

## Zapobieganie powstawaniu spękań w betonowych nawierzchniach Mitigating the cracks in concrete pavements

**Słowa kluczowe:** nawierzchnie betonowe, reakcja alkalia – krzemionka, metody ograniczania ASR, zmniejszanie ekspansji ASR w betonie, mechaniczny i chemiczny wpływ na ASR

**Keywords:** concrete pavement, alkali silica reaction, mitigating methods, mitigation of ASR expansion in concrete, mechanical and chemical effects on ASR

### 1. Wprowadzenie

Autostrady można budować z asfaltu lub z betonu. Jak wiadomo, nawierzchnie asfaltowe są najczęściej budowanymi na świecie, ale nawierzchnie betonowe, które są korzystniejsze ze względu na koszty utrzymania i trwałość, mogą stanowić dobrą alternatywę dla asfaltu. Gdy do budowy autostrad wykorzystywany jest beton, są pewne problemy, które należy uwzględnić, aby zapewnić długotrwałą eksploatację nawierzchni. Na przykład należy określić skład chemiczny stosowanego cementu pod kątem zawartości sodu i potasu w celu uniknięcia pęknięć w nawierzchni betonowej, w zależności od użytego kruszywa. Wzajemne oddziaływanie cementu i kruszyw reaktywnych może powodować poważne uszkodzenia nawierzchni betonowych. Innymi słowy, w wyniku powszechnie spotykanej reakcji reaktywnej krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu [RSPK], w nawierzchni betonowej, na skutek ekspansji spowodowanej żelem Na-K-Ca-SiO<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O, mogą pojawić się pęknięcia.

Pękanie nawierzchni drogowych ma ogromne znaczenie, ponieważ zwiększa ryzyko wypadków drogowych. W związku z tym, w prezentowanej pracy zawarto studium literatury dotyczące możliwości zmniejszenia ekspansji związanej z tą reakcją oraz omówiono wady i zalety różnych metod stosowanych w tym celu. Ponadto przedstawiono najważniejsze problemy dotyczące ich praktycznego zastosowania. Ustalono, że jest wiele metod zmniejszania efektów RSPK, ale każda z nich wiąże się z innymi problemami. Dodatkowo przeprowadzono laboratoryjne badania zmian spowodowanych dodaniem żużla i kruszyw niereaktywnych do betonu z reaktywnym kruszywem. Porównano pięć różnych wariantów i wybrano najlepsze. W literaturze nie ma zbyt wielu doniesień dotyczących wpływu dodatku żużla i kruszyw niereaktywnych na RSPK. Stąd, w prezentowanej pracy przeprowadzono badania w celu porównania efektywności różnych metod. Wyniki mogą dodatkowo wskazać kierunki dalszych badań.

### 1. Introduction

Highways can be realized from asphalt or concrete. As it is known, the asphalt pavements are mostly used in the world, but concrete pavements, which are more advantageous in terms of maintenance costs and service life, can be a good alternative to asphalt. When concrete is used in the construction of motorways, there are some problems that must be taken into consideration to ensure the long-term performance of pavements. For example, the chemical properties of cement used in order to prevent cracks in the concrete pavement should be determined and the alkali content should be measured, according to the aggregate properties. Because the interaction of cement and reactive aggregate can cause major problems in concrete pavements. In other words, as a result of the commonly encountered alkali silica reaction (ASR), undesirable cracks can arise in the concrete pavement due to the pressure caused by the expansion of the Na-K-Ca-SiO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O gel formed.

Cracks in the road pavements are of great importance because they can increase the risk of accidents in transportation engineering. Therefore, in this study, a detailed literature survey of the possibility of the alkali silica reaction reduction was conducted, and the advantages of different methods were discussed. In addition, important points have been emphasized on their applicability in practice. As a result, it has been determined that many of the methods used reduce the effect of alkalis, but that each method has different effects. Additionally, slag and harmless aggregate addition methods were compared by conducting original laboratory tests. Five different conditions were compared with each other and more effective way was evaluated. In the literature there is no enough discussion of slag and the harmless aggregate effects on ASR. Hence in this study the tests were conducted to compare these two different methods. The results can give a new point of view for further studies.

## 2. Nawierzchnie drogowe i reakcja wodorotlenków Na i K z krzemionką

Na początku należy wspomnieć, że głównych zmian w konstruowaniu nawierzchni betonowych generalnie dokonywano pod koniec XIX wieku. Innowacje wprowadzone w tej technologii stały się alternatywą dla dróg asfaltowych. Wykorzystywane są one również dzisiaj, zwłaszcza na lotniskach do budowy pasów startowych. Beton jest znakomitym materiałem do konstrukcji nawierzchni drogowych, szczególnie w miejscach, w których występuje duże natężenie ruchu drogowego oraz w warunkach wymagających częstej konserwacji.. (Horvath i Chris, 1998) wymieniają następujące zalety betonowych nawierzchni drogowych:

- są odporne na powstawanie kolein,
- zapewniają możliwość zwiększenia szybkości ruchu,
- są odporne na warunki atmosferyczne,
- zapewniają lepszą widzialność w nocy,
- mają dłuższy okres eksploatacji,
- są bardziej przyjazne dla środowiska naturalnego.

Jednak, jeśli mieszanka betonowa nie zostanie odpowiednio zaprojektowana, RSPK może wywołać postawienie pęknięć, co pociąga za sobą wypadki drogowe. Równocześnie trwałość nawierzchni ulega skróceniu. Skutkami RSPK jest pękanie nawierzchni betonowej z powodu ekspansji żelu  $\text{Na-K-Ca-SiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , wywołanego wilgotną atmosferą (Lindgard i in., 2012). W zależności od ogólnego stopnia postępu tej reakcji w betonie, rozmiary pęknięć mogą być różne [rysunek 1]. Czasami jednak suche warunki w okresie eksploatacji mogą nie powodować dużych pęknięć, groźnych dla ruchu drogowego. Na przykład, jeśli wilgotność względna otoczenia wynosi około 8%, a przepuszczalność betonu jest mała dzięki zastosowaniu dodatku mineralnego, może ona zostać znacznie zmniejszona. Z tego powodu należy najpierw ocenić ryzyko wystąpienia RSPK, a następnie podjąć niezbędne środki ostrożności (Neville, 1997).

RSPK można wykryć stosując różne metody badawcze. Badania RSPK najczęściej prowadzi się w oparciu o normy ASTM [ASTM C441, ASTM C227, ASTM C1260 i ASTM C1293]. Jednakże obecnie nie ma jeszcze dobrego praktycznego i ekonomicznego rozwiązania problemu zachodzenia ASR. Ostatnio podejmuje się różne próby zmniejszenia ekspansji spowodowanej RSPK (Lindgard i in., 2012). Najczęściej stosowane metody są następujące:

1. dobór kruszywa przez wykrywanie kruszyw reaktywnych,
2. dobór cementu z jak najmniejszą zawartością sodu i potasu,
3. zmniejszanie przepuszczalności betonu,
4. stosowanie dodatków mineralnych i domieszek chemicznych,
5. stosowanie dodatków niekonwencjonalnych (włókna odpadowe, guma, szkło, ...).

## 2. Concrete pavements and alkali silica reaction

It can be mentioned that major developments in concrete pavements were generally made in the late 19th century. Innovations introduced to the technology have become an alternative to the asphalt roads. They can be used more today, especially for air strip in airports. Thus, it is suitable for concrete pavement construction, especially in areas where there is a lot of heavy vehicle traffic and on conditions that require frequent maintenance. Some of the advantages of concrete pavements can be listed as follows (Horvath and Chris, 1998):

- resistant to wheel trace,
- possibility to increase the traffic speed,
- resistant to weather conditions,
- It is more suitable for night vision,
- it has a long service life,
- It is environmental friendly.

If the concrete mix is not properly selected, the chemical reaction of the materials may cause traffic accidents as a result of cracks, and so the service life of the pavement may also decrease. One of these chemical reactions is the alkali silica reaction (ASR). The ASR reaction of the KOH and NaOH in the concrete with the reactive silica in the aggregate can cause cracks in the concrete pavement due to the expansion of the gel formed with the ambient air humidity (Lindgard et al., 2012). Depending of the ASR range in concrete, the cracks sizes can be changed at an undesirable level (Fig. 1). However, sometimes the dry conditions during the service life may not result in large cracks which may prevent traffic flow. For example, if the moisture of environment is around 8% RH, ASR can be reduced if the permeability of the concrete is low, by using mineral additive replacing Portland cement. For this reason, the possibility of reaction must first be determined and necessary precautions should be taken (Neville, 1997).



Rys. 1. Pęknięcia w nawierzchni betonowej wywołane reakcją aktywnej krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu (Touma et al 2001)

Fig.1. Cracks caused by reaction of silica with Na and K hydroxides in concrete pavement (Touma et al 2001)

### 3. Metody ograniczania RSPK

#### 3.1. Wykrywanie kruszyw reaktywnych i dobór kruszywa

W przypadku kruszywa, w którym występuje reaktywna krzemionka, można próbować zmniejszyć zakres RSPK różnymi metodami lub można nie stosować kruszyw reaktywnych. W procesach geologicznych powstały różne odmiany polimorficzne kwarcu. W trakcie trwania tych procesów występują duże naprężenia wewnętrzne, a kruszywo z takich skał staje się reaktywne (Neville, 1997). Powstawanie spękań betonu z kruszywem reaktywnym, wywołane przez RSPK, można zmniejszyć zmieniając stosunki kruszyw w mieszance betonowej. W niektórych przypadkach wystarczające jest zmniejszenie zawartości reaktywnej krzemionki do 2%. Kiedy zawartość reaktywnej krzemionki zbliża się do 5% zwiększa się również ekspansja betonu. Jednak dla większych zawartości krzemionki, ilość Na i K z reguły nie jest wystarczająca aby cała zawartość reaktywnej krzemionki przereagowała, w związku z tym ekspansja może być mniejsza [Federal Highway Administration, 2007].

