

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 67, 2015: 40–53  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 67, 2015)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 67, 2015: 40–53  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 67, 2015)

**Wojciech SAS<sup>1</sup>, Anna MISZKOWSKA<sup>2</sup>, Andrzej GLUCHOWSKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratorium – Centrum Wodne, <sup>2</sup>Katedra Geoinżynierii

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

<sup>1</sup>Water Center Laboratory, <sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering  
Warsaw University of Life Sciences – SGGW

## **Wpływ podatności destruktu betonowego na kruszenie oraz zmiany jego właściwości fizycznych i mechanicznych**

### **Impact of crushing vulnerability on recycled concrete aggregate physical and mechanical properties**

**Słowa kluczowe:** CBR, kruszenie, sufozja, kształt ziaren, krzywa uziarnienia, destruktu betonowy

**Key words:** CBR, crushing, suffosion, grain shape, gradation curve, recycled concrete aggregate

### **Wprowadzenie**

Nieustanny rozwój budownictwa infrastrukturalnego wymaga coraz większego zaangażowania dużej ilości kruszyw. Przeprowadzone analizy (Zieliński, 2003) wykazały, że koszty wydobycia oraz transportu kruszyw naturalnych mają tendencję wzrostową. Zważając na aspekt ekonomiczny, a także środowiskowy konieczne jest podjęcie działań w kierunku wykorzystywania w drogownictwie kruszyw z recyklingu (Łapko i Grygo, 2011). Zgodnie

z PN-EN 13286-2:2010 mianem tym określa się kruszywa, na przykład destruktu betonowy lub ceglany, wytworzone w procesie przeróbki nieorganicznego kruszywa stosowanego wcześniej w budownictwie. Destruktu betonowy może być również uznany za grunt antropogeniczny (PN-EN 1997-1:2008), a także jako materiał budowlany zgodnie z ustawą z dnia 16 kwietnia 2004 roku o wyrobach budowlanych. Po kruszeniu i frakcjonowaniu możliwe jest jego ponowne wykorzystanie, jako materiał do utwardzania placów czy też podbudowa nawierzchni drogowych (Wilczek i Wileński, 2001; Falaciński i Pisarczyk, 2003; Pisarczyk, Falaciński i Żuraw, 2003; Xiao, Li i Lau, 2003; Etxeberria, Mari i Vazquez, 2007; Ajdukiewicz i Kliszczewicz, 2009; Pisarczyk, 2010; Sas i in., 2012).

W Polsce wciąż najczęstszym sposobem zagospodarowania destruktu betonowego jest jego składowanie. Na świecie sytuacja wygląda zupełnie inaczej (Tam i Tam, 2007). W Japonii wykorzystuje się do 90% gruzu budowlanego do powtórnego użycia (Łapko i Grygo, 2011). W Stanach Zjednoczonych i Niemczech na rynku również dostępne jest kruszywo wtórne, jako produkt handlowy pod nazwą Recycled Coarse Aggregate – RCA (Kijowski, 2006).

Z pewnością brak zaufania polskich inżynierów co do możliwości wykorzystania destruktu betonowego w budownictwie wynika z legislacji prawnej, ekonomii, a także z niewiedzy dotyczącej charakterystyk opisujących zdolność do kruszenia (Sybilski, 2010).

Kruszenie się tego typu materiału jest niezwykle istotne, bowiem wpływa na właściwości mieszanki gruntowej, a przy tym na późniejsze zachowanie się gruntu czy nawierzchni pod wpływem działającego obciążenia. Maszyny kruszące oferowane obecnie na rynku odznaczają się bardzo dużą elastycznością pod względem ich zastosowania i przeznaczenia, konstrukcji maszyny, a także obsługi. Proces rozdrabniania jest jednak złożony i zależy od wielu czynników, między innymi od rozmiaru oraz formy rozdrabnianych ziaren, wzajemnego ich ułożenia w komorze kruszącej maszyny, parametrów technologicznych kruszarki, ukształtowania przestrzeni roboczej i organów roboczych (np. kształtu stożków, młotków, bijaków, powierzchni roboczych płyt kruszących itd.), fizyko-chemicznych właściwości materiału oraz prędkości przemieszczania się ziaren itd. (Naziemiec i Gawenda, 2006). Gabaryty kruszarek mają również duży

wpływ na proces kruszenia, ponieważ w dużych maszynach pękają bryły o znacznych wymiarach, zaś oddziaływania między tymi bryłami nie mają wielkiego wpływu na siły oraz energię kruszenia. W kruszarkach średnich i małych oddziaływania między mniejszymi ziarnami kruszonymi mają znaczny wpływ na te wielkości, szczególnie w dolnych strefach przestrzeni roboczej, gdzie zachodzi zagęszczanie ośrodka (Zawada, 1998).

W technologii przeróbki gruzu betonowego wykorzystuje się przede wszystkim kruszarki szczękowe, udarowe, walcowe, rzadziej stożkowe (Eloranta, 2006). Produkt końcowy z kruszarki szczękowej różni się od produktu z kruszarki udarowej czy walcowej. Przede wszystkim kruszarki szczękowe są używane do wstępnego i wtórnego kruszenia materiałów o małej oraz średniej podatności na rozdrabnianie, a w uziarnieniu takiej mieszanki dominują frakcje większe, co obniża jej jakość z powodu znacznej ilości materiału o wydłużonych kształtach (Płachta, 2012). Maksymalna wielkość ziarna wlotowego wynosi od około 10 do 1500 mm, zaś ziarna produktu do 500 mm (Gawenda, 2010). Z kolei powszechnie stosowane w technologii przeróbki gruzu betonowego kruszarki udarowe są bardziej uniwersalne i stosowane do kruszenia nawet najtwardszych skał. Materiał o bardzo dużej abrazyjności nie powinien być w nich rozdrabniany ze względu na duży koszt (Płachta, 2012). Maksymalna wielkość ziarna wlotowego kruszarki listwowej udarowej wynosi w przybliżeniu od 5 do 1700 mm. Z kolei do średniego i drobnego kruszenia, a także mielenia materiałów średniej oraz małej twardo-

ści wykorzystywane są kruszarki walcowe (Gawenda, 2010).

