

# **Wtórne wiązanie kruszywa z recyklingu betonu na przykładzie badań materiału i warstw podbudowy konstrukcji nawierzchni drogowej**

**Jakub Fengier<sup>1</sup>, Andrzej Pożarycki<sup>2</sup>**

*<sup>1,2</sup> Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika  
Poznańska, e-mail: <sup>1</sup>[jakub.fengier@put.poznan.pl](mailto:jakub.fengier@put.poznan.pl), <sup>2</sup>[andrzej.pozarycki@put.poznan.pl](mailto:andrzej.pozarycki@put.poznan.pl)*

**Streszczenie:** Praca stanowi próbę podsumowania doświadczeń związanych z rozpoznaniem praktycznych właściwości kruszyw z recyklingu betonu cementowego (KzRB). Opisano zjawisko wtórnego wiązania, które prześlędzono zarówno w warunkach badań laboratoryjnych jak i na przykładzie wartości wtórnego modułu odkształcenia warstwy podbudowy nawierzchni drogowej. Potwierdzony efekt wtórnej cementyzacji w warstwie kruszywa z recyklingu betonu przyczynił się wprawdzie do wzrostu wartości wtórnego modułu odkształcenia przez okres analizowanych 2 lat jednak stwierdzony przyrost jest niższy od wartości oczekiwanych w porównaniu do tych cytowanych w dostępnej literaturze.

**Słowa kluczowe:** kruszywo z recyklingu betonu, wtórne wiązanie, badania kruszyw gruboziarnistych, zmiana parametrów w czasie

## **1. Wprowadzenie**

Wiązanie cementu to proces polegający na hydratacji składników cementu oraz reakcji wtórnych zainicjowanych przez hydratację [5]. W trakcie wiązania cementu nie wszystkie cząstki cementu ulegają hydratacji, stąd KzRB w czasie ulega wtórnemu wiązaniu, które implikuje zmianę parametrów fizyko-mechanicznych warstwy podbudowy w czasie. W pracy, zjawisko to na przykładzie KzRB starano się odnotować zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i in situ. KzRB uzyskano w procesie recyklingu odpadów betonowych z rozebranych konstrukcji żelbetowych trzech frakcji: 0-5 mm, 5-31,5 mm oraz 31,5-63 mm. Receptę laboratoryjną mieszanki KzRB opracowano z uwzględnieniem krzywych granicznych uziarnienia 0-63 mm zgodnie z normą PN-S-06102: Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie, PKN, grudzień 1997. KzRB cechowało się również dużą nasiąkliwością (11%). W celu obniżenia nasiąkliwości w warunkach budowy zastosowano dodatek środków kationowych obniżających nasiąkliwość do 3%. Szczegóły dotyczące projektowanej mieszanki znaleźć można w pozycji [4]. W celu odnotowania zmiany parametrów fizyko-mechanicznych warstwy KzRB przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych oraz badań in situ, rozłożonych w czasie.

## **2. Przegląd literatury**

Recykling betonu to proces uzyskiwania pełnowartościowego produktu z odpadu jakim jest gruz betonowy. Technologie opisane w pracach [3,9] umożliwiają zastąpienie poszczególnych frakcji kruszywa mieszanek betonowych kruszywem z recyklingu betonu. Jednak procesy w tych technologiach są stosunkowo złożone przez co mało popularne.

Mniej skomplikowaną technologią recyklingu jest przekruszenie i sortowanie gruzu betonowego na odpowiednie frakcje. Zaprojektowana mieszanka z KzRB może być wykorzystana w drogownictwie do następujących celów: budowy nasypu, do podbudowy pomocniczej dla KR1-KR6, podbudowy zasadniczej dla ruchu KR1-KR2 [8]. W procesie zagęszczenia w warunkach laboratoryjnych potwierdziły się wnioski znikomego wpływu zagęszczenia na zmianę krzywej uziarnienia KzRB z pracy [6].

W pracy [7] wskazano, że odpowiedzialnymi za powstanie zjawiska wtórnej cementacji są frakcje 0,3 do 0,6 mm oraz  $< 0,15$  mm, a zjawisko nie wystąpi, gdy zawartość tych frakcji jest poniżej minimalnego progu.

