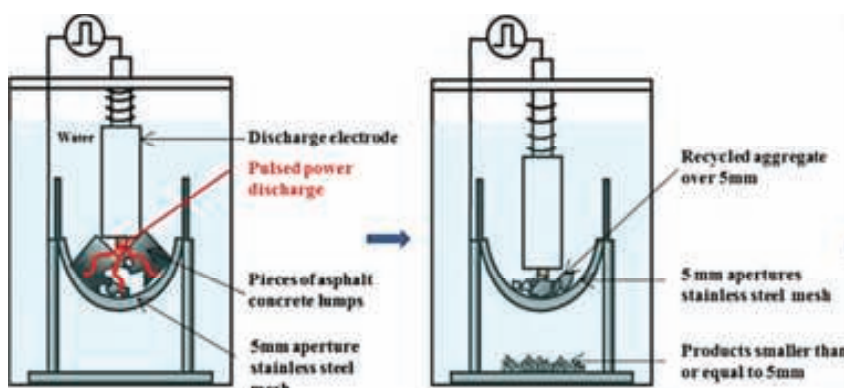
jednak, że na parametry wytrzymałościowo – odkształceniowe materiałów wytworzonych z kruszywa betonowego (np. beton cementowy) większy wpływ mają właściwości materiałów pochodzących z rozbiórki niż metoda kruszenia tego materiału [5].

W krajach mniej rozwiniętych stosowane są ręczne metody kruszenia [16]. Taki model pozyskiwania kruszywa betonowego charakteryzuje się dużą niejednorodnością w uziarnieniu tego materiału oraz dużą czasochłonnością procesu.

Badania betonowych elementów prefabrykowanych wytworzonych na bazie kruszywa betonowego z recyklingu wykazały, że charakteryzują się one niższą wytrzymałością w porównaniu do elementów wytwarzanych na bazie naturalnego kruszywa. Może to być spowodowane większą nasiąkliwością kruszywa z recyklingu w porównaniu do kruszyw naturalnych. Jednak uzyskane parametry elementów prefabrykowanych na bazie kruszywa betonowego z recyklingu, pozwala na ich zastosowanie w nowych konstrukcjach budowlanych [16].

Obecnie coraz popularniejsze staje się zastosowanie tzw. recyklingu na miejscu dla wyeksploatowanych elementów betonowych. W przypadku nawierzchni drogowych nowatorską metodą jest metoda wyładowań impulsowych, zastosowana przez badaczy z Japonii. Zastosowana została w warunkach laboratoryjnych do kruszenia mieszanek mineralno-asfaltowych [15]. Za pomocą elektrod wyładowczych w środowisku wodnym następuje kruszenie konglomeratu kruszywa i lepiszcza asfaltowego na ustalone frakcje. W efekcie procesu uzyskuje się kruszywo z recyklingu oraz frakcje lepiszcza asfaltowego – rys. 2. Metoda ta mogłaby być w przyszłości zaimplementowana w warunkach terenowych do kruszenia nawierzchni asfaltowych jak również nawierzchni betonowych.

Kolejną nowatorską metodą kruszenia jest metoda elektro-dynamiczna. Zasada kruszenia polega na generowaniu wyładowań elektrycznych, po-



2. Metoda kruszenia za pomocą wyładowania impulsowego [15]



3. Uderzeniowa kruszarka mobilna Hartle PC-160 [2]

wodujących pękanie odzyskiwanego materiału. W zależności od poziomu zastosowanej energii możliwe jest uzyskanie różnych frakcji kruszenia. Metoda ta została wykorzystana przez uczonych z Belgii i Szwajcarii w nowatorskim kruszeniu elementów elektronicznych. Badacze stwierdzili, że istnieje możliwość uzyskania uziarnienia materiału poddanego recyklingowi, podobnego do uziarnienia uzyskiwanego w młynach młotkowych [14]. Po odpowiednich modyfikacjach metoda mogłaby zostać wprowadzona do kruszenia istniejących konstrukcji betonowych.