Należy podkreślić, że oprócz odpowiedniego składu ziarnowego, bardzo często zwraca się uwagę na kształt ziaren produktów kruszenia, który jest jedną z najważniejszych cech wpływających na zachowanie podłoża gruntowego (Masad, 2001; Gawenda, 2010). W badaniach wpływu typów maszyn rozdrabniających na skład ziarnowy oraz kształt ziaren został ustalony ich bezpośredni związek, dzięki czemu możliwe jest wyprodukowanie materiałów wyjściowych o wymaganym uziarnieniu (Beckmann, 2003).

Sposób określenia kształtu ziarna jako produktu kruszenia jest skomplikowany, a wyniki badań trudne do zwerifikowania, zważając na subiektywizm oceny. Co więcej materiały drobno uziarnione zawierają ziarna o zróżnicowanej geometrii. Na przestrzeni lat opracowano wiele różnych definicji parametrów kształtu, na przykład kulistość, kancistość, mikrostruktura powierzchni (Barrett, 1980). Oparte są one na metodach analitycznych pozwalających na uzyskanie stosunkowo dokładnych wyników pomiarów, jednak są one czaso- i pracochłonne (Szerakowska, 2014). Przykładowo Wadell w 1935 roku (Less, 1964; Barrett, 1980) określił, iż parametr kulistości można obliczyć jako iloraz średnicy koła równego powierzchni rzutu ziarna i średnicy koła opisanego na rzucie ziarna. Z kolei metody opisowe czy też wizualne są nieprecyzyjne, bowiem zależą od wrażenia osoby opisującej, która może przyjmować ziarno za płaskie, kostkowe, słupkowe itp. Można też porównywać ziarno do kuli, prostopadłościanu czy innej bryły geometrycznej

albo kształt ziarna określać mianem dyskoidalnego, kulistego, elipsoidalnego, wrzecionowatego lub cylindrycznego. Zingg w 1935 roku wydzielił cztery rodzaje kształtów ziaren na podstawie długości trzech osi ziarna: a – osi długiej, b – osi średniej, c – osi krótkiej – tabela 1 (Less, 1964; Abedinzadeh i Abedinzadeh, 1991; Szerakowska, 2014).

Z kolei wzorzec wizualnej oceny ziaren, z uwzględnieniem kulistości oraz kancistości według Powersa z 1953 roku, wskazuje, że ziarna możemy określić jako bardzo ostrokrawędziste, ostrokrawędziste, słabo ostrokrawędziste, słabo obtoczone, obtoczone, dobrze obtoczone o niskiej, średniej oraz wysokiej sferyczności (Alshibli i Alsaleh, 2004; Szerakowska, 2014).

W artykule określono kształt ziaren zgodnie z klasyfikacją podaną przez Zingga dla wybranych losowo 10 ziaren, a także przedstawiono wyniki następujących badań: kruszenia, Kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR), zmian wskaźnika jednorodności uziarnienia ( $C_U$ ) i wskaźnika krzywizny ( $C_C$ ) oraz sufozji.

TABELA 1. Klasyfikacja kształtu ziarna według Zingga (Abedinzadeh i Abedinzadeh, 1991)

TABLE 1. Classification of grain shape in according to Zingg (Abedinzadeh and Abedinzadeh, 1991)

Stosunek długości osi ziarna a, b, c/Ratio of the grain axis length a, b, c		Kształt/Shape
b : a	c : b	
>0,67	>0,67	kula/sphere
<0,67	>0,67	walec/cylinder
>0,67	<0,67	dysk/disk
<0,67	<0,67	klinga/blade

## Material i metody badań

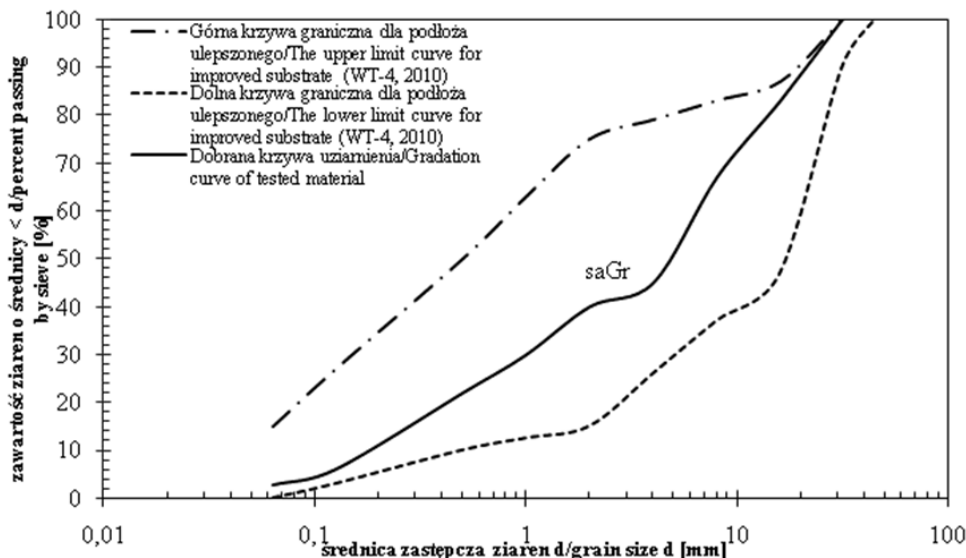
Badania przeprowadzono na destrukcie betonowym, który został pozyskany ze zniszczonych betonowych próbek sześciennych o wymiarach  $0,15 \times 0,15 \times 0,15$  m, pokruszonych do frakcji 0–31,5 mm metodą udarową. Podczas ściskania próbek w maszynie wytrzymałościowej najmniejsza odczytana wartość wytrzymałości na ściskanie wynosiła 12,8 MPa, największa 58,7 MPa, a średnia wartość wynosiła około 33,0 MPa. Otrzymany w wyniku kruszenia destruktu betonowy o wilgotności 3,8%, wolny od zanieczyszczeń typowych dla materiału rozbiórkowego – stali, drewna, plastiku, został rozdzielony na frakcje przy użyciu mechanicznej wstrząsarki z sitami o średnicach zastępczych oczek kwadratowych: 0,063; 0,125; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16; 31,5 mm (PN-EN 932-2:2001). Z przygotowanego materiału została utworzona mieszanka według krzywej

uziarnienia przedstawionej na rysunku 1, która spełnia wymogi stawiane kruszywom do nawierzchni niezwiązanych (0/31,5) (WT-4 2010).