Przy analizowaniu RSPK ważna jest również wielkość ziaren kruszywa. W swoich pracach Woods (1968), Hobbs i Gutteridge (1979), Diamond i Thaulow (1974), Han i Fang (1984), Mehta (1993), Zhang i in. (1999) i Dunant i in. (2012) stwierdzają, że ekspansja wywołana przez kruszywo reaktywne zwiększa się wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren. Wraz ze wzrostem rozmiaru ziaren kruszywa zmniejsza się również stosunek cement/kruszywo, przy którym występuje maksymalna ekspansja wywołana przez RSPK. Innymi słowy, ekspansja spowodowana przez tę reakcję zachodzi wolniej w przypadku grubszego kruszywa, a oddzielenie określonych frakcji może być bardzo korzystne z punktu widzenia RSPK. Szybkość reakcji jest większa dla małych ziaren kruszywa. Jednak efekt RSPK kruszyw grubych może być większy w betonach po długim okresie eksploatacji. Ponadto RSPK przebiega inaczej przy stosowaniu grysów naturalnych, a inaczej w przypadku łamanych. Efekt wielkości ziaren może być większy dla kruszywa łamanych (Ramyar i in. 2005).

Oczywiście najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie kruszyw niereaktywnych. Jednakże rozwiązaniem bardziej ekonomicznym i praktycznym jest stosowanie również kruszyw reaktywnych, stosując je jednak w odpowiedni sposób. Z tego względu, w stosowanych obecnie rozwiązaniach, kruszywa reaktywne i niereaktywne są czasami mieszane w odpowiednio dobieranych proporcjach. Jednakże ze względów ekonomicznych w takich przypadkach należy podejmować decyzję czy zastosować małą nieszkodliwą ekspansję czy inne metody ograniczenia efektu RSPK. Dlatego w prezentowanej pracy, w części doświadczalnej, ta metoda została porównana z metodą dodawania żużla.

#### 3.2. Ograniczenie zawartości $Na_2O_e$ i selektywne dobieranie cementów

Zawartość sodu i potasu w cemencie może być również przyczyną RSPK. Zgodnie z ASTM C150 w przypadku kruszyw reaktywnych należy stosować cement o małej zawartości sodu i potasu. Cał-

At present, alkali reaction can be detected by various tests such as mortar bar method, chemical method, concrete prism method, Gel-Pat method, German dissolution method. The test standards used in ASR determination have often become more pronounced (ASTM C441, ASTM C227, ASTM C1260 and ASTM C1293). However, a practical and economical solution for reducing the alkali reaction has not been specified, yet. Several methods have recently been tried to reduce ASR effects (Lindgard et al., 2012). The most common of these methods are:

1. determination of reactive aggregate and selection of aggregate,
2. sodium and potassium reduction in cement and its selection,
3. reduction of concrete permeability,
4. use of mineral additives and chemical admixtures,
5. the effect of different materials (waste fiber, rubber, glass, ...) addition.

### 3. ASR mitigating methods

#### 3.1. Determination of reactive aggregates and aggregate selection

In the case of the aggregate in which the reactive silica is present, the alkali silica reaction can be reduced by various methods or it can be decided not to use these reactive aggregates. Different polymorphs of quartz and different crystals morphology can be found in the rocks formed in different geological processes. During these processes, when the internal stresses are high, aggregate produced of these rocks became reactive (Neville, 1997). Cracks caused by ASR can be reduced when the mixing ratios of the concrete with reactive aggregate are changed. For example, in some cases the reduction of reactive silica content, to 2%, is sufficient. As the reactive silica approaches 5%, the expansion seen in the concrete also increases. However, above this value, the content of alkalis is as a rule not sufficient to react with the whole silica, so that the expansion may be lower (Federal Highway Administration, 2007).

Aggregate size is important from the ASR point of view. Woods (1968), Hobbs and Gutteridge (1979), Diamond and Thaulow (1974), Han and Fang (1984), Mehta (1993), Zhang et al. (1999) and Dunant et al. (2012) reported that ASR expansions caused by reactive aggregate increased as grain size decreased. As the size of the aggregates grows, the ratio of cement/aggregate giving the maximum ASR expansion also decreases. In other words, ASR is slow for large aggregate size and the using of specific aggregate grading may be very advantageous for ASR. The reaction rate is high for small aggregate grains. The ASR effect of coarse aggregates may be higher for all long-term concrete expansions. In addition, crushed and natural aggregates will behave differently in ASR. The size effect can be more effective for crushed aggregate (Ramyar et al. 2005).

It is obvious that the use of unreactive aggregate is the best solution. However, as the economical and practical solution, it is also possible to use reactive aggregates by application suitable methods. Because of this reason, in today's application areas,



kowitą zawartość  $\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{K}_2\text{O}$  pochodzącą z cementu w betonie można obliczyć za pomocą prostego wzoru, podanego przez Famy i Beatrix, (2007):

$$(\text{kg cement} / \text{m}^3) \times \% \text{Na}_2\text{O}_e \text{ w cemencie} / 100 = \text{kg Na}_2\text{O}_e / \text{m}^3 \text{ betonu} \quad [1]$$

Należy zadbać, aby określona zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_e$  nie przekraczała maksymalnego dopuszczalnego limitu. W Kanadzie i niektórych krajach europejskich maksymalna dopuszczalna zawartość alkaliów wynosi od  $1,8 \text{ kg/m}^3$  do  $3 \text{ kg/m}^3$ , w zależności od reaktywności kruszywa (Farny i Beatrix, 2007; Csa-A23.1, 2004). Średnia zawartość równoważnika sodowego, zgodnie z normami ASTM C150 i AASHTO M85, nie powinna przekraczać 0,60%. W niektórych krajach całkowita zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_e$  nie powinna być większa niż  $3 \text{ kg/m}^3$ , zgodnie ze specyfikacjami budowy autostrad (Highway Technical Specification, 2013). Niektórzy badacze wykazali, że ten stosunek może się różnić w zależności od rodzaju kruszywa (Sibbick i Page, 1991, Swamy i Al-Asali, 1988). Ponadto, kruszywa zawierające następujące minerały: mika, kaolinit, illit lub kalcyt mogą również powodować wzrost zakresu RSPK (Grattan-Bellew, 1994, Helmuth, 1993). W niektórych cementach stosowanych w celu ograniczania RSPK, mogą pojawić się problemy z wiązaniem cementu oraz z wytrzymałością wczesną. Z tego powodu należy zadbać o zgodność kruszyw z cementem oraz o prawidłowy dobór cementu (Highway Technical Specification, 2013).

### 3.3. Ograniczanie wilgoci i przepuszczalności

Zbrojone nawierzchnie drogowe narażone są na wpływ warunków zewnętrznych bardziej niż inne konstrukcje. Dlatego wilgoć i przepuszczalność betonu mają duży wpływ na RSPK. Potwierdzone doświadczalnie przykłady pokazują, że jedną z głównych przyczyn uszkodzeń pojazdów silnikowych w Niemczech jest RSPK (Volland i in., 2016). Zarówno podczas budowy, jak i podczas eksploatacji linii komunikacyjnych wilgotność ma wielki wpływ na betonowe nawierzchnie. Reakcja wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką przebiega głównie w zakresie temperatur  $21\text{-}24^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej 80% (Famy i Beatrix, 2007). Niektórzy autorzy wnioskują, że maksymalne spękania występują w temperaturach niższych, od  $13^\circ\text{C}$  do  $20^\circ\text{C}$  (Famy i Beatrix, 2007), a następnie ekspansja zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury. Ponadto porowata mikrostruktura ułatwia transport wody w betonie. W ten sposób rozpuszczone wodorotlenki Na i K gromadzą się na powierzchni nawierzchni, ze względu na odparowywanie wody z fazy ciekłej betonu. Prowadzi to do gromadzenia się nadmiernych ilości tych wodorotlenków na powierzchni nawierzchni drogowych, co sprzyja występowaniu większych spękań. Dodatkowo, gdy konstrukcja betonowa o małej wilgotności jest ponownie zasilona w wodę z opadów deszczu, może to ponownie spowodować spękania RSPK (Multon i Toutlemonde, 2010). Z tego powodu bardzo ważne jest zapewnienie małej przepuszczalności betonu. W przypadku porowatej mikrostruktury zwykle pierwszą z proponowanych metod jest pokrycie nawierzchni warstwą izolacyjną (Stark i in. 1993).

reactive and harmless aggregates are sometimes mixed at certain ratios. However, in order to provide an economical solution, the use of harmless aggression should be decided in comparison with other improvement methods. Therefore, in this paper this method was compared with slag adding method in the experimental part of this paper.

### 3.2. Alkali reduction and cement selection

The content of alkalis in cement can be the source of the ASR. According to ASTM C150, cement containing low sodium and potassium for reactive aggregates should be used. The total content of  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  in concrete from cement can be calculated using the simple formula (Farny and Beatrix, 2007):

$$(\text{kg cement} / \text{m}^3) \times \% \text{Na}_2\text{O}_e \text{ in cement} / 100 = \text{kg alkali} / \text{m}^3 \quad [1]$$

It should be taken care that the specified alkali content does not exceed the maximum allowable limit. In Canada and some European countries, the maximum allowable alkali content ranges from  $1.8 \text{ kg/m}^3$  to  $3 \text{ kg/m}^3$  depending of the aggregate reactivity (Farny and Beatrix, 2007; Csa-A23.1, 2004). The average sodium oxide equivalent content by ASTM C150 and AASHTO M85 standards should not be higher than 0.60%. In some countries, the total alkalis content should not exceed  $3 \text{ kg/m}^3$  according to the highway specifications (Highway Technical Specification, 2013). Some researchers have mentioned that this ratio can vary according to the aggregate (Sibbick and Page, 1991; Swamy and Al-Asali, 1988). In addition, aggregates containing various minerals (such as mica, kaolinite and illite, calcite) may also cause the increase of ASR intensity (Grattan-Bellew, 1994; Helmuth, 1993). Furthermore, in some cements used for ASR mitigation, problems may arise with the concrete setting and the rate of early strength development. For this reason, care should be taken to ensure compatibility with cement and selection of cement (Highway Technical Specification, 2013).