W kruszeniu zdegradowanych konstrukcji betonowych popularne są kruszarki mobilne do zastosowań na miejscu. Kruszarki mobilne pozwalają na uzyskanie rozdrobnienia materiału, który jest później przesiewany na zestawie sit do wymaganych frakcji – rys. 3 [2].

W badaniach uczonych z Egiptu wykazano, że kruszywo betonowe z recyklingu z powodzeniem może zostać używane ponownie, do wytwarzania nawet betonów cementowych. Wykazano, że zawartość kruszywa z recyklingu na poziomie 25% nie wpływa znacząco na właściwości betonu cementowego. Betony o zawartości 25% - 50% kruszywa z recyklingu charakteryzowały się niższymi parametrami wytrzymałościowymi w porównaniu z konwencjonalnymi betonami, jednak ich cechy pozwalały na zastosowanie finalnego produktu w konstrukcjach. W badaniach wykazano dużą nasiąkliwość i wysoką ścieralność kruszywa betonowego z recyklingu [2].

Wykazano, że mieszanki wykonane z wysoko jakościowego recyklowanego kruszywa betonowego miały bardzo podobną wytrzymałość do próbek wykonanych w całości z kruszywa naturalnego. Dotyczy to zarówno mieszanek betonu wałowanego, jak i mieszanek betonowych wzmocnionych włóknem stalowym [1].

Badania przedstawione w [18] wykazały możliwość zastosowania betonowego kruszywa recyklowanego do wytworzenia nowych mieszanek

betonowych. Analizy dotyczyły trzech podstawowych właściwości mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie oraz moduł sprężystości) i dwóch parametrów stałości objętości (skurcze powstałe w wyniku obsuszania i ograniczone pęknięcia skurczowe). Wykazano, że dodatki polimerowego siarczanu glinu poprawia mikrostrukturę mieszanki. To przyczynia się do ulepszenia właściwości mechanicznych, zmniejszenia skurczów spowodowanych wysuszeniem i opóźnienia okresu ograniczonych pęknięć skurczowych.

Dobór składników mieszanek MCE

Wzajemne proporcje pomiędzy poszczególnymi składnikami (destruktu betonowy, materiał doziarniający, spoiwo hydrauliczne, lepiszcze asfaltowe) decydują o właściwościach wytrzymałościowych i odkształceniowych mieszanek MCE. W celach badawczych wykonano szereg analiz dotyczących wpływu uziarnienia mieszanki mineralnej i składu mieszanek MCE na wybrane cechy tych materiałów. Skład mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej będzie wpływał na właściwości przyszłej warstwy konstrukcyjnej nawierzchni drogowej.

Badania polegały na analizie wpływu procentowej zawartości destruktu betonowego na podstawowe cechy wytrzymałościowe mieszanek MCE. W tym celu zaproponowano różne udziały procentowe destruktu betonowego w mieszance. Mieszanki te oznaczono symbolami MCE 1, MCE 2, MCE 3 i MCE 4. Założono udziały destruktu betonowego odpowiednio na poziomach 25%, 45%, 0% i 70% w stosunku do całej mieszanki mineralnej. Pozostałą część stanowił zawsze materiał doziarniający – granit.

Do analizowanych mieszanek MCE zastosowano emulsję kationową C60B10 R zgodnie z wymaganiami [12]. Dodatkowo wg [4] zaleca się, aby emulsja spełniała dodatkowo następujące warunki: rodzaj asfaltu: 50/70 lub 70/100 wg [6], brak rozpuszczalników i topników. Ponadto emulsja

Tab. 1. Procentowe zawartości poszczególnych frakcji dla materiałów wsadowych

Sito	Destrukt I (P2)	Granit
[mm]	[%]	[%]
31,5	18,2	4,0
16,0	24,6	22,2
8,0	17,9	14,0
4,0	18,0	13,4
2,0	9,5	9,1
1,0	6,7	9,7
0,5	3,0	7,2
0,125	1,5	10,1
0,063	0,4	3,5
<0,063	0,1	7,1
Suma	100,0	100,0

Tab. 2. Skład mieszanki MCE 1 (25% destruktu, 75% granitu)