Podatność na kruszenie zbadano metodą udarową (metoda Proctora) według PN-EN 13286-2:2010. Po każdym zagęszczeniu gruntu w cylindrze energią  $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ , czyli metodą Ia (mały cylinder, masa ubijaka 2,5 kg), wykonano przesianie wysuszonego destruktu betonowego, zważenie poszczególnych frakcji i porównanie do pierwotnie określonej krzywej uziarnienia. Czynności powtórzono dla trzech próbek.

Znając średnice cząstek materiału  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ , wyznaczono wskaźniki charakteryzujące uziarnienie gruntu, tj. wskaźnik jednorodności i wskaźnik krzywizny uziarnienia przed kruszeniem i po kruszeniu, określając ich zmiany:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [-] \quad (1)$$



RYSUNEK 1. Krzywa uziarnienia dobranej mieszanki poddanej badaniu  
FIGURE 1. Gradation curve of tested material

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{(d_{10} \times d_{60})} \quad [-] \quad (2)$$

Z kolei wskaźnik nośności –  $w_{noś}$  (znany w literaturze jako Kalifornijski wskaźnik nośności – CBR) określono ze wzoru (PN-S-02205:1998):

$$w_{noś} = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

gdzie:

$p$  – obciążenie jednostkowe, które należy zastosować, aby trzpień o kształcie wydłużonego walca o powierzchni przekroju  $20 \text{ cm}^2$  (średnica  $d = 5 \text{ cm}$ ) wcisnąć w odpowiednio przygotowaną próbkę gruntu do określonej głębokości 2,5 lub 5,0 mm, z jednostajną prędkością równą  $1,25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,

$p_s$  – ciśnienie porównawcze, które podczas zagłębienia trzpienia na 2,5 mm wynosi 7 MPa, a przy zagłębieniu na 5,0 mm wynosi 10 MPa.

Ciśnienie potrzebne do zagłębienia trzpienia obliczono ze wzoru:

$$p = \frac{F_s}{A} \quad [\text{kPa}] \quad (4)$$

gdzie:

$F_s$  – siła, z jaką należy wcisnąć trzpień w odpowiednio przygotowaną próbkę gruntu do określonej głębokości (2,5 lub 5,0 mm) [kN],

$A$  – pole przekroju trzpienia wynoszące  $0,002 \text{ m}^2$ .

Przed przeprowadzeniem badań CBR według PN-EN 13286-47:2012, zgodnie z wytycznymi projektowania WT-4 przygotowane próbki należało pięciokrotnie

zageścić do wskaźnika zagęszczenia  $I_s = 1$  przy użyciu normalnej energii zagęszczania według PN-EN 13286-2:2010 w cylindrze o wysokości  $h = 178 \text{ mm}$  i średnicy  $d = 150 \text{ mm}$ . Energia zagęszczania wynosiła  $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ , zaś objętość próbki  $3145,5 \text{ cm}^3$ . Zagęszczania dokonano poprzez ubijanie każdej z warstw po 47 uderzeń. Przed badaniem CBR próbki przechowywano 96 h w wodzie. Następnie na próbki umieszczone w prasie Marshalla zakładano trzy pierścienie o masie 4,5 kg symulujące warstwy konstrukcyjne nad badanym materiałem w czasie badania. Z maszyny badawczej odczytywano siłę nacisku trzpienia na próbkę podczas jego zagłębienia w odstępach co 0,25 mm. Badania CBR przeprowadzono na próbkach o trzech wilgotnościach 3,8, 8 oraz 9,8% do momentu, gdy zagłębienie osiągało 7,5 mm lub, gdy przez dłuższy czas zagłębienie nie postępowało, a siła osiągała 10–12 kN. Przy wilgotności 3,8 i 9,8% wykonano pięć powtórzeń badania CBR. Po badaniu wysypano grunt i czynność powtórzono dla nowego materiału, przygotowując kolejną próbkę.

Określono także podatność na sufozję zgodnie z wytycznymi opracowanymi przez Kenney i Lau (1985), korzystając z wykresu zależności  $F(D)$  od  $H = F(4D) - F(D)$ , gdzie  $F(D)$  stanowi odsetek ziaren przechodzących przez sito o średnicy oczek  $D$ , zaś  $H$  to masa ziaren o wartości średnicy zawartej między  $D$  i  $4D$ . Do określenia kształtu wybranych losowo 10 ziaren gruntu zastosowano klasyfikację według Zingga.

## Analiza krzywej uziarnienia

Wskaźnik jednorodności uziarnienia ( $C_U$ ) oraz wskaźnik krzywizny ( $C_C$ ) określono na podstawie krzywej uziarnienia w trzech przypadkach, tj. dla materiału wyjściowego, materiału o wilgotności  $w = 3,8\%$ , a także dla mieszanki o wilgotności większej od optymalnej, czyli  $w = 9,8\%$ , co ukazuje tabela 2.