### 3.3. Reduction of moisture and permeability

Reinforced concrete pavements are exposed to more external influences than other constructions. For this reason, moisture and the concrete permeability have a big influence on ASR effect. For example, it is emphasized that one of the major reasons for the damage of motor vehicles in Germany is ASR (Volland et al., 2016). Both during construction and during use, the impact of the humidity has great effects on concrete pavements. Alkali silica reaction occurs mostly at a temperature range of  $21\text{-}24^\circ\text{C}$  and relative humidity of 80% (Farny and Beatrix, 2007). Some researchers have suggested that maximum cracks can occur even at temperature as low as  $13^\circ\text{C}$  and  $20^\circ\text{C}$  (Farny and Beatrix, 2007), although ASR expansions increase as temperature is rising. In addition, the porous microstructure facilitate the water transport in concrete. Thus, the dissolved alkali accumulates on the surface, due to the tendency of the water to evaporate. This can lead to excessive alkali accumulation on the pavement surface and increased cracks. In addition, when the structure receives water from raining it can cause ASR cracks again (Multon and Toutlemonde, 2010). For this

### **3.4. Stosowanie dodatków mineralnych i domieszek chemicznych**

Zastosowanie dodatków mineralnych i domieszek chemicznych może zmniejszyć skutki RSPK w betonie. W większości prac dotyczących ograniczania zakresu RSPK autorzy skupiają się na stosowaniu dodatków mineralnych. Z przeglądu literatury wynika, że w kwestii badań dotyczących dodatków mineralnych i domieszek chemicznych zostało jeszcze wiele do zbadania.

#### **Stosowanie dodatków mineralnych**

Dodatki mineralne mogą różnie wpływać na RSPK. Przykładowo – wpływ dodatku metakaolinu w ilości 10-30% na ograniczenie RSPK jest inny dla różnych kruszyw. Jako dodatki można stosować pucolany, popiół lotny, pył krzemionkowy, metakaolin lub zeolity. Dodatki te, stosowane w ilości 10%-30% skutecznie ograniczają RSPK, jak na przykład dodatek 15% prażonej gliny, która zmniejsza RSPK o 16%. Aby ograniczyć RSPK do wartości mniejszej niż graniczna za pomocą perlitu ekspandowanego lub pyłu krzemionkowego dodatek powinien wynosić 16% w przypadku kruszywa reaktywnego i 4% dla kruszywa wykazującego małą ekspansję. Dobre właściwości zapraw uzyskuje się dodając metakaolin w ilości 15-20%. Inne prace podają, że pył krzemionkowy i metakaolin zapewniają poprawę w podobnych proporcjach, a także, że wzrost udziału popiołu lotnego może dać lepszy efekt niż dodatek pyłu krzemionkowego i metakaolinu (Nayir, 2015).

Wpływ dodatku popiołu lotnego nie zawsze musi być taki sam. Jednym z powodów są właściwości chemiczne materiałów użytych w doświadczeniach. RSPK może występować, ponieważ dodatek w zakresie od 5% do 10% może tylko zwiększyć zawartość Na i K w betonie. Należy podkreślić, że dodatek popiołu lotnego w ilości od 20% do 30% może zapewnić ograniczenie efektu RSPK zgodnie z normami ASTM, dodatek popiołów lotnych F i C powinien zawierać się w przedziale od 15% do 50% (Federal Highway Administration, 2012). W przypadku popiołów o małej i dużej zawartości wapnia wskaźnik ten mieści się w zakresie od 20% do 60%. Wykazano również, że zgodnie z metodą opisaną w normie ASTM C 618, popioły lotne klasy F i C mogą korzystnie zmniejszać RSPK gdy zastępują one 30% cementu portlandzkiego (Malvar i wsp., 2012). Ogólnie uważa się że badania nad wpływem popiołu lotnego na RSPK nie zostały jeszcze zakończone (Williamson i Juenger, 2016; Kawabata i Yamada, 2017).

W żużlu wielkopieczowym potas i sód występują w szkłe i przechodzą do fazy ciekłej wolniej niż w przypadku cementu portlandzkiego. Aby żużel wielkopieczowy zmniejszał RSPK jego zawartość powinna wynosić od 25% do 50%, (Lingard i in., 2012). W przypadku ryzyka wystąpienia RSPK dodatek żużla powinien być większy niż popiołu lotnego.

Niektóre prace donoszą, że popiół lotny, tufy wulkaniczne, żużel i pumeks mają skuteczny wpływ w ograniczaniu RSPK, a ich oddziaływanie układu się w podanej kolejności. Wraz ze wzrostem procentowym dodatku wzrasta również efekt zmniejszenia RSPK. Zastępowanie tymi dodatkami 30% cementu portlandzkiego, moż-

reason, prevention of impermeability is very important. For porous microstructure, the covering and the isolation are usually the first of several proposed methods (Stark et al. 1993).

#### **3.4. Use of mineral additives and chemical admixtures**

Addition the mineral additives and chemical admixtures to the concrete can reduce the effects of ASR. Most of the papers in the literature are presenting the addition of materials necessary to reduce the ASR. From the literature review it can be stated that the studies concerning the problem of mineral additives and chemical admixtures have not yet been completed.

#### **Use of mineral additives**

The effect of mineral additive on ASR varies. For example, the effect of 10-30% of metakaolin on ASR reduction varies for different aggregates. Pozzolanas, fly ash, silica fume, metakaolin, zeolites can be used. Different pozzolana addition (10% -30%) are effective in ASR mitigating. For example; 15% fired clay reduce the ASR by 16%. The expanded perlite dust and silica fume reduce the ASR below the limit value when their addition is 16% in high reactive aggregate and 4% in slow expanding aggregate. When 15-20% of metakaolin is used, the desired improvement can be obtained. Another study has reported that silica fume and metakaolin provide improvements in similar proportions. However, as the content of fly ash increases, the improvement effect can be higher than of silica fume and metakaolin (Nayir, 2015).

The results of fly ash application can be different. One of the reasons of this behavior are the chemical properties of the materials used in the experiments. ASR change can be observed because fly ash may only increase the alkalis content of the concrete sample when its addition is between 5% and 10%. It has been emphasized that 20% -30% of fly ash can be effective in ASR reduction. According to ASTM, F and C fly ash addition may be in the range from 15% to 50% (Federal Highway Administration, 2012). In the case of low and high calcium fly ash, this share is between 20% and 60%. It has also been noted that F and C class fly ash can be effective in ASR reduction according to ASTM C 618 when replacing 30% of Portland cement (Malvar et al., 2012). Additionally, there is the opinion that investigation of the fly ash have not been finished yet (Williamson and Juenger, 2016; Kawabata and Yamada, 2017).

The alkalis in the blast furnace slag are in glass and are released more slowly than from Portland cement. Blast furnace slag should be added in the range 25% - 50% in order to be effective in ASR (Lingard et al., 2012). In the case of ASR, the slag should be used in higher proportion than the fly ash.

In some studies, it was found that fly ash, trass, slag and pumice have been effective in this order in reducing ASR. As the mixing percentages increase, the effect of reducing the reaction is also increasing. In the case of 30% replacing Portland cement, ASR could be reduced below the limit value. In another research, the expansion of reactive aggregate is reduced by 10% of addition of silica fume below the ASTM C1260 limit. The use of 10% silica

na ograniczyć RSPK do poziomu mniejszego niż dopuszczalna w ASTM. W innych badaniach 10% dodatkiem pyłu krzemionkowego zmniejszono ekspansję kruszywa reaktywnego do poziomu mniejszego od dopuszczalnego w normie ASTM C1260. Dodatek 10% pyłu krzemionkowego, 20% żużła wielkopieczowego lub popiołu lotnego wykazało taki sam efekt. Podczas 14 dni trwających badań ekspansji największe zmniejszenie efektu RSPK wykazały odpowiednio, pył krzemionkowy, żużel i popiół lotny. Ponadto, gdy jako jedyny dodatek stosowano kamień wapienny zauważono dalszą poprawę w porównaniu z efektem uzyskanym przez dodatek popiołu lotnego i żużła, jak i mieszaniny obu tych dodatków mineralnych.

### **Stosowanie litu**

Kolejnym materiałem stosowanym do ograniczania RSPK są sole litu (Lindgard et al., 2012). Owsiak i Zapała-Sławeta (2015) stosowały dodatek azotanu litu w stosunku molowym do Na+K wynoszący 0,74. Stwierdziły, że ekspansja po 270 dniach uległa zmniejszeniu z 0.13% do 0.03%. O stosowaniu dodatku litu do betonu pisano już w 1951 roku, jednak w przeciągu ostatnich 15 lat przeprowadzono wiele nowych badań na ten temat. Dodatek litu może być różny w zależności od właściwości kruszywa, źródła litu i zawartości sodu i potasu. W 1992 roku Albuquerque przeprowadził pierwsze próby terenowe z użyciem litu na nawierzchni betonowej. Po 12 latach nawierzchnia prezentuje się stosunkowo dobrze. Niezależnie od rodzaju użytego kruszywa, które ma zasadnicze znaczenie, ekspansja po dwóch latach nie może przekroczyć 0,04% (Federal Highway Administration, 2007).

### **3.5. Zastosowanie surowców alternatywnych (odpady włókniste, guma, szkło...)**

W ostatnich latach rozpoczęto badania wpływu różnych materiałów na RSPK w celu zwiększenia wytrzymałości betonu (Afshinnia and Poursaee, 2015; Zheng, 2016). Odpady włókniste i różnego rodzaju materiały szklane mają wpływ na RSPK. Wykazano, że te dodatki mogą zmniejszyć RSPK, a więc korzystny wpływ mają nie tylko substancje chemiczne, ale także materiały wykazujące oddziaływanie mechaniczne. Przykładowo, w badaniach przeprowadzonych w 2015 r. (Afshinnia and Poursaee, 2015) stwierdzono, że postęp RSPK został zmniejszony odpowiednio o 43% i o 39%, gdy 16% i 24% drobnego kruszywa zastąpiono odpadkami z gumy.

## **4. Ograniczanie RSPK w Australii**

W ostatnim czasie prowadzono badania dotyczące RSPK w tym kraju. Cole i in. (1981) podają, że spękania powierzchni i ekspansja starych tam w Australii jest wynikiem RSPK. W świetle tych wyników można stwierdzić, że RSPK może również mieć wpływ na nawierzchnie betonowe w tym regionie. Zatem reakcja krzemionki z wodorotlenkami Na i K ma również duże znaczenie dla nawierzchni betonowych w Australii.

Można się oprzeć na australijskiej normie AS 2758.1 (Standards Australia, 1998) określającej górną i dolną granicę wymagań

fume and 20% of blast furnace slag or fly ash, showed the same effect. When the 14 days expansion values are examined, the best effect is assured by silica fume, slag and fly ash, respectively. Furthermore, when only limestone dust is used, further improvement is observed, compared to the effect obtained for both fly ash and slag and the combined use of these two mineral additives.