MCE 1	Składniki	Skład roboczy MM	Skład MCE	Zawartość C+E+W
	[-]	[%]	[%]	[%]
	Destrukt I (P2)	25,0	21,4	14,6
	Granit	75,0	64,1	
	CEMENT	-	3,0	
	Emulsja 60/40	-	5,0	
	Woda		6,6	
	W sumie	100,0	100,0	

Tab. 3. Skład mieszanki MCE 2 (45% destruktu, 55% granitu)

MCE 2	Składniki	Skład roboczy MM	Skład MCE	Zawartość C+E+W
	[-]	[%]	[%]	[%]
	Destrukt I (P2)	45,0	38,4	14,6
	Granit	55,0	47,0	
	CEMENT	-	3,0	
	Emulsja 60/40	-	5,0	
	Woda		6,6	
	W sumie	100,0	100,0	

Tab. 4. Skład mieszanki MCE 3 (0% destruktu, 100% granitu)

MCE 3	Składniki	Skład roboczy MM	Skład MCE	Zawartość C+E+W
	[-]	[%]	[%]	[%]
	Destrukt I (P2)	0,0	0,0	14,6
	Granit	100,0	85,4	
	CEMENT	-	3,0	
	Emulsja 60/40	-	5,0	
	Woda		6,6	
	W sumie	100,0	100,0	

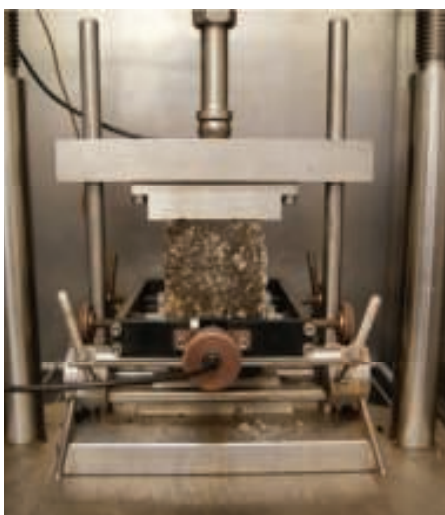
powinna charakteryzować się dobrą tolerancją ze spoiwem. W projektowa-

Tab. 5. Skład mieszanki MCE 4 (70% destruktu, 30% granit)

MCE 4	Składniki	Skład roboczy MM	Skład MCE	Zawartość C+E+W
	[-]	[%]	[%]	[%]
	Destrukt I (P2)	70,0	59,8	14,6
	Granit	30,0	25,6	
	CEMENT	-	3,0	
	Emulsja 60/40	-	5,0	
	Woda		6,6	
	W sumie	100,0	100,0	

nych mieszankach MCE zastosowano cement portlandzki CEM II klasy 32,5 spełniający wymagania [13]. Dotyczy one składu cementu i kryteriów zgodności dla cementów powszechnego użytku. W bieżącym opracowaniu skoncentrowano się na mieszankach typu MCE przeznaczonych do warstw nawierzchni drogowych obciążonych ruchem KR3 – KR7. Kolejnym krokiem było założenie procentowych zawartości środków wiążących. Stosując środki wiążące (emulsja, cement) przyjęto ich zawartości: emulsja asfaltowa 5% wagowo i cement: 3% wagowo.

Próbki do badań mieszank MCE zagęszczono przy optymalnej zawartości wody. Na parametr ten składa się woda pochodząca z emulsji oraz woda zawarta w materiałach i woda dodana do mieszanki. Optymalną zawartość płynów określono w oparciu o metodę Proctora, zgodnie z normą [11]. Uziarnienie materiałów wsadowych zamieszczono w tab. 1. Składy mieszank zamieszczono w tab. 2-5,



5. Badanie modułu sztywności metodą IT-CY

Tab. 6. Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanki MCE [4]

Cecha:	Wymagane wartości:	
	Ruch KR1+KR2	Ruch KR3+KR4
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	od 8 do 18 maksymalnie 14 ¹⁾	od 8 do 15 maksymalnie 12 ¹⁾
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, T = +5°C, po 7 dniach, [MPa]	od 0,40 do 0,80	od 0,50 do 1,00
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, T = +5°C po 28 dniach, [MPa]	od 0,60 do 1,40	od 0,70 do 1,60
Moduł sztywności IT-CY, T = +5°C po 28 dniach, [MPa]	od 1500 do 5000	od 2000 do 7000
Odporność na działanie wody (pozostała wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu próbek w wodzie), T = +5°C po 28 dniach, [%]	nie mniej niż 70	nie mniej niż 80

¹⁾ - Materiały rozbiórkowe zawierające smołę.