Zjawisko wtórnego wiązania zostało przedstawione w pracy [2]. Wzrost wartości modułu sprężystości w badaniu trójosiowym wyniósł 150 MPa w okresie roku, niezależnie od wartości naprężenia osiowego. Zauważono również zwiększenie wartości modułu sprężystości identyfikowanego za pomocą obliczeń odwrotnych na podstawie wyników FWD. Wzrost ten był 4-ro krotny, a więc większy niż wzrost uzyskany w badaniach laboratoryjnych.

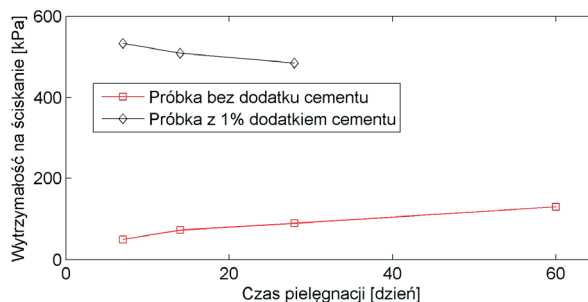
Autor pracy [1] przedstawił wyniki badań dla podbudowy z mieszanki złożonej z kruszywa z recyklingu betonu gruzu ceglanego i dodatku zmielonego żużla wielkopieczowego. Przyrost wartości modułu w przypadku badania trójosiowego ściskania był 6-cio krotny po 13 tygodniach. Badania FWD umożliwiły identyfikację wartości modułu sprężystości, która wykazała podobny przyrost wartości tej wielkości w okresie 68 tygodni.

### 3. Badania laboratoryjne

W celu określenia wpływu wtórnego wiązania KzRB w pracy wykorzystano trzy rodzaje badań: oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z KzRB, badania KzRB wzorowane na procedurze testów ściśliwości dla gruntów oraz badania VSS na powierzchni warstwy z KzRB.

#### 3.1. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie

Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie zostało przeprowadzone na próbkach z KzRB po odsianiu ziaren  $> 16$  mm. Próbki walcowe o wymiarach, średnicy  $d = 15,2$  cm oraz wysokości  $h = 17,9$  cm, zagęszczono przy wilgotności optymalnej. Uformowane próbki składały się z KzRB oraz z KzRB z dodatkiem cementu w ilości 1% (m/m). Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wykonywano po 7, 14, 28 i 60 dniach pielęgnacji, która polegała na kondycjonowaniu próbek w środowisku o stałej wilgotności. Wyniki analizy wytrzymałości próbek na ściskanie przedstawiono w postaci średniej arytmetycznej z trzech oznaczeń (Rysunek 1).



Rys. 1. Wyniki analizy oznaczenia wytrzymałości na ściskanie próbek z KzRB z dodatkiem i bez dodatku cementu

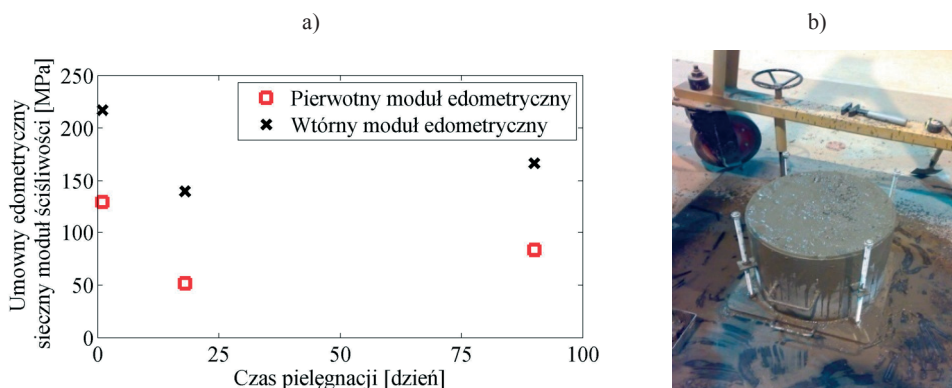
Przyrost wartości wytrzymałości na ściskanie próbek KzRB w czasie bez dodatku cementu świadczy o zjawisku wtórnego wiązania KzRB. Porównując wyniki oznaczonej wytrzymałości na ściskanie próbek bez dodatku cementu po 7 i 14 dniach dojrzewania oraz po 7 i 60 dniach dojrzewania można stwierdzić odpowiednio 40% i 200% wzrost wartości wytrzymałości na ściskanie. W przypadku dodania 1% (m/m) cementu wzrost wartości wytrzymałości nie wystąpił stąd przypuszczenie, że hydratacja dodanego cementu nastąpiła w ciągu pierwszych 7 dni pielęgnacji, co nie było przedmiotem analizy.