TABELA 2. Zmiana wskaźnika jednorodności uziarnienia –  $C_U$  i wskaźnika krzywizny –  $C_C$   
TABLE 2. Change of coefficient of uniformity –  $C_U$  and coefficient of curvature –  $C_C$

Wyszczególnienie Specification	$C_U$ [-]	$C_C$ [-]
Materiał wyjściowy Base material	34,21	0,81
Materiał o wilgotności naturalnej/Natural moisture conditions material	26,66	0,41
Materiał o wilgotności bliskiej optymalnej/Optimal moisture conditions material	26,00	0,62

Znajomość wskaźników uziarnienia jest istotna przy ocenie przydatności gruntu do wznoszenia nasypów ze względu na łatwość zagęszczenia. Odpowiednie pod tym względem są grunty dobrze uziarnione, a więc takie, dla których  $C_C = 1 - 3$ , zaś  $C_U > 4$  (dla żwirów) lub  $C_U > 6$  (dla piasków) (Pisarczyk, 2010). Jak wynika z tabeli 2, wskaźnik różnoziarnistości był najniższy dla mieszanki o wilgotności optymalnej i wynosił 26. Wskaźnik krzywizny był najniższy, czyli równy 0,41, dla próbki destruktu betonowego o wilgotności naturalnej. Zarówno w przypadku materiału o wilgotności naturalnej, jak i wilgotności optymalnej, wskaźnik krzywizny przyjmował wartości poniżej 1. Wskaźnik jednorodności

uziarnienia natomiast nie różnił się znacząco między materiałami pokruszonymi i o różnych wilgotnościach. Zauważono także spadek wartości wskaźnika różnoziarnistości. Po pokruszeniu wskaźnik krzywizny rósł wraz ze wzrostem wilgotności badanego gruntu. Stwierdzono, że dobrany grunt jest różnoziarnisty, a po badaniach – bardzo różnoziarnisty.

Podatność na kruszenie ziaren określono dla mieszanki gruntowej o wilgotności naturalnej oraz wilgotności bliskiej optymalnej po pięciokrotnym zagęszczeniu (tab. 3). Uzyskane krzywe uziarnienia przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

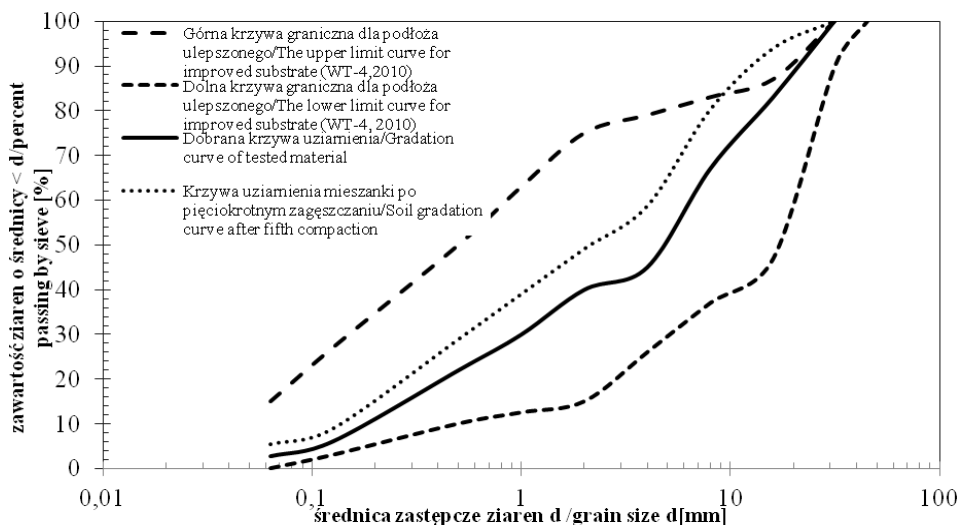
Jak wynika z tabeli 3 oraz rysunków 2 i 3, po pięciokrotnym zagęszczeniu ubijakiem Proctora widoczna jest zmiana uziarnienia. Przy materiale o wilgotności naturalnej kruszą się frakcje większe od 4 mm, co wpływa na zwiększenie ilości frakcji drobnej oraz pyłowej. Z kolei w przypadku materiału o wilgotności większej od optymalnej, zmiana w zawartości frakcji większych od 4 mm jest mniejsza niż w przypadku materiału o mniejszej wilgotności. Można wyciągnąć wniosek, że materiał o większej wilgotności jest mniej podatny na kruszenie. Widoczne są jednak ubytki frakcji pyłowej. Może powodować to cementacja cząstek frakcji pyłowej. Należy zauważyć, że różnice procentowej zawartości każdej frakcji przed zagęszczeniem i po pięciokrotnym zagęszczeniu tej samej próbki o  $w = 9,8\%$  nie przekraczają 8%, co klasyfikowałoby ów materiał jako kruszywo słabe według WT-4.

Materiał wyjściowy, który miał wysoki wskaźnik jednorodności uziarnienia oraz wskaźnik krzywizny zbliżonym do jedności, charakteryzował wielofrakcyjność gruntu. Po pięciu etapach kruszenia,

TABELA 3. Zmiana uziarnienia mieszanki gruntowej o wilgotności  $w = 3,8\%$  oraz większej od optymalnej  $w = 9,8\%$  po pięciokrotnym zagęszczeniu

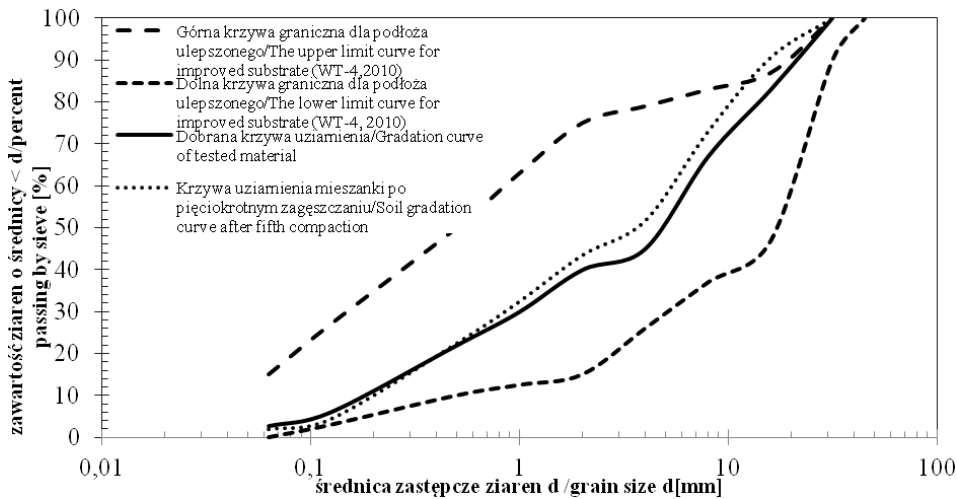
TABLE 3. Change of soil gradation in natural moisture conditions  $w = 3.8\%$  and moisture conditions  $w = 9.8\%$  after fifth compaction process