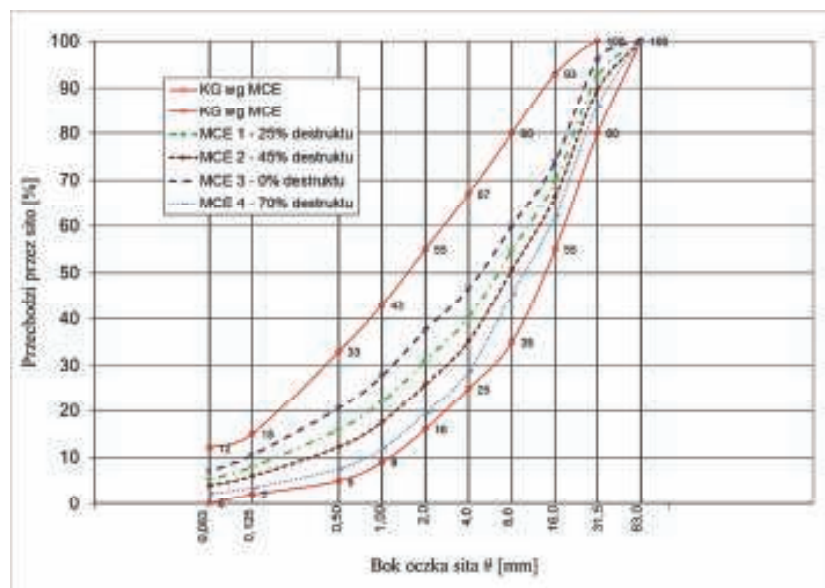
natomiast krzywe uziarnienia wraz z krzywymi granicznymi na rys. 4.

Program badawczy

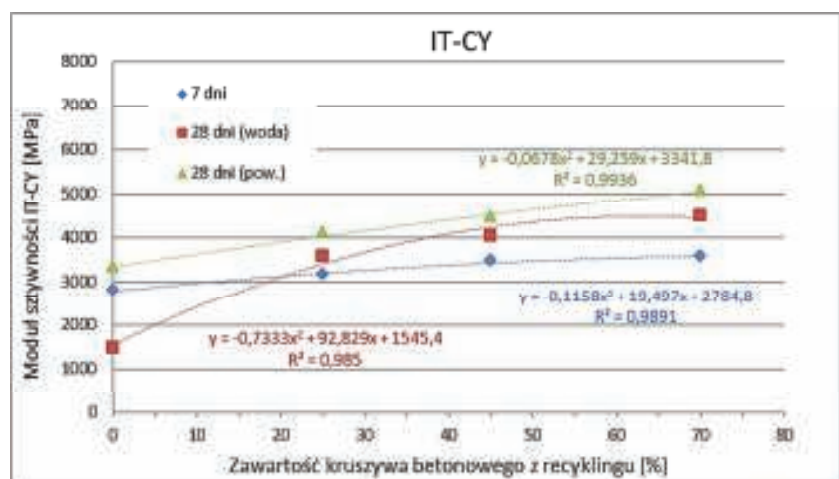
Wg wytycznych [4] zaprojektowana mieszanka typu MCE powinna spełniać wymagania podane w tab. 6. W analizach wpływu uziarnienia

uwzględniono następujące cechy:

- Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS (dojrzewanie 7 dni w powietrzu, 28 dni w powietrzu, 28 dni w wodzie),
- Moduł sztywności IT-CY (dojrzewanie 7 dni w powietrzu, 28 dni w wodzie),
- Zawartość wolnych przestrzeni



4. Uziarnienie mieszank MCE



6. Moduł sztywności IT-CY – wpływ procentowej zawartości kruszywa betonowego z recyklingu

V_m (dojrzewanie 28 dni w powietrzu),
oraz dodatkowo do zakresu badań mieszanek MCE zawierających destruktu betonowy włączono analizy:

- Zespólnego modułu sztywności metodą belki 4-punktowej 4PB-PR (dojrzewanie 28 dni w powietrzu). Moduł sztywności IT-CY określony został w aparacie NAT (Nottingham Asphalt Tester) wg [8], w temperaturze +5°C – rys. 5.