### **Use of lithium**

Lithium salts are one of the materials used to improve the ASR effect (Lindgard et al., 2012). Owsiak and Zapała-Sławeta (2015) used the lithium nitrate addition in the molar proportion to Na+K equal 0,74. They found that the expansion after 270 days was decreased from 0.13% to 0.03%. Lithium application was already mentioned in 1951 as addition to concrete, but new studies has been done in the last 15 years. The addition of lithium may change according to the properties of the aggregate and the type of lithium and alkalis content. In 1992, Albuquerque made its first field trials on the use of lithium on a real concrete pavement. After 12 years, the performance of the pavement with lithium was presented quite well. Independently of aggregate type, which is also important, the 2-year expansion could be only 0.04% (Federal Highway Administration, 2007).

### **3.5. Effect of different materials (waste fiber, rubber, glass, ...)**

In recent years, the investigations of the effects of different materials on ASR in order to increase the strength of concrete started (Afshinnia and Poursaee, 2015; Zheng, 2016). It has also been observed that waste fiber and various glass materials have an effect on ASR. Thus, ASR can be reduced not only by chemical but also by mechanical effects. For example, in a study conducted in 2015 (Afshinnia and Poursaee, 2015), it was noted that the advancement of ASR was reduced by 43% and 39%, respectively, when 16% and 24% of the rubber scraps were replaced fine aggregate.

## **4. Reducing ASR in Australia**

Some studies about ASR have been conducted for this region, recently. Cole et al. (Cole et al., 1981) reported that surface cracking and expansion of old dams in Australia suffering from ASR. In light of this information it can be said that concrete pavements in this region can be affected by ASR. So, alkali-silica reaction also has a significant importance for concrete pavements in Australia.

The upper and lower limits of the grading requirements recommended by the Australian Standard AS 2758.1 (Standards Australia, 1998) and alkali-silica reactivity classification according to the Australian Standard AS 1141.60.1 (Standards Australia, 2014) can be used. Saha and Sarker (2016) conducted some tests by using these Australian standards. Class F fly ash and ground granulated blast furnace slag were used as the ASR mitigating additives and the granulated ferronickel slag as fine aggregate. Experimental results show that the use of blast furnace slag was unable to reduce expansion to the required level. However, the use of 30% class



i normę AS 1141.60.1 (Standards Australia, 2014) klasyfikującą kruszywa reaktywne. Saha i Sarker (2016) prowadzili kilka badań opierając się na normach australijskich. Jako dodatki zmniejszające RSPK zastosowano popioły lotne klasy F i mielony granulowany żużel wielkopieczowy oraz granulowany żużel z dużą zawartością niklu, jako kruszywo drobne. Wyniki doświadczeń pokazują, że dodatek żużla wielkopieczowego nie wystarczył aby zmniejszyć ekspansję do wymaganego poziomu. Stwierdzono jednak, że zastosowanie 30% popiołu lotnego klasy F jako dodatku mineralnego zmniejsza ekspansję RSPK po 21 dniach do poziomu niższego od 0,3%, określonego w australijskiej normie. Obserwacje za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej potwierdziły korzystny wpływ popiołu lotnego w zmniejszeniu skutków RSPK. W związku z tym zastosowanie 30% popiołu lotnego jako dodatku mineralnego uznano za znacznie lepszą metodę ograniczania RSPK w przypadku gdy żużel z dużą zawartością niklu, zastępował całkowicie naturalny piasek.

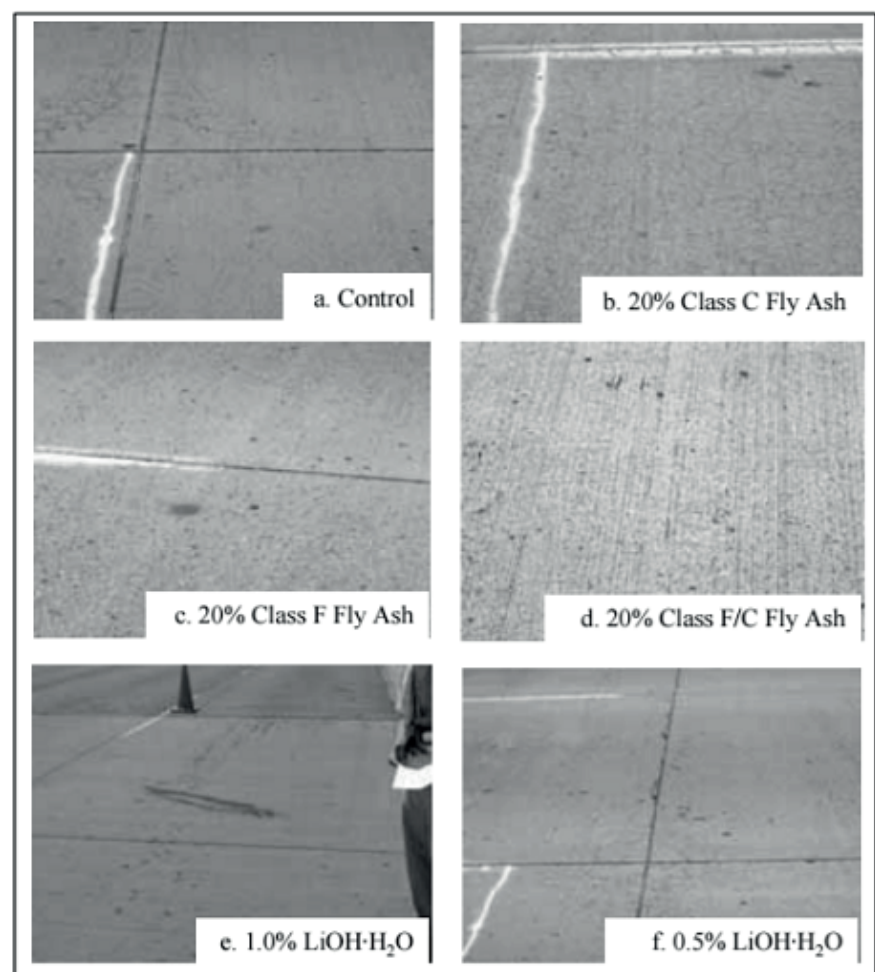
Shayan, Diggins i Ivanusec (Shayan i in., 1996) badali ograniczające RSPK działanie popiołu lotnego. W doświadczeniach wykorzystano jedno kruszywo niereaktywne i 6 reaktywnych. Zastosowano dwa różne popioły lotne i dwa rodzaje cementu. Zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_e$  w betonie zmieniano przez dodawanie wodorotlenku sodu do wody zarobowej. Próbki badano około sześć lat. Stwierdzono, że badane popioły lotne mogą zapobiegać ekspansji wywołanej przez RSPK. Także ograniczenie  $\text{Na}_2\text{O}_e$  (0,60%-1,20%) ma duże znaczenie dla zmniejszania efektów RSPK. Dzięki zastosowaniu dodatku popiołu lotnego zmniejszono zasadowość roztworu w porach betonu. Zmniejszenie ekspansji zachodzi szybciej w przypadku próbek przechowywanych w temperaturze 400°C niż przechowywanych w temperaturze 230°C.

Touma i in. (2001) prowadzili badania nad ograniczaniem RSPK w przypadku sześciu różnych kruszyw i jak to pokazano na rysunku 2, duży wpływ mają kruszywa. Stwierdzono, że dodatek 70% żużla dawał najmniejszą ekspansję po 14 dniach w przypadku wszystkich rodzajów kruszyw. Drugi w kolejności był 25% dodatek prażonej gliny (Touma i in., 2001) [rysunek 3]. Z tych badań wynika, że kruszywa z różnych regionów mają różny skład mineralny, co zmienia skuteczność dodatków mineralnych.

Innym ważnym czynnikiem może być rodzaj badania. Jak wiadomo z literatury, dwie australijskie normowe metody badań kruszyw pod kątem RSPK (AS 1141.60.1=badanie przyspieszone zapraw), (AS 1141.60.1, 2014), AS 1141.60.2=badanie belek betonowych (AS 1141.60.2, 2014) zostały opracowane niedawno. Przeprowadzono

F fly ash as a supplementary cementitious material was found to be effective in reducing the 21-days ASR expansion below 0.3% required by the Australian Standard. Observations by scanning electron microscopy confirmed the effectiveness of fly ash in mitigation of the ASR products of ferronickel slag aggregate. Therefore, 30% fly ash as a supplementary cementitious material was found as an effective measure for mitigating the ASR expansion of the ferronickel slag aggregate up to 100% replacement of natural sand.

Shayan, Diggins, and Ivanusec (Shayan et al., 1996) were investigating the reducing effect of ASR by fly ash addition. In experiments they used one nonreactive and 6 reactive aggregates. Two different fly ashes and two cement types were employed. The alkali content of the concrete was changed by adding sodium hydroxide to the mixing water. The samples were observed almost six years. As a result, the fly ashes tested can be effective in preventing deleterious ASR expansion. The alkali levels (0.60%-1.20%) can be important to reduce the effect of reaction. The alkalinity of the pore



Rys. 2. Ograniczanie RSPK w przypadkach oddziaływania NaOH i KOH na powierzchni betonu po 12 latach; a) powierzchnia referencyjna, b) z dodatkiem popiołu lotnego klasy C, c) z popiołem lotnym klasy F, d) z mieszaniną popiołów lotnych klasy F i C, e) 1% litu, f) 0,5% litu (Touma i in. 2001)

Fig. 2. Reduction of the effect of the reaction of silica with NaOH and KOH on the concrete surface after 12 years; a) comparative surface, b) s with the addition of fly ash c, c) with fly ash F, d) mixture of fly ash class F and C, e) 1% lithium, f) 0.5% lithium (Touma et al. 2001)

pomiary dokładności nowych metod badań w prognozowaniu RSPK w przypadku kruszyw, w warunkach terenowych, opierając się na danych międzynarodowych. Sirivatnanon i in. (2016) wykazali, że AS 1141.60.1 i AS 1141.60.2 są względnie dobrymi metodami, ale okazało się, że badanie belek metodą AS 1141.60.2 jest bardziej wiarygodne niż według AS 1141.60.1. Jak można było wywnioskować z przeprowadzonych doświadczeń, skuteczność w ograniczaniu RSPK dla różnych materiałów nie może wynikać z zastosowanej metody badań. W związku z tym, ten problem powinien zostać w przyszłości dokładniej zbadany. Każdy beton spełniający minimum wynoszące 20% był zwolniony z dodatkowych badań reaktywności. Konieczne było użycie popiołu lotnego o maksymalnej zawartości sodu i potasu wynoszącej 2% i zawartości rozpuszczalnych w wodzie wynoszącej 0,5%. W przypadku granulowanego żużla wielkopieczowego zawartość sodu i potasu wynosiła odpowiednio 1% i 0,5%.