### 3.2. Badania wzorowane na procedurze oznaczenia edometrycznego modułu ściśliwości próbek gruntu

W pracy omówiono wyniki badań KzRB, które wzorowano na procedurze oznaczenia edometrycznego modułu ściśliwości próbek gruntu. Zostały przeprowadzone testy w cylindrze własnej konstrukcji na podobieństwo standardowego edometru do badań próbek gruntu zgodnie z normą PN-88/B-04881. Na potrzeby badań KzRB zaprojektowano i wykonano cylinder o średnicy  $d = 49,3$  cm i wysokości  $h = 40,2$  cm z możliwością odpływu wody u spodu cylindra (Rysunek 2b). Oznaczanie modułu ściśliwości dla mieszanek niezwiązanych o uziarnieniu 0 – 63 mm nie jest unormowane. Procedura badawcza, opracowana przez autorów pracy, składała się z:

- wymieszania KzRB z wodą w celu osiągnięcia wilgotności optymalnej,
- zagęszczenia próbki w cylindrze,
- obciążenia próbki za pomocą płyty stalowej dopasowanej średnicą do cylindra z kontrolą siły obciążającej.

Procedurę badań opracowano w oparciu o typowe zasady oznaczania parametrów pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia zgodnie z pracami [10,11]. Postępując zgodnie z procedurami oznaczania wartości  $Ev1$  i  $Ev2$  w metodzie VSS, wyznaczono wartość siecznego modułu, którą w dalszej części pracy nazywa się umowną wartością edometrycznego siecznego modułu ściśliwości. Procedurę badawczą powtarzano po 1, 18 oraz 90 dniach pielęgnacji KzRB. Wyniki analizy uzyskanych wartości zestawiono na rysunku 2a.



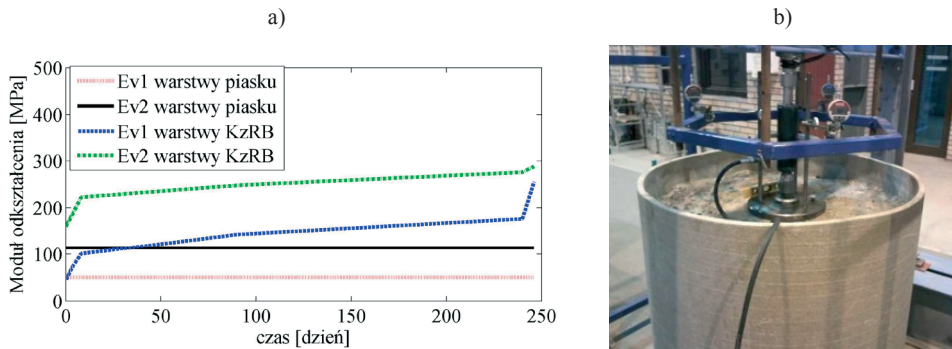
Rys. 2. Badania umownego modułu edometrycznego a) rezultaty testów b) widok próbki cylindrycznej o wymiarach  $d=49,3$ cm i  $h=40,2$ cm

Początkowa wartość umownego modułu edometrycznego (120 i 210 MPa) uzyskana tuż po uformowaniu próbki (w 1 dniu pielęgnacji) jest prawdopodobnie efektem obecności wody w porach kruszywa. Dodatkowo zagęszczony materiał w cylindrze, w ocenie makroskopowej przypominał warstwę nieprzepuszczalną. Te czynniki były podstawą

odrzućenia tych wartości z dalszej analizy. O wystąpieniu zjawiska wtórnego wiązania świadczy wzrost wartości modułu po 90 dniach w stosunku do wartości po 18 dniach pielęgnacji. W tym okresie czasu, wartość pierwotnego modułu edometrycznego ( $M_{E1}$ ) KzRB wzrosła o 62% natomiast wartość wtórnego modułu ( $M_{E2}$ ) o 19%.