Punktem wyjścia do obliczeń jest pomiar siły oraz odkształcenia próbki pod wpływem przyłożonego obciążenia. Moduł sztywności wyznaczony został metodą rozciągania pośredniego (1):

$$S_m = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}, \quad (1)$$

gdzie: S_m – moduł sztywności metodą rozciągania pośredniego [MPa], F – maksymalna wartość siły pionowej [N], v – współczynnik Poissona badanego materiału [-], z – amplituda uzyskanego odkształcenia [mm], h – średnia grubość próbki [mm].

Wyniki analiz modułu sztywności metodą IT-CY zamieszczono na rys. 6.

Wraz ze wzrostem ilości destruktu betonowego w mieszance MCE sztywność mieszanek MCE wzrastała. Zależności te opisano funkcją wielomianową. Uzyskano dobre odwzorowanie wyników badań, współczynnik korelacji R^2 wynosił więcej niż 0,98. Moduły IT-CY spełniały wymagania po

28 dniach (2000 MPa – 7000 MPa). Po tym okresie dojrzewania próbek, zadowalające wartości średnie uzyskano przy zawartości destruktu około 45%. Powyżej tej zawartości wzrost modułu sztywności mieszanek był nieznaczny. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS określona została w Uniwersalnej Prasie Marshalla wg [7], w temperaturze +5°C – rys. 7. Wyniki analiz wytrzymałości na rozciąganie pośrednie zamieszczono na rys. 8.

Do obliczenia wytrzymałości na rozciąganie ITS skorzystano z zależności (2):

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot h}, \quad (2)$$

gdzie: ITS – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa], P – wartość przyłożonej siły [N], D – średnica próbki [mm], h – wysokość próbki [mm].

Wraz ze wzrostem ilości destruktu betonowego w mieszance MCE wytrzymałość ITS wzrastała. Zależności te opisano funkcjami wielomianowymi, przedstawionymi na rysunku. Uzyskano dobre odwzorowanie wyników badań, współczynnik korelacji R^2 wynosił więcej niż 0,95. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie była za niska w stosunku do wymagania wynoszącego minimum 0,7 MPa wg [4], natomiast przy zawartości destruktu w granicach 40-70%, wartości wytrzymałości były maksymalne.

Zawartość wolnych przestrzeni V_m określona została z wykorzystaniem

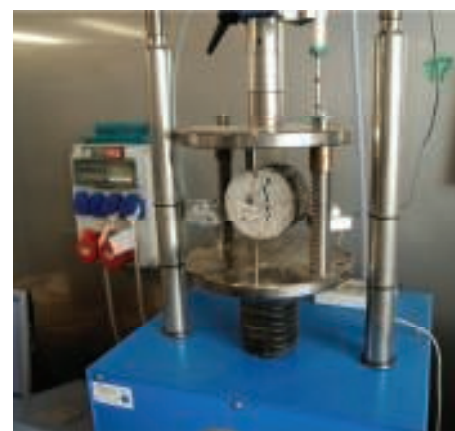
metody hydrostatycznej (gęstość objętościowa) oraz metody w piknometrze (gęstość wg [10] – rys. 9. Wyniki analiz zawartości wolnej przestrzeni w mieszankach MCE zamieszczono na rys. 10. Gęstość mieszanki obliczono wg zależności (3) [9]:

$$\rho_m = \frac{m_1 - m}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w}}, \quad (3)$$

gdzie: ρ_m – gęstość mieszanki MCE [g/cm³], m – masa piknometru [g], m_1 – masa piknometru z próbką [g], m_2 – masa piknometru z próbką i wodą [g], V – objętość piknometru do kreski pomiarowej na nasadce [cm³], ρ_w – gęstość wody w temperaturze badania [g/cm³].