## 5. Badania laboratoryjne reakcji kruszyw krzemionkowych z wodorotlenkami sodu i potasu

### 5.1. Materiały i metody

W badaniach zastosowano trzy różne kruszywa drobne o uziarnieniu 0-5 mm. Jedno z kruszyw wykazywało prawie zerową ekspansję badaną według metody kanadyjskiej CSA A23.2 25A, w związku z tym uznano je za niereaktywne. Dwa pozostałe kruszywa oznaczone jako A i B mogą być podatne na reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu. W badaniach użyto cement CEM I 42,5R zawierający 0,98%  $\text{Na}_2\text{O}_e$ . Skład mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego przedstawiono w tablicy 2. Dodatek żużla do cementu wynosił 20%.

Tablica 1 / Table 1

#### WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYW

#### PROPERTIES OF THE AGGREGATES

Rodzaj kruszywa / Aggregate	Kruszywo A Aggregate A	Kruszywo B Aggregate B	Kruszywo niereaktywne Harmless aggregate
Gęstość właściwa / Specific gravity, $\text{g/cm}^3$	2.7	2.6	2.6
Gęstość pozorna / Apparent specific gravity, $\text{g/cm}^3$	2.7	2.7	2.7
Nasiąkliwość / Absorption, %	0.3	1.0	1.6
Pozostałość na sicie nr 200 Passing ratio on sieve No: 200 (0.074mm), %	10	1.7	1.9

Tablica 2 / Table 2.

#### SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI ŻUŻLA STOSOWANEGO W BADANIACH

#### SOME COMPONENTS AND PROPERTIES OF SLAG USED IN THE TEST

Cl, %	0.03
$\text{SO}_3$ , %	0.22
S, %	0.34
Zawartość szkła / Glass content, %	88
Moduł glinowy / Aluminum modulus*	1.05

\* $(\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3$

solution of mortar cylinders was decrease by fly ash. The decrease of expansion happens faster for specimens stored at 400°C than those stored at 230°C.

As a general report Touma et al. (2001) conducted a research to investigate the mitigating of ASR for six different aggregates and as it can be seen from Fig. 2, they have found that the effectiveness of the mitigation is depending on the aggregates. It seems that using 70% of slag resulted in the lowest 14-day expansion for all aggregates, followed by 25% of calcined clay (Touma et al., 2001) [Fig. 2, 3]. Thus, it can be inferred from this study that the aggregates in different regions can have different ingredients, and the effectiveness of the additives can be changed.

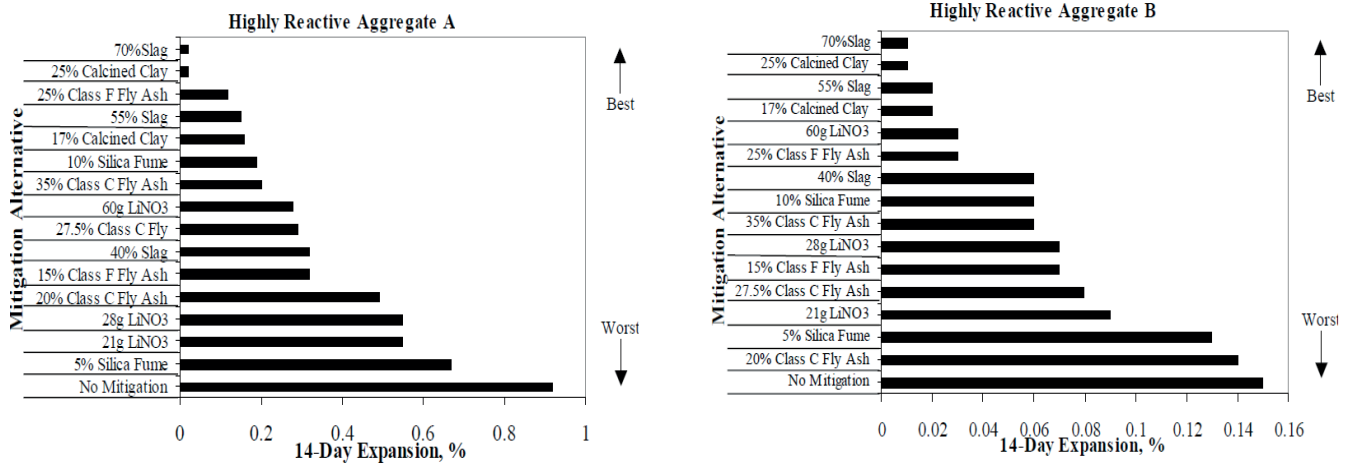
Another important parameter can be test method. As it is known from the literature, 2 new Australian Standard methods to test ASR of aggregates (AS 1141.60.1= accelerated mortar bar test (AS 1141.60.1, 2014), AS 1141.60.2=concrete prism test (AS 1141.60.2, 2014) were determined recently. Some researchers have been investigated the accuracy of the new testing methods in predicting the ASR for aggregates in field conditions based on international research data. For example, Sirivatnanon et al. (2016) showed that AS 1141.60.1 and AS 1141.60.2 are relatively good tests, but AS 1141.60.2 concrete prism test is found to be more reliable than AS 1141.60.1. As can be inferred from this study, the reducing effects of the different materials on ASR can be changed by the test method. Therefore, this point can be compared in the future by researchers. All other concrete meeting the minimum 20% requirement was exempt of additional testing for reactivity. Fly ash with a maximum total alkali content of 2%, and a maximum available alkali content of 0.5%, was required. For ground granulated blast furnace slag the corresponding contents were 1%, and 0.5%, respectively.

## 5. Laboratory tests to investigate the ASR

### 5.1. Materials and methods

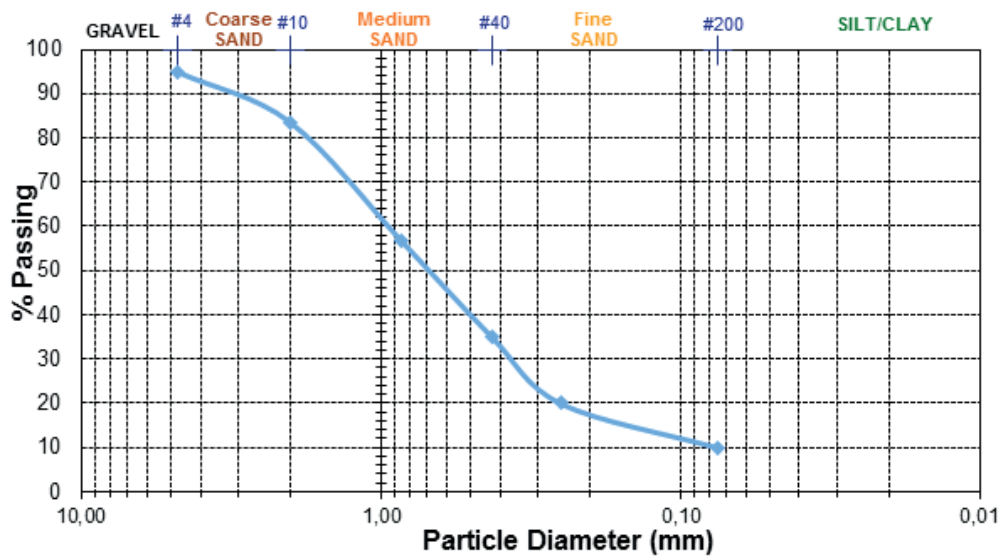
The aggregate sizes were between 0-5 mm and they were sand. Three different aggregate types were used for investigation. The laboratory tests were conducted, and one aggregate type was determined as harmless for ASR, because according to CSA A23.2 25A test method, the expansion of harmless aggregate was nearly zero. Other two aggregate types could be affected by ASR, which





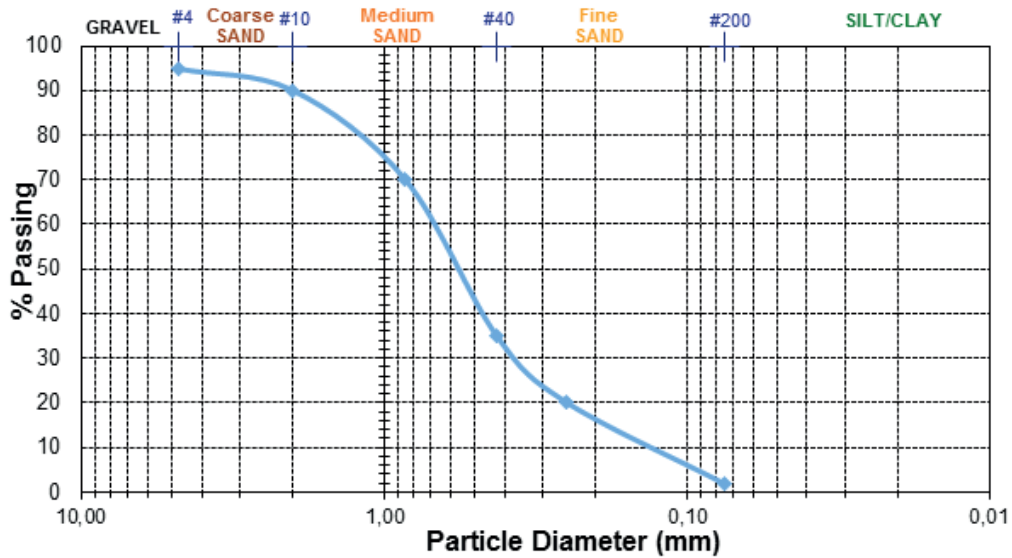
Rys. 3. Zastosowanie różnych dodatków do ograniczania ekspansji wywołanej kruszywem reaktywnym

Fig. 3. Reduction of expansion caused by reactive aggregate through various additives