### 3.3. Badania płytą sztywną VSS

Badaniem przeprowadzonym zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i w warunkach budowy było badanie płytą sztywną VSS. Stanowisko laboratoryjne zbudowano w oparciu o cylinder o średnicy 100 cm przedstawiony na rysunku 3b, wykonany wg koncepcji autorów. Model podłoża nawierzchni uzyskano za pomocą ułożenia na posadzce betonowej warstwy piasku średniego o grubości 60 cm. Na tej warstwie ułożona została warstwa KzRB o grubości 30 cm. Obie warstwy zagęszczone były przy wilgotności optymalnej. Badanie prowadzono zgodnie z procedurą opisaną w pracach [10,11]. Powierzchnię uformowanej tym sposobem warstwy KzRB wyrównano piaskiem drobnym w celu przeprowadzenia badań VSS. Wartości uzyskanych modułów odkształcenia oznaczono w dniu zagęszczenia oraz po 4, 8, 90, 240 i 246 dniach pielęgnacji, a wyniki zaprezentowano za pomocą rysunku 3a.



Rys. 3. Badania VSS a) zmiana wartości  $E_{v1}$  oraz  $E_{v2}$  w czasie b) widok aparatury pomiarowej (cylinder o średnicy 100 cm)

Przed badaniami właściwymi, przeprowadzono serię testów, na podstawie których ustalono, że przyjęta apriori średnica cylindra (100 cm) jest wystarczająca. W odniesieniu do analizy wyników badań w rozpatrywanym okresie czasu zjawisko wtórnego wiązania KzRB jest wyraźnie widoczne. Największy wzrost wartości wtórnego modułu odkształcenia ( $E_{v2}$ ) wyniósł 87,5%.

## 4. Badania terenowe

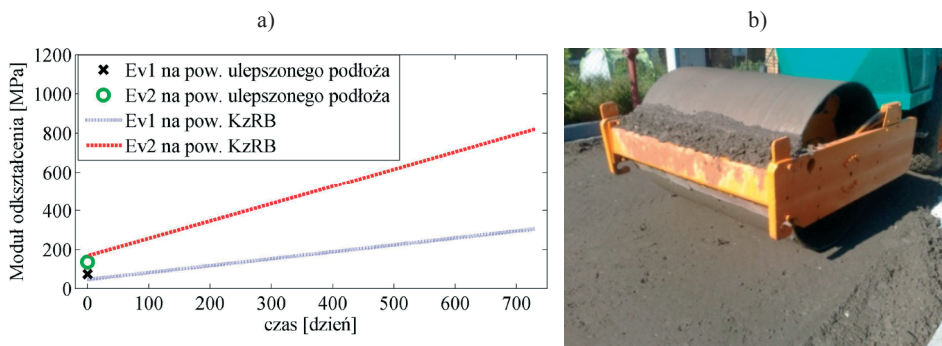
Badania terenowe były prowadzone podczas budowy nawierzchni ulicy obciążonej ruchem KR1 zlokalizowanej w zachodniej części Polski. Konstrukcja nawierzchnia składała się z:

- 8cm - kostka betonowa,
- 3-5cm - podsypka piaskowo-cementowa,
- 20cm - podbudowa zasadnicza z mieszanki KzRB
- podłoże ulepszone cementem w celu spełnienia wymogów kategorii podłoża G1,  $R_m = 2,5\text{MPa}$ .

Sposób zagęszczenia warstwy KzRB za pomocą walca przedstawiono na rysunku 4b, a jako kryterium poprawnego zagęszczenia przyjęto standardową miarę wskaźnika

odkształcenia  $I_0 \leq 2,2$ . Odnotowano, że warstwy wykonane z kruszywa można zagęszczać wyłącznie w sposób statyczny. Wibracyjne technologie zagęszczania powodują efekt wypływania wody na powierzchnie warstwy.

Badania płytą sztywną VSS przeprowadzono na warstwach ulepszanego podłoża i podbudowy zasadniczej. Uzyskane wartości modułów odkształcenia na powierzchni ulepszanego podłoża i KzRB zaprezentowano na rysunku 4a.



Rys. 4. a) Wyniki badań VSS w warunkach polowych b) proces zagęszczania warstwy z KzRB podczas budowy nawierzchni

W warunkach naturalnych wartość modułu odkształcenia mierzona na warstwie z KzRB wzrasta w czasie. Osiągnięta wartość Ev2 po dwóch latach jest wynikiem wzrostu wartości parametrów warstwy z KzRB oraz podłoża ulepszanego cementem.