Sito/Sieve [ $\mu\text{m}$ ]	Uziarnienie/Gradation [%]				
	wyjściowe/ /base	po pięciokrotnym zagęszczeniu dla mieszanki o wilgot- ności $w = 3,8\%$ /after fifth compaction process for natural moisture content material $w = 3.8\%$	zmiana/ /change	po pięciokrotnym zagęszczeniu dla mieszanki o wilgotności $w = 9,8\%$ /after fifth compaction process for moisture content material $w = 9.8\%$	zmiana/ /change
16–31,5	17,00	6,09	-10,91	9,34	-7,66
8–16	16,00	13,68	-2,32	17,69	1,69
4–8	22,00	21,52	-0,48	21,29	-0,71
2–4	5,00	9,55	4,55	8,22	3,22
1–2	10,00	10,09	0,09	11,03	1,03
0,5–1	8,00	10,09	2,09	9,98	1,98
0,125–0,5	15,91	19,99	4,08	18,05	2,13
0,063–0,125	3,29	3,46	0,17	2,42	-0,87
< 0,063	2,80	5,53	2,73	1,98	-0,82



RYSunEK 2. Zmiana krzywej uziarnienia mieszanki o wilgotności naturalnej poddanej pięciokrotnemu zagęszczeniu

FIGURE 2. Change of soil gradation curve for natural moisture content soil after fifth compaction



RYSUNEK 3. Zmiana krzywej uziarnienia mieszanki o wilgotności większej od optymalnej poddanej pięciokrotnemu zagęszczeniu  
 FIGURE 3. Change of soil gradation curve for optimal moisture content soil after fifth compaction

grunt stał się źle uziarniony, jednak charakterystyczna jest też zmiana w kierunku kilkufrakcyjności gruntu spowodowana spadkiem zawartości frakcji grubej (16–31,5) mm. W obu przypadkach, tj. dla wilgotności naturalnej i większej od optymalnej, zauważono kilku procentowy przyrost frakcji 2–4 oraz 0,125–0,5 mm. Przyrost ten może być rozumiany jako efekt kruszenia się frakcji większych niż 4 do 2–4 mm oraz frakcji z zakresu od 2–0,5 do 0,125–0,5 mm. Przy doborze krzywej uziarnienia mieszanki należy dlatego unikać dużej zawartości frakcji ziaren podatnych na kruszenie.

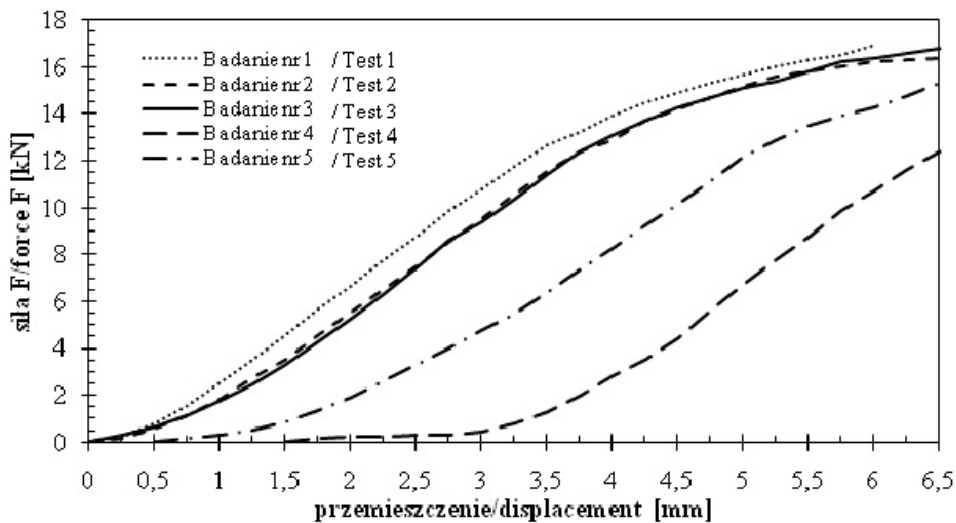
### Badania wskaźnika nośności CBR

W przypadku materiału o wilgotności naturalnej zauważono spadek nośności destruktu wraz z kolejnymi kruszeniami (rys. 4). Sytuację odwrotną zaobserwowano dla materiału o wilgotności 9,8%, zatem większej niż wilgotność optymalna równa 8% (rys. 5). Destrukt betono-

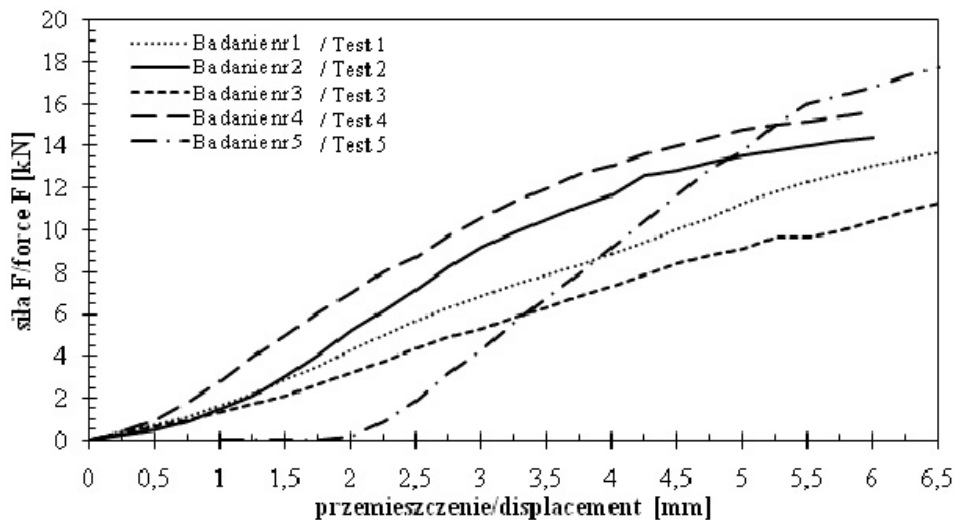
wy jako materiał pochodzący z rozbiórki budynków charakteryzuje się obecnością frakcji drobnej, która może mieć właściwości cementujące. Ta cecha sprawia trudności w analizie wyników badań CBR ze względu na możliwy brak powtarzalności. Dodatkowym problemem był, ze względu na początkowe kruszenie, kontakt tłoka z próbką, w niektórych przypadkach właściwy pomiar nośności CBR został rozpoczęty po 2 mm penetracji tłoka. Luźne ziarna na powierzchni próbki nie zagęszczały się wraz z pogłębieniem trzpienia, lecz ulegały procesowi kruszenia. Ze względu na ten fakt dokonano korekty wykresów.