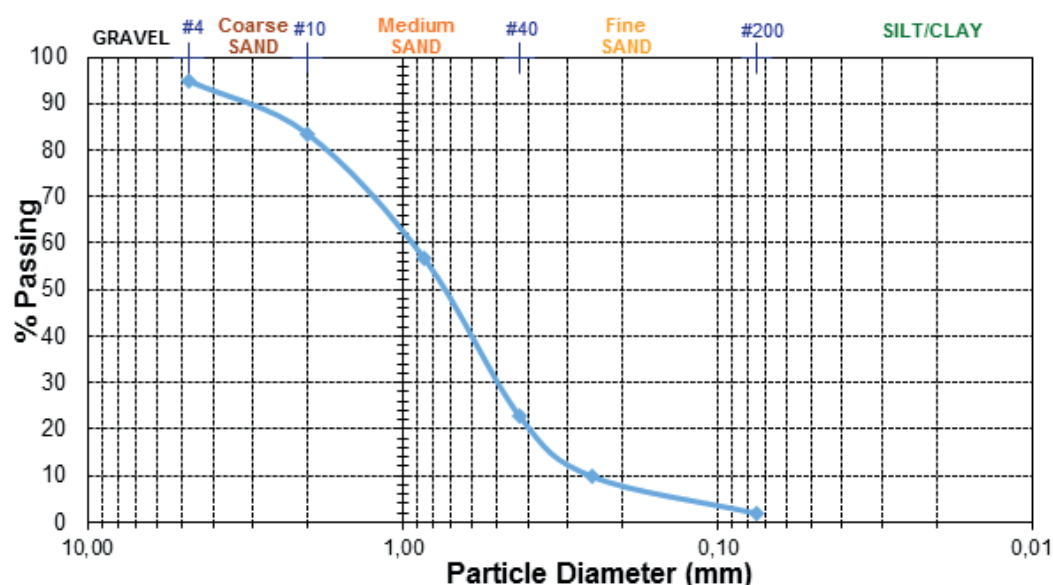
Rys. 4. Krzywa uziarnienia kruszywa A

Fig. 4. Grain size distribution curve of aggregate A



Rys. 5. Krzywa uziarnienia kruszywa B

Fig. 5. Grain size distribution curve of aggregate B



Rys. 6. Krzywa uziarnienia kruszywa niereaktywnego

Fig. 6. Grain size distribution curve of non-reactive aggregate

Badania przeprowadzono w celu porównania spowalniającego działania dodatku żużla oraz kruszywa niereaktywnego na reakcję wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką. Próbkę zapraw przygotowano zgodnie z przyspieszoną metodą kanadyjską CSA A23.2-25A. Beleczki zapraw miały wymiary 25 mm x 25 mm x 285 mm. Średni stosunek wodno/cementowy wynosił 0,47, zaś stosunek kruszywa do cementu 2,25. Próbkę rozformowano po 24 godzinach dojrzewania. Następnie wykonywano pierwszy pomiar długości próbek. Po zmierzeniu długości, próbki umieszczano w wodzie w temperaturze 80°C. Po 24±2 godzinach powtórzono pomiar długości. Następnie próbki przetrzymywano w roztworze wodorotlenku sodu o stężeniu 1 mol/dm<sup>3</sup> przez 3, 7 i 14 dni w temperaturze 80°C. Mierzono długość próbek po każdym z tych okresów. Wynik był średnią z pomiaru ekspansji trzech próbek. Jako wartość graniczną dla występowania szkodliwej reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu przyjęto 0,15%.

W pierwszej kolejności w ramach badań dotyczących ograniczenia reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu zbadano zaprawę, w której kruszywa reaktywne A i B mieszano z kruszywem niereaktywnym w proporcjach 50% / 50% oraz 75% / 25% i porównywano z zaprawą zawierającą wyłącznie kruszywo niereaktywne. Następnie przygotowano próbki zapraw z kruszywami reaktywnymi, w których 20% cementu zastępowano żużlem wielkopieczowym. Wyniki powinny pokazać spowalniające działanie żużla na reakcję wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką. Porównano te dwie metody i uzyskane wyniki były podstawą do dyskusji.

## 5.2. Wyniki

Na rysunkach 7 i 8 pokazano wyniki badania ekspansji próbek zapraw zawierających mieszanki kruszyw reaktywnych A i B oraz kruszywa niereaktywnego. W tabelicy 3 podano oznaczenia zapraw oraz proporcje kruszyw i dodatek żużla zastosowany w celu ograniczenia reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu.

are A and B. Table 1 and Figs. 4, 5 and 6 show the properties of these aggregates. CEM I 42.5R was used in the experiments. The content of Na<sub>2</sub>O in the cement is about 0.98%. The properties of the blast furnace slag are given in Table 2. The addition of blast furnace slag to cement was 20%.

In this study the tests were conducted to compare the slag and harmless aggregate mixing with the reactive aggregate, in order to determine their mitigating effects. Mortar bars were prepared according to the Canadian Accelerated Mortar Bar Method (CSA A23.2-25A). Their sizes were 25x25x285 mm. The average water/cement ratio was 0.47, and aggregate/cement ratio was 2.25. Samples were demolded after 24±2 hours from casting. Then, first length measurements were made. After the measurements the samples were placed in pure water at a temperature of 80°C. After immersion 24±2 hours in water, the length measurements were repeated. After these measurements the samples were stored for 3, 7 and 14 days in 1 N NaOH solution at 80°C and after each of these periods the length of the specimens were measured. The result is the average of the expansion of three mortar bars. The harmful limit value was taken as 0.15%.

As mitigating tests, firstly, the A and B aggregate samples were mixed with harmless aggregate at different rates (50/50%, 75/25%) and for comparison the bars of aggregates without harmless aggregate addition. Subsequently, only 20% of the cement was replaced by slag and used for concrete samples preparation with reactive aggregates; the results should show the mitigating effect of slag on ASR. These different methods were compared and the results were the basis for the discussion.

## 5.2. Test results

Figs. 7 and 8 show the elongation = expansion of concrete samples obtained by mixing the harmless aggregate in different proportion with the aggregates A and B. Table 3 gives the addi-

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY MIESZANEK KRUSZYW

COMPOSITION OF AGGREGATES MIXTURE

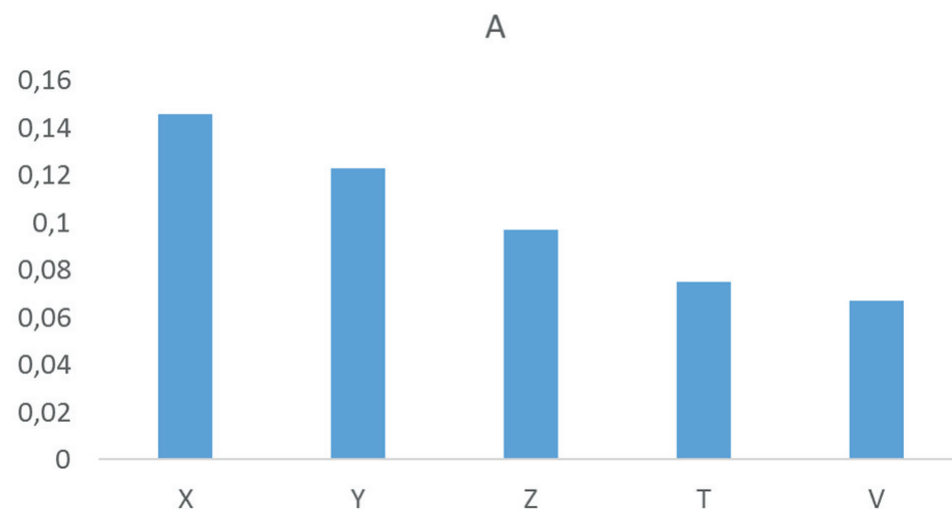
Oznaczenie / Experiment designation	X	Y	Z	T	V
Zawartość kruszyw A lub B / Content of aggregate A or B, %	100	75	50	100	75
Zawartość kruszywa niereaktywnego / Content of harmless aggregate, %	0	25	50	0	25
Dodatek żużla do cementu / Addition of slag to cement, %	0	0	0	20	20

Tablica 4 / Table 4.

EKSPANSJA BELECZEK ZAPRAW ZAWIERAJĄCYCH KRUSZYWA O RÓŻNYCH SKŁADACH

EXPANSION AS ELONGATION IN % OF BARS FOR DIFFERENT AGGREGATE COMPOSITION IN CONCRETE

Kruszywo / Aggregate	Wydłużenie beleczek zapraw z różnymi składami kruszyw Elongation of bars with different aggregate composition, %					
	Dni / Days	X	Y	Z	T	V
A	3	0.016	0.009	0.009	0.009	0.011
	7	0.045	0.02	0.035	0.255	0.025
	14	0.146	0.123	0.097	0.075	0.067
B	3	0.036	0.009	0.037	0.022	0.07
	7	0.14	0.153	0.09	0.087	0.046
	14	0.352	0.220	0.188	0.151	0.1



Rys. 7. Ekspansja belek betonowych z kruszywem A po 14 dniach

Fig. 7. Expansion of concrete beams with aggregate A after 14 days

Przygotowano pięć różnych składów zapraw. W tablicy 4 przedstawiono ekspansję badanych zapraw. Wydłużenie próbek jest po 14 dniach większe od wartości granicznej 0,15% w przypadku kruszyw reaktywnych A i B, zastosowanych bez żadnej metody zmniejszania postępu reakcji. W związku z tym, jeśli te kruszywa byłyby zastosowane w betonowej nawierzchni drogowej, należało oczekiwać szkodliwej reakcji krzemionki z wodorotlenkiem sodu i potasu, powodującej spękanie betonu. Zastosowanie takich kruszyw do produkcji betonu bez odpowiedniej metody ograniczenia reakcji korozyjnej jest niewskazane. Z tego wzglę-

tion levels of aggregates and slag for improvement the concrete properties. The adjustments of all tests are given also in Table 3, also. Five different methods were used in the tests as it can be seen from Table 3. Additionally, the percentages of length change for different days are given for each test result in Table 4. As it can be observed, the 14-day elongations are higher than 0.15%, which is the elongation limit for ASR, when A and B aggregates were used, without improvement methods. Therefore, if these aggregates will be used in the concrete roads, ASR will be found to be detrimental for concrete, and the cracks can occur. It would be impossible to use only this aggregate for concrete pavement production. For this reason, the reactive aggregate should be mixed with another aggregate, known to be harmless, at different ratios or the slag can be used, to assure the mitigating effect.