Wolną przestrzeń w próbce z mieszanki MCE zagęszczonej w laboratorium lub w próbce pobranej z zagęszczonej warstwy, należy wyznaczyć wg zależności (4) [10]:

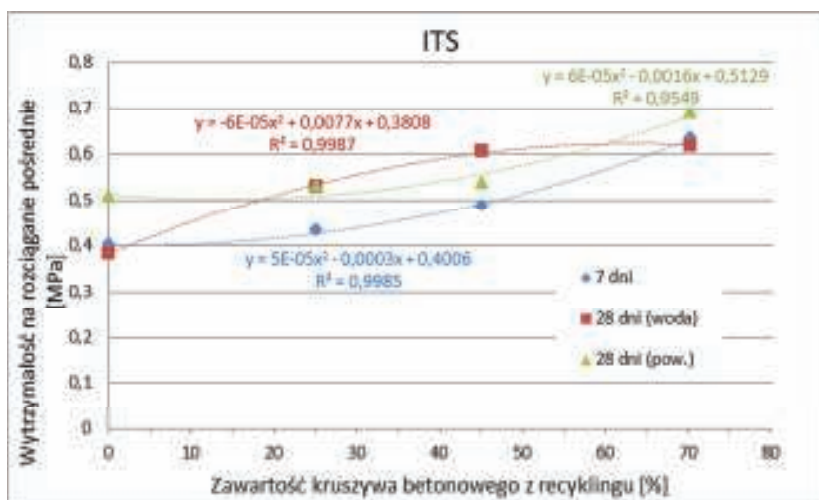
$$Vm = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100 [\%], \quad (4)$$



7. Badanie wytrzymałości metodą ITS



9. Badanie gęstości w piknometrze



8. Wytrzymałość ITS – wpływ procentowej zawartości kruszywa betonowego z recyklingu

gdzie: V_m – zawartość wolnej przestrzeni [%], ρ_m – gęstość mieszanki MCE [g/cm³], ρ_b – gęstość objętościowa zagęszczonej mieszanki MCE [g/cm³].

Zawartość wolnej przestrzeni wahała się w granicach 13,5-15,2%. Wraz ze wzrostem ilości destruktu betonowego w mieszance MCE zawartość wolnej przestrzeni wzrastała.

Zależność tę opisano funkcją wielomianową, przedstawioną na rys. 10. Uzyskano dobre odwzorowanie wyników badań, współczynnik korelacji R^2 wynosił więcej niż 0,98. Wymaganie dotyczące maksymalnej zawartości wolnej przestrzeni to 15%. Kierując się tym wymaganiam zawartość destruktu w mieszance może wynosić maksymalnie 60%. Zespólny moduł sztywności

określony został w badaniach zginania belki 4 punktowej (4PB) wg [8], w temperaturze +10°C – rys. 11. Próbkę poddano obciążeniu sinusoidalnemu w postaci zadanego odkształcenia. Częstotliwość obciążenia wynosiła 10Hz. Zespólny moduł sztywności analizowany był przy zadanym odkształceniu: $\varepsilon=50 \cdot 10^{-6}$ m/m. Wyniki analiz zespólnego modułu sztywności metodą zginania belki 4-punktowej zamieszczono na rys. 12.

Podczas cyku obciążającego, wykorzystując wartości siły i przemieszczenia, określany jest dynamiczny zespólny moduł sztywności E^* badanego materiału wg zależności (5), (6), (7) [47].