Uzyskane wskaźniki nośności (tab. 4) zarówno dla materiału o wilgotności  $w = 3,8\%$ , jak i  $w = 9,8\%$  kilkukrotnie przewyższają wartości wymaganego wskaźnika CBR gruntów naturalnych dla podłoża budowlanego, który powinien wynosić 70% według WT-4. Niemniej jednak analizując wyniki przedsta-





RYSUNEK 4. Przebieg badań CBR przy wilgotności naturalnej 3,8%  
 FIGURE 4. Results of CBR tests for natural moisture content 3.8%



RYSUNEK 5. Przebieg badań CBR przy wilgotności 9,8%  
 FIGURE 5. Results of CBR tests for optimal moisture content 9.8%

wione w tabeli 4, można zauważyć duże rozbieżności. Wskaźnik  $CBR_{2,5}$  waha się od 38,31 do 94,27%, zaś wskaźnik  $CBR_{5,0}$  od 80,64 do 147,58%. Badanie CBR może być zatem niewłaściwe ze względu na kruszenie się materiału, co

budzi zastrzeżenia w związku z wytrzymałością materiału. Autorzy sugerują w przypadku destruktu betonowego przeprowadzać badania CBR do 7,5 i 10 mm w celu eliminacji błędów pomiarowych.

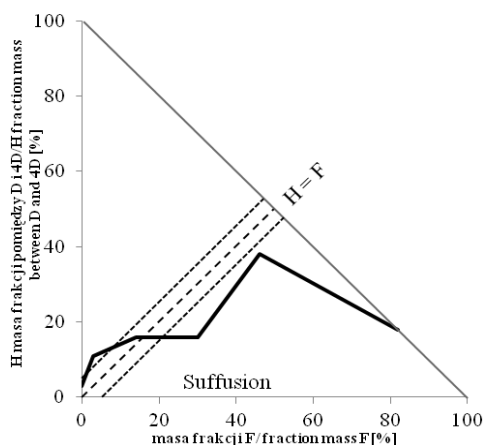
TABELA 4. Wartości Kalifornijskiego wskaźnika nośności – CBR  
 TABLE 4. CBR ratio results

Numer badania Number of test	Wilgotność/Moisture 3,8%		Wilgotność/Moisture 9,8%	
	Przemieszczenie/Displacement		Przemieszczenie/Displacement	
	2,5 mm	5,0 mm	2,5 mm	5,0 mm
	CBR [%]		CBR [%]	
1	79,51	129,03	50,81	95,16
2	77,01	127,42	85,00	112,90
3	75,48	127,42	42,66	80,64
4	70,72	120,16	78,63	120,96
5	38,31	108,87	94,27	147,58

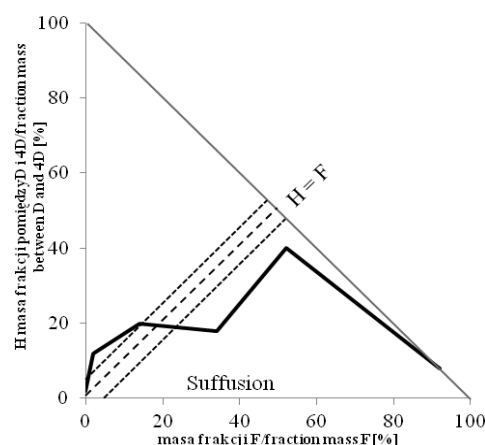
### Analiza stabilności wewnętrzne szkieletu gruntowego

Wykorzystując dane otrzymane z analizy sitowej, materiał został przeanalizowany pod kątem możliwego zjawiska sufozji. Wykorzystano w tym celu metodę określającą wewnętrzną stabilność gruntów według Kenneya i Lau (1985). Polega ona na naniesieniu punk-

tów wyznaczonych z krzywej uziarnienia na wykres określający masy frakcji oznaczone wartościami F oraz H, gdzie  $H = F(4D) - F(D)$ , przy czym  $F(D)$  stanowi odsetek ziaren przechodzących przez sito o średnicy oczek D, zaś H to masa ziaren o wartości średnicy zawartej między D i 4D. Wyniki analizy przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



RYSUNEK 6. Wykres określający wewnętrzną stabilność gruntów według Kenneya i Lau (1985) dla krzywej uziarnienia mieszanki o wilgotności naturalnej poddanej pięciokrotnemu zagęszczeniu  
 FIGURE 6. Plot of internal stability of soil due to Kenney and Lau (1985) for gradation curve in natural moisture content after fifth compaction



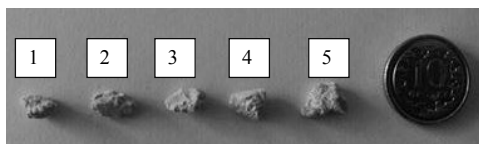
RYSUNEK 7. Wykres określający wewnętrzną stabilność gruntów według Kenneya i Lau (1985) dla krzywej uziarnienia mieszanki o wilgotności optymalnej poddanej pięciokrotnemu zagęszczeniu  
 FIGURE 7. Plot of internal stability of soil due to Kenney and Lau (1985) for gradation curve in optimal moisture content after fifth compaction

Na podstawie rysunku 6 stwierdzono, że grunt jest wewnętrznie niestabilny, bowiem wykres znajduje się głównie poniżej linii wychodzącej z początku układu współrzędnych pod kątem  $45^\circ$ , wykreślającej pas rozgraniczający grunty wewnętrznie stabilne od niestabilnych.