As it can be seen from the test results [Table 4], 3 and 7 days curing of concrete are not sufficient for assessment of mitigating results. However, the improving effects can be seen more clearly after 14 days. When comparing the results for 3 and 7 days there are not a changes proportional to the harmless aggregate addition for A and B aggregates, but for 14 days there are a linear change for both of them. Figure 9 and

10 illustrate the elongation values for different tests after 14 days. For both of the aggregates, A and B, the mitigating in the elongation ratios decreases with the decreasing of the reactive aggregates content, due to the harmless aggregate addition. Additionally, the slag application the maximum mitigating effect is assuring. It can be observed from Fig. 9 that when the reactive aggregate is mixed with harmless aggregate, improving addition is different. However, curve lines for addition ratio-improving ratio are parallel to each other, although their line correlation formulas are different. Equation 2 and 3 shows these formulae.



du w celu ograniczenia reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu reaktywne kruszywa powinny być mieszane w różnych proporcjach z innym kruszywem, które jest niereaktywne, ewentualnie powinien zostać użyty dodatek żużla.

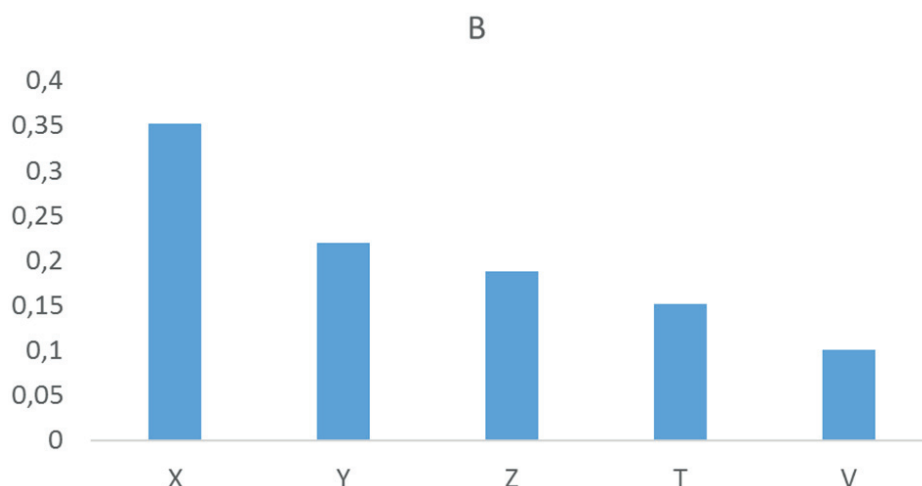
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że po 3 i 7 dniach nie stwierdzono spowalniającego działania zastosowanych metod. Korzystne efekty były wyraźnie widoczne po 14 dniach. Porównanie wyników po 3 i 7 dniach pokazuje, że zmiany nie są proporcjonalne do dodatku reaktywnych kruszyw A i B. Po 14 dniach natomiast występuje liniowa zależność w przypadku obu tych kruszyw. Na rysunkach 9 i 10 pokazano wartości wydłużenia próbek zapraw po 14 dniach. Dla obu kruszyw ograniczenie ekspansji zmniejsza się ze zmniejszaniem się zawartości reaktywnego kruszywa. Najlepsze wyniki uzyskano w zaprawach z dodatkiem żużla. Na rysunku 9 pokazano, że gdy kruszywo niereaktywne mieszane jest z kruszywami reaktywnymi, ilość powodująca poprawę jest różna. Jednakże linie obrazujące zależność dodatek – ograniczenie reakcji są równoległe względem siebie, pomimo, że równania je opisujące są różne. Równania te to odpowiednio:

$$y_A = 1039,3x_A - 24,538 \quad [2]$$

$$y_B = 723,37x_B - 94,839 \quad [3]$$

gdzie: y to współczynnik ograniczenia ekspansji [%], zaś x to zawartość kruszywa niereaktywnego. Innymi słowy, zmiany ekspansji zapraw pod wpływem dodatku kruszywa niereaktywnego są w przypadku obu kruszyw opisywane prostymi, o podobnych współczynnikach kierunkowych. Oznacza to, że każde z kruszyw ma inne wartości zmian, jednak względna poprawa odporności na korozję może być podobna dla obu kruszyw.

Na rysunku 10 pokazano poprawę odporności na korozję betonów z kruszyw A i B, z dodatkiem żużla. Zastosowanie żużla jako składnika spoiwa jest bardziej skuteczne w przypadku kruszywa B. Jest to zgodne z doniesieniami literaturowymi, według których każde kruszywo zachowuje się w inny sposób gdy do spoiwa doda się żużel. W związku z tym uzyskane wyniki są porównywalne z wynikami literaturowymi. Zastosowanie jednocześnie dodatku żużla oraz niereaktywnego kruszywa daje najlepsze wyniki. Uzyskany wynik



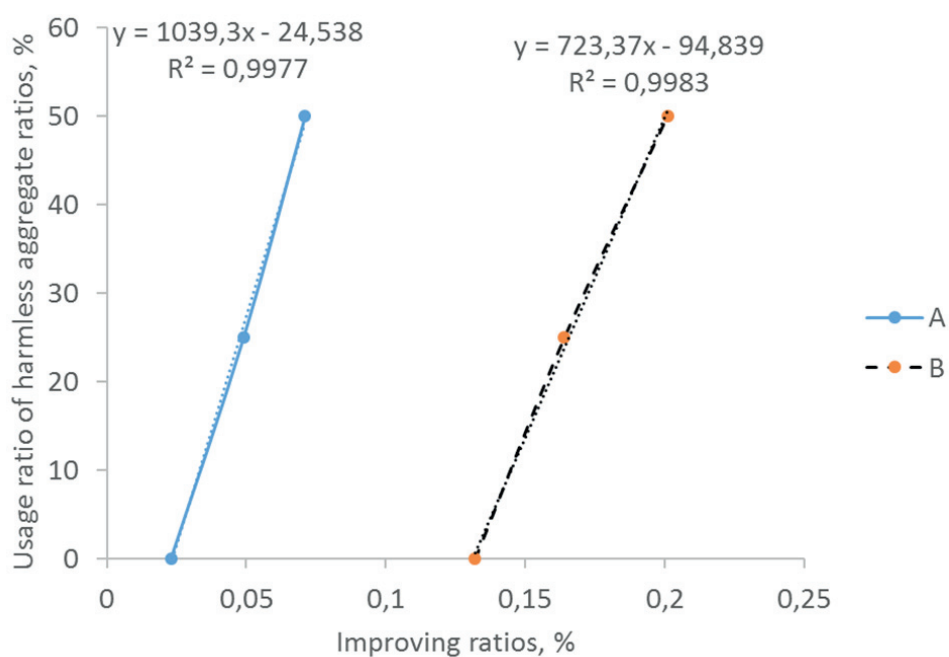
Rys. 8. Ekspansja belek betonowych z kruszywem B po 14 dniach

Fig. 8. Expansion of concrete beams with aggregate B after 14 days

$$y_A = 1039,3x_A - 24,538 \quad [2]$$

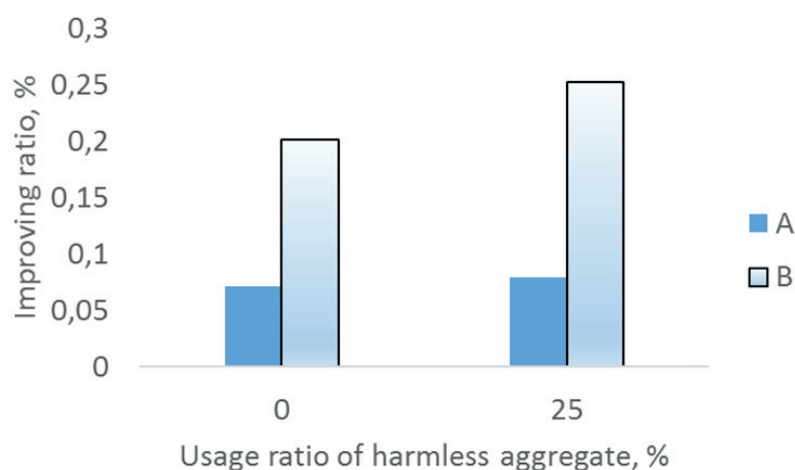
$$y_B = 723,37x_B - 94,839 \quad [3]$$

where y is improving ratio (%) and x is the addition level of harmless aggregate in %. In other words, both aggregate types with addition of harmless aggregate give the similar angle of correlation with improving effect. This means that each aggregate types can have a specific improving value, but the changing degree and their behaviors i.e. improvement can be similar. Fig. 10 shows the improvement effect when slag was used in concretes with A and B aggregates. The addition of slag as a binder i.e. to cement is more effective for B aggregate than for aggregate A. It is in accordance with the other papers which can be found in literature, which are stating that each aggregate can behave differently in the case of



Rys. 9. Zmniejszenie ekspansji betonu z dodatkiem niereaktywnego kruszywa

Fig. 9. Degree of improvement in concrete expansion by adding non-reactive aggregate



Rys. 10. Wpływ dodatku niereaktywnego kruszywa oraz żużla na ograniczenie reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu

Fig. 10. Improving addition of harmless aggregate in simultaneous application with slag

nie jest jednak sumą wyników uzyskanych dla obu dodatków, wprowadzonych osobno. W związku z tym, można stwierdzić, że niereaktywne kruszywo może być stosowane razem z dodatkiem żużla aby uzyskać większą poprawę odporności na reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu. Z drugiej strony żużel może mieć większy wpływ w zapobieganiu szkodliwej RSPK gdy dodawany jest razem z niereaktywnym kruszywem. Uzyskane wyniki można uznać za ważną metodę ograniczania następstw szkodliwej reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu.