$$E^* = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (5)$$

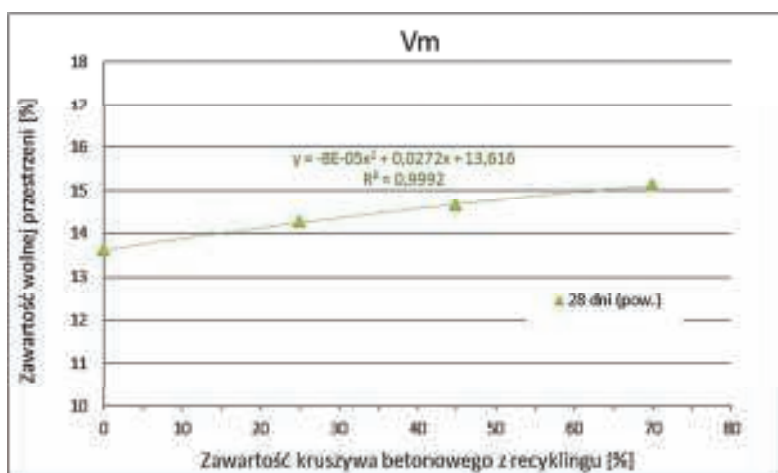
Wielkości składowe E_1 oraz E_2 określone są bezpośrednio z następujących zależności (6) i (7).

$$E_1 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \cos(\phi) + \frac{\mu}{10^6} \cdot \omega^2 \right) \quad (6)$$

$$E_2 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \sin(\phi) \right) \quad (7)$$

gdzie: E^* - zespólny moduł sztywności [MPa], F – siła wywołująca ugięcie próbki [N], z – ugięcie w środku rozpiętości próbki [mm], ϕ – kąt przesunięcia fazowego [°], ω – częstotliwość obciążenia [rad/s], μ – współczynnik masy, γ – współczynnik kształtu.

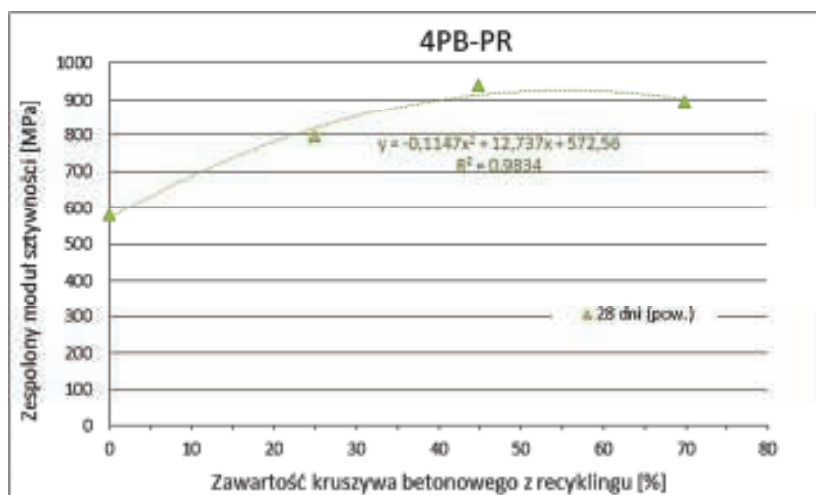
Zespólny moduł sztywności mieszanek MCE wzrastał wraz ze wzrostem zawartości destruktu betonowego w mieszankach do wartości ok 45-50%. Powyżej tej zawartości nastąpił spadek sztywności analizowanego materiału. Zależność tę opisano funkcją wielomianową, przedstawioną na rysunku. Uzyskano dobre odwzorowanie wyników badań, współczynnik korelacji R^2 wynosił więcej niż 0,98. Zespólny moduł sztywności 4PB przyjmował maksymalne wartości dla zawartości destruktu na poziomie 45%. Obecnie analizy zespólnego modułu sztywności nie są wymagane w procedurze projektowania mieszanek MCE.