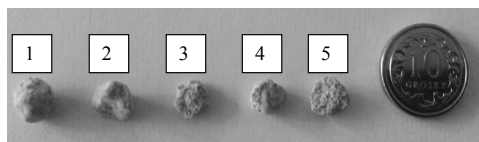
Tę samą analizę przeprowadzono dla destruktu betonowego poddanego pięciokrotnemu kruszeniu. Stabilność gruntu nie zmieniła się, materiał nadal podatny jest na sufozję (rys. 7). Zauważono jednak tendencję wzrostu stabilności części drobnych gruntu w wyniku procesu kruszenia. Niemniej jednak autorzy zalecają kontrolowanie stabilności wewnętrznej jako element kontroli jakości gruntów podatnych na kruszenie, których nie zawiera WT-4.

### Analiza kształtu ziarna

Na podstawie losowo wybranych 10 ziaren określono kształt ziaren przed kruszeniem i po kruszeniu (rys. 8 i 9). Ziarna wybrano spośród frakcji stanowiącej 50% masy próbki, czyli frakcji 4–8 mm.



RYSUNEK 8. Losowo wybrane ziarna przed kruszeniem metodą uderową  
FIGURE 8. Randomly chosen grains before crushing process by impact method



RYSUNEK 9. Losowo wybrane ziarna po procesie kruszenia metodą uderową  
FIGURE 9. Randomly chosen grains after crushing process by impact method

Jak wynika z tabeli 5, ziarna przed kruszeniem przyjmują zróżnicowany kształt – klingi, dysku czy walca. Po procesie kruszenia kształt ziarna jest ujednolicony i sprowadza się do kształtu kuli zgodnie z klasyfikacją Zingga, co przedstawiono w tabeli 6. Zmiana kształtu ziarna spowodowana jest kruszeniem się ziaren. Przyjęcie kształtu kulistego jest wynikiem właśnie tego procesu. Wskutek kruszenia się nastąpić może zmniejszenie się wytrzymałości mechanicznej ze względu na utratę właściwości kruszywa w postaci szorstkości oraz zwiększenie się udziału frakcji drobnych.

### Wnioski

W artykule przedstawiono wiele badań, których celem była charakterystyka procesu kruszenia się dla kruszywa słabego pochodzenia antropogenicznego, jakim jest destruktu betonowy. Wnioski na podstawie badań i analiz są następujące:

1. Proces kruszenia zaobserwowano w trakcie przeprowadzania badań zagęszczania destruktu betonowego przy różnej wilgotności materiału.
2. Najbardziej podatne na kruszenie materiału są frakcje grube, które kruszą się, zwiększając zawartość frakcji 2–4 mm oraz frakcje piaskowe, które kruszą się do frakcji 0,125–0,5 mm.
3. Zaobserwowano zmianę wskaźnika krzywizny i jednorodności uziarnienia w wyniku kruszenia się materiału, zmiana ta była mniejsza dla materiału o wilgotności naturalnej (3,8%) niż dla materiału o wilgotności 9,8%. Grunt ma tendencję do stawania się mniej różnoziarnisty.

TABELA 5. Kształt ziarna przed kruszeniem metodą udarową według klasyfikacji Zingga  
TABLE5. Grain shape before crushing by impact method due to Zingg classification

Numer ziarna Number of the grain	Stosunek długości osi ziarna a, b, c Ratio of the grain axis length a, b, c		Kształt/Shape
	b : a	c : b	
1	0,70	0,50	dysk/disk
2	0,50	0,45	klinga/blade
3	0,50	0,60	klinga/blade
4	0,65	0,70	walec/cylinder
5	0,70	0,55	dysk/disk

TABELA 6. Kształt ziarna po kruszeniu metodą udarową według klasyfikacji Zingga  
TABLE 6. Grain shape after crushing by impact method due to Zingg classification

Numer ziarna Number of the grain	Stosunek długości osi ziarna a, b, c Ratio of the grain axis length a, b, c		Kształt/Shape
	b : a	c : b	
1	1,00	1,00	kula/sphere
2	0,90	1,00	kula/sphere
3	1,00	0,95	kula/sphere
4	1,00	0,95	kula/sphere
5	1,00	1,00	kula/sphere

- Badania CBR przeprowadzone dla destruktu w trakcie kolejnych procesów kruszenia wykazały, że pomimo podatności na kruszenie, ma on niewątpliwie dużą nośność CBR. Wartości nośności osiągały ponad 140%, co spełnia wymogi zawarte w WT-4.
- Analiza sufozji dowodzi, iż kruszenie się destruktu może zmieniać stabilność wewnętrzną gruntu. Badanie takiego materiału powinno być przeprowadzone przed wbudowaniem materiału w konstrukcję przy doborze krzywej uziarnienia.
- Analiza kształtu ziaren wykazała tendencję do kruszenia się ziaren o nieregularnych kształtach (dysk, klinga, walec) i uzyskiwania wskutek kruszenia się charakterystycznych dla gruntów naturalnych, np. pochodzenia rzeczno, kształtów kuli.
- Destrukt betonowy może być wykorzystywany jako podbudowa nawierzchni drogowych po wcześniejszym jego badaniu.

## Literatura

- Abedinzadeh, Y. i Abedinzadeh, R. (1991). Quantification of particle shape and angularity using the image analyzer. *Geotechnical Testing Journal*, 14(3), 269-308.
- Ajdukiewicz, A. i Kliszczewicz, A. (2009). Recykling betonu konstrukcyjnego. *Inżynier Budownictwa*, 2, 65-69.
- Alshibli, K.A. i Alsaleh, M.I. (2004). Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), 36-45.