## 6. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu wyciągnąć można następujące wnioski:

1. Właściwości kruszywa mają duże znaczenie dla reakcji z wodorotlenkami sodu i potasu. Reakcja ta w przypadku kruszywa zawierających reaktywną krzemionkę może być ograniczona różnymi metodami.
2. Stwierdzono, że większość metod ograniczania szkodliwej reakcji umożliwia jej zmniejszenie, jednakże każda z metod ma inną skuteczność.
3. Zgodność rodzaju cementu oraz użytego dodatku mineralnego jest ważna z punktu widzenia ograniczania reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu
4. Zmieszanie kruszywa reaktywnego z niereaktywnym może zmniejszyć pękanie spowodowane reakcją krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu
5. Wpływ dodatków mineralnych na reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu może być różny. W przypadku stosowania domieszek chemicznych, na wielkość ekspansji mogą mieć wpływ; zawartość wodorotlenków sodu i potasu oraz dodatek litu. Dodatkowo zastosowanie w ostatnich latach odpadowych włókien oraz stłuczki szklanej pokazało, że reakcja krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu może być także zmniejszona.

slag application as binder. Hence, the tests in this study are compatible with the literature. Both, harmless aggregate and slag simultaneous addition to the concrete with reactive ones, the mitigating of ASR is higher. However, this effect is not the same as the summary effect of their individual influences. Therefore, taking into account this information it can be said that harmless aggregate can be used to obtain higher improvement when added simultaneously with slag. As a result, this study shows that the slag can be more effective when added together with harmless aggregate. This result can be considered as the important way to mitigate the effects of the ASR.

## 6. Conclusions

From the results of this study and of the literature survey of the ASR problem for concrete pavements the following conclusions can be drawn:

1. It has been shown that most of the mitigating methods can reduce ASR, but each method has different levels of effectiveness.
2. The compatibility of the cement type and the mineral additives used is important for ASR mitigation.
3. When reactive concrete is mixed with harmless one the ASR cracks can be reduced.
4. The effect of mineral additives on ASR varies. In the case of chemical admixtures application, the ASR expansions may be changed according to the molar ratio of lithium addition to the content of soluble Na and K. Additionally, the use of waste fibres and culets of various glass, verified in recent years, has shown that ASR expansion can be effectively reduced.
5. The additive produced from the waste platforms can reduce the alkali silica expansion and this can give an eco-friendly selection.
6. Test results conducted in the study show the importance of the slag effect which can be higher than addition of harmless aggregate, in order to reduce the reactive aggregate share.
7. Different aggregates can behave differently in mitigating the expansion, but improving share can give similar line of correlation harmless aggregate addition – ratio of ASR expansion reduction. This means that by using the correlation equations the improving share can be assessed.

## Acknowledgement

Writer thanks for support to Hacettepe University Scientific Research Projects Coordination Unit (no:FDS-2015-8791).

6. Dodatki produkowane z odpadów mogą ograniczać ekspansję spowodowaną przez reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu, co pozwala na zastosowanie rozwiązań przyjaznych środowisku.
7. Przeprowadzone badania pokazały znaczenie żużla jako dodatku ograniczającego reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu bardziej skutecznie niż zastosowanie niereaktywnego kruszywa. Zastosowanie żużla umożliwia ograniczenie ilości wprowadzanego do mieszanki kruszywa niereaktywnego.
8. Różne kruszywa mogą w różny sposób ograniczać ekspansję. Zmiany odporności betonu powodowane dodatkiem kruszywa niereaktywnego mogą być opisywane podobnymi krzywymi korelacji, co umożliwia łatwe obliczenie i przewidywanie zmian powodowanych przez dodatek takiego kruszywa.

## Podziękowania

Autorka dziękuje za wsparcie Jednostce Koordynującej Projekty Badawcze na Uniwersytecie Hacettepe (nr FDS-2015-8791).

## Literatura / References

1. AS 1141.60.1, Methods for Sampling and Testing Aggregates Part 60.1: Alkali Aggregate Reactivity-Accelerated Mortar Bar Method.
2. AS 1141.60.2, Methods for Sampling and Testing Aggregates Part 60.2: Alkali Aggregate Reactivity-Concrete Prism Method. Sydney.
3. W. F. Cole, C. J. Lancucki, M. J. Sandy, Products formed in an aged concrete, *Cem. Concr. Res.*, **11**, 3, 443–454, (1981), DOI: 10.1016/0008-8846(81)90116-2.
4. CSA-A23.1, "Concrete Materials and Methods of Concrete Construction", Appendix B, Alkali-Aggregate Reaction, CAN/CSA-A23.1, Canadian Standards Association, Toronto, Canada 2004.
5. S. Diamond, N. Thaulow, "Study of expansion due to ASR as conditioned by the grain size of the aggregate." *Cem. Concr. Res.*, **4**, 4, 591-607, (1974).
6. C. F. Dunant, K. L. Scrivener, "Effects of aggregate size on alkali-silica-reaction induced expansion." *Cem. Concr. Res.*, **42**, 745–751, (2012) DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.02.012.
7. J. A. Farny, K. Beatrix, "Concrete technology: diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete", Portland Cement Association 2007.
8. Federal Highway Administration. "The Use of Lithium to Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements and Structures." Department of Transportation 2007.
9. Federal Highway Administration "Selecting Measures to Prevent Deleterious Alkali-Silica Reaction in Concrete- Rationale for the AASHTO PP65 Prescriptive Approach." U.S. Department of Transportation 2012.
10. P. E. Grattan-Bellew, "Alkali contribution from limestone aggregate to pore solution of old concrete", *ACI Materials Journal*, **91**, 2, 173- 177 (1994).
11. S. Han, M. Fang, "Alkali-aggregate reaction under high temperature, high pressure and high alkali content." *Journal of Nanjing Institute of Chemical Technology*, **2**, 1-10 (1984).
12. R. Helmuth, "Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research." SHRP-C-342, Strategic Highway Research Program, Washington, D. C., Also PCA Publication LT177 (1993).
13. D. Hernandez-Cruz, C. W. Hargis, J. Dominowski, M. J. Radler, P. M. J. Monteiro, "Fiber reinforced mortar affected by alkali-silica reaction: A study by synchrotron microtomography." *Cem. Concr. Comp.*, **68**, 123-130 (2016), DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.02.003.
14. Highway Technical Specification, General Directorate of Highways, 2013.
15. D. W. Hobbs, W. A. Gutteridge, "Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction." *Mag. Concr. Res.*, **31**, 109, 235-242 (1979).
16. A. Horvath, H. Chris, "Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements." *Transportation Research Record*, **1626**, 105-113 (1998), DOI: 10.3141/1626-13.
17. Y. Kawabata, K. Yamada, "The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion", *Cem. Concr. Res.*, **92**, 1-15 (2017), DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.11.002.
18. J. Lindgard, Ö. A. Çakır, I. Fernandes, T. F. Ronning, M. D. A. Thomas, "Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing." *Cem. Concr. Res.*, **42**, 223-243 (2012), DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.10.004.
19. L. J. Malvar, G. D. Cline, D. F. Burke, R. Rollings, T. W. Sherman, J. L. Greene "Alkali- Silica Reaction Mitigation: State of the art and Recommendations." *ACI Materials Journal*, **99**, 480-489 (2002).
20. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro "Concrete microstructure, properties and materials", 659, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1993.
21. S. Multon, F. Toutlemonde, "Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures" *Cem. Concr. Res.*, **40**, 6, 924–34 (2010), DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.01.011 .
22. S. Nayir, "Investigation on the effects of mineral additives in mitigating of alkali-silica reaction", KTU, 2015.
23. A. M. Neville, "Properties of Concrete." John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A, 1997.
24. Z. Owsiak, J. Zapala-Sławeta, „The lithium nitrate effect on the concrete expansion caused by alkali-silica reaction in concrete of gravel aggregate”, *Cement Wapno Beton*, **82**, 25 (2015).
25. K. Ramyar, A. Topal, Ö. Andıç, "Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction." *Cem. Concr. Res.*, **35**, 11, 2165-2169 (2005).
26. A. Sacconi, M. C. Bignozzi, "ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete." *Cem. Concr. Res.*, **40**, 531–536 (2010), 10.1016/j.cemconres.2009.09.003.
27. A. K. Saha, P. K. Sarker, "Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars." *Construction and Building Materials*, **123**, 135–142 (2016), DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.144.
28. A. Shayan, R. Diggings, I. Ivanusec "Effectiveness of Fly Ash in Preventing Deleterious Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction in Normal and Steam-Cured Concrete." *Cem. Concr. Res.*, **26**, 1, 153-164 (1996), DOI: 10.1016/0008-8846(95)00191-3.
29. R. G. Sibbick, C. L. Page "Threshold alkali contents for expansion of concrete containing British aggregates." *Cem. Concr. Res.*, **22**, 990-994 (1991), DOI: 10.1016/0008-8846(92)90123-D.
30. V. Sirivatnanon, J. Mohammadi, W. South, "Reliability of new Australian test methods in predicting alkali silica reaction of field concrete." *Construction and Building Materials*, **126**, 868–874 (2016), DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.055.
31. Standards Australia, Aggregates and Rock for Engineering Purposes (AS 2758.1-98), 1998.
32. Standards Australia, Method for Sampling and Testing Aggregates (2014) Potential Alkali Silica Reactivity – Accelerated Mortar Bar Method (AS 1141.60.1-14).



33. D. Stark, B. Morgan, P. Okamoto, "Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity", Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington 1993, DC, 266.
34. Sydney 2014, K. Afshinnia, A. Poursaee, "The influence of waste crumb rubber in reducing the alkali-silica reaction in mortar bars", *Journal of Building Engineering*, **4**, 231-236 (2015), DOI: 10.1016/j.jobbe.2015.10.002.
35. R. N. Swamy, M. M. Al-Asali, "Expansion of concrete due to ASR." *ACI Materials Journal*, **85**, 1, 33-40 (1988).
36. W. E. Touma, D. F. Fowler, R. L. Carrasquillo, "Alkali-silica Reaction in Portland cement Concrete: Testing methods and Mitigation Alternatives", Performing Organization Report No. Research Report ICAR 301-1F, International Center for Aggregates Research, The University of Texas at Austin, Texas and Texas A & M University College Station, Texas. 2001.
37. K. Voland, F. Weise, B. Menga, "Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements", *Key Engineering Materials*, **711**, 714-721 (2016), DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.711.714.
38. T. Williamson, M. C. G. Juenger, "The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete", *Cem. Concr. Res.*, **83**, 124-130 (2016), DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.02.008.
39. H. Woods, "Durability of Concrete Construction." Michigan: American Concrete Institute 1968.
40. C. Zhang, A. Wang, M. Tang, B. Wu, N. Zhang, "Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion." *Cem. Concr. Res.*, **29**: 1393-1396 (1999), DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00099-X.
41. K. Zheng, "Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction", *Cem. Concr. Comp.*, **67**, 30-38 (2016), 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008.