10. Zawartość wolnej przestrzeni V_m – wpływ procentowej zawartości kruszywa betonowego z recyklingu



11. Maszyna wytrzymałościowa z wkładką do badań belki 4 punktowej 4PB



12. Zespólny moduł sztywności 4PB-PR – wpływ procentowej zawartości kruszywa betonowego z recyklingu

Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły możliwość zastosowania materiału pochodzącego z recyklingu, w postaci kruszywa betonowego z recyklingu, do wytworzenia mieszanek MCE. Mieszanki spełniają wymagania projektowania do zastosowania w warstwach konstrukcyjnych nowych nawierzchni drogowych. Destrukt betonowy nadaje się do wykonania warstw z mieszanek MCE po zastosowaniu odpowiedniego doziarnienia. Mieszanki MCE zawierające kruszywo betonowe mogą zostać wykorzystane do konstrukcji warstw podbudowy nawierzchni obciążonych ruchem do kategorii ruchu KR7. Zawartość kruszywa betonowego z recyklingu w mieszankach MCE na poziomie 45% pozwala na uzyskanie optymalnego uziarnienia mieszanki mineralnej i maksymalnych cech wytrzymałościowych mieszanki MCE. Zawartość kruszywa betonowego z recyklingu w mieszance MCE poniżej 20% jest nieuzasadniona ekonomicznie, natomiast zwiększanie zawartości kruszywa betonowego z recyklingu powyżej 60% może powodować pogorszenie się cech wytrzymałościowych mieszanek.

Z uwagi na stosowanie kruszywa betonowego z recyklingu w mieszankach MCE należy odpowiednio zmodyfikować i uzupełnić istniejące procedury i kryteria projektowania tych mieszanek. Obowiązujące kryteria projektowania mieszanek MCE nie dotyczą mieszanek zawierających w swym składzie kruszyw betonowych z recyklingu. Jednocześnie kryteria te nie uwzględniają obecnych możliwości badawczych oraz rzeczywistej pracy warstwy wykonanej z mieszanki MCE w konstrukcji nawierzchni. Z tego względu należy je rozszerzyć o wymagania dotyczące modułu sztywności 4PB-PR i trwałości zmęczeniowej.

Niniejszy artykuł powstał w związku z realizacją zadań badawczych w projekcie pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia

Rozwój Innowacji Drogowych (RID), współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Angelakopoulos Harris, Papastergiou Panos, Pilakoutas Kypros – Fibrous roller-compacted concrete with recycled materials – feasibility study, Magazine of Concrete Research, 2015, Volume 67, Issue 15, p. 801-811.
- [2] Ashraf M. Wagih, Hossam Z. El-Karmoty, Magda Ebid, Samir H. Okba – Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete - HBRC Journal (2013) 9, 193–200.
- [3] Cabral A. E. B. - Concrete with construction and demolition wastes (CDW) - Federal University of Ceará, Brazil, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [4] Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). GDDKiA, Gdańsk 2014.
- [5] Pedro D., de Brito J., Evangelista L. - Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete - Construction and Building Materials 71 (2014) 141–151.
- [6] PN-EN 12591. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Wymagania dla asfaltów drogowych.
- [7] PN-EN 12697-23. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 23: Oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie.
- [8] PN-EN 12697-26. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 26: Sztywność.
- [9] PN-EN 12697-5. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 5: Oznaczanie gęstości.

- [10] PN-EN 12697-8. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni.
- [11] PN-EN 13286-2. Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie. Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora.
- [12] PN-EN 13808. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych.
- [13] PN-EN 197-1. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [14] Rémi Martino, Cédric Iseli, Stoyan Gaydardzhiev, Martin Streicher-Porte, Alexander Weh - Electro dynamic fragmentation of printed wiring boards as a preparation tool for their recycling - Minerals Engineering Volume 107, 2017, Pages 20-26.
- [15] Rétyce I.H.D.T. Amoussou, Mitsuru Sasaki and Mitsuhiro Shigeishi - An Application of Pulsed Power Technology and Subcritical Water to the Recycling of Asphalt Concrete - Procedia Engineering Volume 143, 2016, Pages 1–9.
- [16] Sabaia M.M., Coxa M.G.D.M, Matob R.R., Egmonda E.L.C, Lichtenberga J.J.N. - Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania - Resources, Conservation and Recycling 72 (2013) 9– 19.
- [17] Sim, J.; Park, C. - Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate - Waste Management, Vol. 31, No. 11, p. 2352-2360, 2011.
- [18] Song Xuefeng, Qiao Pizhong, Wen Haifang – Recycled aggregate concrete enhanced with polimer aluminium sulfate, Magazine of Concrete Research, 2015, Volume 67, Issue 10, p. 496-502.