- Barrett, P.J. (1980). The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology*, 27(3), 291-303.
- Beckmann, G. (2003). Auswahl von Brechertypen und Rohmaterialien zur Erzielung einer bestimmten Kornform-bzw. Korngrößenverteilung mit Hilfe der „Digitalen Bildverarbeitung“. *Brechen und Sieben in der Mineralrohstoffindustrie – Fachseminar*. Bergmännischer Verband Österreichs, Technisch – Wissenschaftlicher Verein, Leoben.
- Eloranta, J. (2006). Sposoby wpływania na jakość kruszyw. Prezentacja badań firmy Metso Minerals na nośniku CD. *VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość”*, OWPW, Wrocław – Szklarska Poręba.
- Etcheberria, M., Mari, A.R., i Vazquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40, 529-541.
- Falaciński, P. i Pisarczyk, S. (2003). Badania właściwości geotechnicznych wybranych odpadów budowlanych. *IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Gospodarka Odpadami Komunalnymi*, Kołobrzeg, Kopenhaga-Oslo.
- Gawenda, T. (2010). Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34(4), 195-209.
- Kenney, T.C., i Lau, D. (1985). Internal Stability of Granular Filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 215-225.
- Kijowski, G. (2006). Kruszywo z betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura* 2(34), 46-47.
- Less, G. (1964). New method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*, 3(1), 2-21.
- Łapko, A. i Grygo, R. (2011). Beton z recyklingu jako wartościowy materiał na konstrukcje żelbetowe. *Ekologia i Technika*, 3, 139-144.
- Masad, E. (2001). Review of imaging techniques for characterizing the shape of aggregates used in asphalt mixes. *International Center for Aggregates Research 9<sup>th</sup> Annual Symposium (ICAR)*, Austin, Texas.
- Naziemiec, Z. i Gawenda, T. (2006). Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje*, 115(46), 83-94.
- Pisarczyk, S. (2010). *Mechanika gruntów*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Pisarczyk, S., Falaciński, P. i Żuraw, L. (2003). Wykorzystanie odpadów budowlanych w inżynierskich konstrukcjach ziemnych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska*, 45, 5-25.
- Płachta, M. (2012). Zastosowanie kruszszeków i udarowych. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, 2, 50-52.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania.
- PN-EN 932-2:2001. Badania podstawowych właściwości kruszyw – Metody pomniejszania próbek laboratoryjnych.
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 13286-2:2010. Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora.
- PN-EN 13286-47:2012. Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 47: Metoda badania do określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego.
- Sas, W., Szymański, A., Malinowska, E. i Gabryś, K. (2012). Geotechniczne uwarunkowania zastosowania materiałów antropogenicznych w budownictwie. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4, 376-380.
- Sybilski, D. (2010). Materiały miejscowe, alternatywne i recykling. *I Międzynarodowa Konferencja „Zastosowanie destruktu asfaltowego”*, Ożarów Mazowiecki.
- Szerakowska, S. (2014). Metody określania kształtu ziaren. W J. Bzówka (red.), *Wiedza i eksperymenty w budownictwie*. (strony 208-213). Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Tam, V.W.Y. i Tam, C.M. (2007). Economic comparison of recycling over – ordered fresh concrete: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 208-218.
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 roku o wyrobach budowlanych (Dz.U. 2004 nr 92, poz. 881).

- Wilczek, J. i Wileński, P. (2001). Możliwości i warunki wykorzystania gruzu betonowego do podbudów drogowych. *VII Międzynarodowa Konferencja „Trwale i bezpieczne nawierzchnie drogowe”* IBDiM, Kielce.
- Wiłun, Z. (1982). *Zarys geotechniki*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- WT-4. Wymagania techniczne nr 4. Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych (2010). *Załącznik nr 3 do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19.11.2010 r. w sprawie stosowania wymagań technicznych na drogach krajowych*, Warszawa.
- Xiao, J.Z., Li, J.B. i Lan, Y. (2003). Research on recycled aggregate concrete – a review. *Concrete*, 10, 17-20.
- Zawada, J. (1998). *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*. Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji.
- Zieliński, K. (2003). Możliwości zastosowania gruzu betonowego do produkcji betonów cementowych. *Recykling*, 27, 10-11.

## Streszczenie

**Wpływ podatności destruktu betonowego na kruszenie oraz zmiany jego właściwości fizycznych i mechanicznych.** W artykule przedstawiono zagadnienie problemu kruszenia się materiału antropogenicznego pochodzenia – destruktu betonowego. Celem pracy było scharakteryzowanie zjawiska kruszenia, którego skutki z punktu widzenia inżynierskiego zastosowania budzą wątpliwości. Wykonano wiele badań, które opisują badany materiał pod względem fizycznym, i wyznaczono charakterystyki wytrzymałościowe. W tym zakresie zostały przeprowadzone badania krzywej uziarnienia przed kruszeniem i po kruszeniu, a także towarzyszące im badania wskaźnika nośno-

ści CBR. Dodatkowo przedstawiono wyniki analizy sufozyjności materiału i kształtu ziaren. Przedstawione wyniki badań i analiz posłużyły do sformułowania wniosków dotyczących wytrzymałości, stabilności wewnętrznej oraz kształtu ziaren w związku z podatnością na kruszenie się destruktu betonowego, a także możliwości wykorzystania tego materiału w podbudowie nawierzchni drogowych.

## Summary

**Impact of crushing vulnerability on recycled concrete aggregate physical and mechanical properties.** In this paper the crushing vulnerability of anthropogenic material – recycled concrete aggregate was presented. The main idea was to characterise phenomena of crushing the effects of which from practical engineers point of view which clearly nowadays could be questionable. Conducted research describing physical properties of tested material and strength characteristics determined. Among the test methods, gradation curve, and CBR bearing capacity was conducted. Additionally the results of tests was utilized to analyse strength, suffosion and grain shape of RCA and lastly to form some conclusions and possibility of using this material in roadbase.

### Authors' address:

Wojciech Sas  
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
 Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
 Laboratorium – Centrum Wodne  
 ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
 Poland  
 e-mail: wojciech\_sas@sggw.pl