## 5. Dyskusja

Na podstawie wyników badań przedstawionych w punkcie 3.1. wynika, że wytrzymałość na ścislenie próbek wykonanych z KzRB wynosi 90 kPa, natomiast z zastosowaniem dodatku cementu (1% m/m), uzyskana wartość wytrzymałości na ścislenie wynosi 450 kPa. Wartościami wymaganej wytrzymałości na ścislenie dla próbek wykonanych z gruntu stabilizowanego cementem marki Rm = 1,5 MPa wytrzymałość na ścislenie wynosi 0,5 - 1,5 MPa. Wartość wytrzymałości na ścislenie próbek z KzRB jest dużo mniejsza niż wymagana dla próbek wykonanych z gruntu stabilizowanego cementem. W przypadku próbek z KzRB z dodatkiem cementu możliwe jest uzyskanie wyników zbliżonych do wymagań stawianych warstwom stabilizowanym cementem. W świetle uzyskanych wyników można sformułować przypuszczenie, że warstwy z KzRB nie można wymiarować przy zastosowaniu kryteriów zmęczenia jak dla warstw związanych spoiwem hydraulicznym. Fakt ten jest szczególnie widoczny biorąc pod uwagę, że „inżynierska” ocena wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu cementowego to 10% wytrzymałości na ścislenie.

Wyniki badań przedstawione w punkcie 3.2. to autorska koncepcja oceny umownego modułu edometrycznego ( $M_E$ ) nietypowych i gruboziarnistych kruszyw. Dla próbki z KzRB otrzymano  $M_E \approx 170 \text{ MPa}$ , co jest wartością rzędu modułu sprężystości dla kruszyw naturalnych stosowanych do warstw stabilizowanych mechanicznie (200 MPa). Odnotowano relatywnie niewielki przyrost wartości  $M_E$  w czasie (około 20%). Dalsza eksploracja właściwości KzRB dotyczy badań płytą sztywną VSS wykonywanych w laboratorium (punkt 3.3). W oparciu o własną koncepcję stanowiska badawczego, odnotowano wzrost wartości modułu odkształcenia warstwy (próbki) z KzRB w czasie: Ev2 ( $t = 0 \text{ dni}$ ) = 160 MPa oraz Ev2 ( $t = 246 \text{ dni}$ ) = 300 MPa. Wartości początkowe Ev2 na

powierzchni warstwy z KzRB są porównywalne do wartości wymaganych dla podbudów drogowych bezpośrednio po zagęszczeniu. Warto zauważyć, że z czasem wielkość  $E_{v2}$  dla warstwy z KzRB wzrasta, osiągając wartości zbliżone do wartości  $E_{v2}$  możliwych do uzyskania na warstwie stabilizacji cementem w warunkach budowy. Wzrost wartości  $E_{v2}$  w badaniach laboratoryjnych najprawdopodobniej jest skutkiem wtórnego wiązania cementu w warstwie z KzRB.

Wzrost wartości  $E_{v2}$  dla warstwy z KzRB uzyskano również w warunkach in situ. Wartości oznaczone na powierzchni warstwy z KzRB w czasie były następujące:  $E_{v2}$  ( $t = 0$  dni) = 167 MPa oraz  $E_{v2}$  ( $t = 246$  dni) = 387 MPa, natomiast  $E_{v2}$  ( $t = 730$  dni) = 820 MPa. W odniesieniu do analizowanej konstrukcji nawierzchni, wzrost ten jest najprawdopodobniej wypadkową przyrostu wartości  $E_{v2}$  zarówno warstw KzRB jak i podłoża ulepszanego cementem.

Zarówno w warunkach budowy jak i laboratorium odnotowano, że proces technologii zagęszczania musi być statyczny. Wibracyjne technologie „wypłukują” wodę co może zaburzyć wymagania wobec wilgotności optymalnej.

## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne i ich analiza pozwala sformułować następujące wnioski:

- W każdym z przeprowadzonych i opisanych tu badań odnotowano wzrost wartości parametrów  $E_{v2}$  w czasie, w odniesieniu do warstw z kruszywa z recyklingu betonu (KzRB). Efekt ten z dużym prawdopodobieństwem należy przypisać wtórnej cementyzacji (KzRB).
- Na podstawie wartości  $E_{v2}$  zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i in situ wykazano, że wzrost  $E_{v2}$  w czasie, w warunkach laboratoryjnych wynosi 87,5%, a w przypadku badań in situ wynosi 131% w tym samym interwale czasowym. Większy wzrost wartości modułu w warunkach terenowych może być również spowodowany dodatkowym efektem usztywniania się w czasie warstwy ulepszanego podłoża, które w analizowanym przypadku wykonano w technologii stabilizacji cementem  $R_m = 2,5$ MPa.
- Materiał z KzRB cechował się mniejszym przyrostem wartości parametrów  $E_{v2}$  niż materiały z recyklingu betonu opisywane w dostępnej w literaturze. To bardzo utrudnia jego klasyfikację i jednocześnie wskazuje, że KzRB wymaga stałej kontroli podczas prac.
- Uzyskana wartość umownego modułu edometrycznego badana na autorskim stanowisku badawczym sugeruje, że wartość modułu KzRB ( $M_E \approx 170$  MPa) jest nieco mniejsza niż wartości modułu sprężystości sugerowane dla warstw nawierzchni wykonywanych z kruszywa naturalnego ( $E = 200$  MPa).
- Wytrzymałość na ściskanie próbek uformowanych z KzRB jest znacząco mniejsza (6-cio krotnie) od wytrzymałości próbek standardowo formowanych na potrzeby kontroli warstw stabilizacji cementem. To pozwala przypuszczać, że warstwy z KzRB nie powinny być wymiarowane z zastosowaniem kryteriów zmęczeniowych przeznaczonych do warstw związanych spoiwem hydraulicznym.

## Literatura

- 1 Al-Qadi I., i inni, *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*, Taylor& Francis, 2008.
- 2 Arm M., *Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials– experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag*, Rozprawa doktorska, Sztokholm, 2003.
- 3 Dosho Y., *Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System -Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method*, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 5 (1), 2007.
- 4 Grabowski W., Pożarycki A., *Zastosowanie kruszywa z recyklingu konstrukcji i wyrobów betonowych do podbudowy nawierzchni drogowej*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Ochrona Środowiska i Estetyka a Rozwój Infrastruktury Drogowej, Kazimierz Dolny 2009, s. 318-327.
- 5 Kudrowski W., *Chemia cementu i betonu*, Polski Cement, 2010
- 6 Pachowski J., *Wpływ technologii zagęszczania na właściwości materiałów gruboziarnistych stosowanych do warstw mrozoochronnych*, IBDiM, Warszawa, 2005.
- 7 Poon S., Chan D. *The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base*, *Construction and Building Materials*, Waste Management 26, 2006.
- 8 Sybilski D., i inni, *Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych*, IBDiM, Warszawa, 2004.
- 9 Zając B., Gołębiowska I., *Nowoczesne metody recyklingu betonu*, Inżynieria i aparatura chemiczna, 2010.
- 10 PN-S-02205:1998 *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*, PKN
- 11 *Ustalenia podjęte na spotkaniu dotyczącym badania nośności i zagęszczenia przez obciążenie płytą naciskową*, Dyrekcja okręgowa dróg publicznych, Wrocław, 03.04.1998

## Self-cementing properties of recycled concrete aggregates (RCA) on the example of tests of material and layers of pavement subbase

Jakub Fengier<sup>1</sup>, Andrzej Pożarycki<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Institute of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Poznan University of Technology, e-mail: <sup>1</sup>jakub.fengier@put.poznan.pl, <sup>2</sup>andrzej.pozarycki@put.poznan.pl*

**Abstract:** The work is an attempt to summarize the experience concerning the diagnosis of the practical properties of recycled aggregate concrete cement (RCA). It describes the phenomenon of self-cementing properties which was investigated in both the laboratory and on field tests including compressive strength of RCA, non-conventional oedometric tests of RCA and plate bearing tests on the surface of RCA layer. The described self-cementing properties were remarked, however, the RCA material was characterized by smaller increase in the value of parameter EV2 in a 2-year period of time than recycled concrete materials described in the available literature.

**Keywords:** recycled concrete aggregates, self-cementing properties, parameters change over time, course - graded aggregate tests

