

Wpływ azotanu litu na ekspansję betonu spowodowaną reakcją alkaliów z kruszywem żwirowym

The lithium nitrate effect on the concrete expansion caused by alkali-silica reaction in concrete of gravel aggregate

1. Wprowadzenie

Reakcja wodorotlenków sodu i potasu z kruszywem zachodzi w roztworze w porach betonu z pewnymi krzemionkowymi składnikami kruszyw, prowadząc do destrukcji i pęknięcia betonu (1, 2). Reaktywność kruszywa jest związana z jego pochodzeniem geologicznym, składem mineralogicznym oraz teksturą. Do szybko reagujących kruszyw należą przede wszystkim pochodzące z piroklastycznych oraz klastycznych, chemicznych i biochemicznych skał osadowych.

Kruszywa wolno reagujące pochodzą ze skał plutonicznych i metamorficznych (3, 4).

Obok reakcji wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką jest również możliwa ich reakcja z kruszywem dolomitowym, która jest związana z obecnością w tym kruszywie magnezu (5, 6). Określenie reaktywności kruszywa żwirowego, zawierającego w swoim składzie okruchy skał o różnych właściwościach jest trudne. Jednak kruszywa te są powszechnie stosowane do produkcji betonu. Z tego względu ograniczenie niekorzystnego wpływu reaktywności kruszywa żwirowego ma duże znaczenie.

Zastosowanie związków litu jako czynnika zapobiegającego destrukcyjnej reakcji kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu zostało po raz pierwszy zaproponowane w 1950 roku przez McCoya i Cadwella (7). Przeprowadzone badania wykazały, że najlepsze wyniki w zapobieganiu niekorzystnym skutkom tej reakcji dawał azotan litu (8, 9). Azotan litu nie wpływa na pH roztworu w porach betonu, jest solą dobrze rozpuszczalną w wodzie. Niestety mechanizm działania azotanu litu na reakcję kruszywa z jonami sodu i potasu nie jest dobrze poznany. Hipotezy dotyczące tego mechanizmu zakładają między innymi zmianę właściwości żelu uwodnionego krzemianu sodowo-potasowego przez jony litu, zmianę elektrycznej warstwy podwójnej wokół żelu, lub powstawanie ochronnej warstewki krzemianu litu na powierzchni krzemionki (10, 11).

1. Introduction

The reaction of sodium and potassium hydroxides occurs in concrete pore solution with certain siliceous aggregate constituents, and leads to concrete destruction and cracking (1, 2). The aggregate reactivity is closely connected with its geological origin, mineralogical composition and texture. Fast-reacting aggregates include primarily pyroclastic as well as clastic rocks, chemical and biochemical sedimentary rocks. Slowly-reacting aggregates include plutonic and metamorphic rocks (3, 4).

Apart from the reaction of sodium and potassium hydroxides the reaction with dolomite aggregate is also possible, which is linked with the magnesium ions present in this aggregate (5, 6). The defining of the reactivity of the gravel aggregate, composed of the rocks grains with different properties, is particularly complex. Nevertheless, this aggregate is commonly applied in the production of concrete. Thus the elimination of harmful influence of gravel aggregate reactivity is an issue of significant importance.

McCoy and Cadwell (7) were the first which already in 1950 proposed the application of lithium compounds in order to inhibit the destructive effect of the reaction of aggregate and alkalis. The studies have shown that the best results in prevention of the harmful effect of the alkali-aggregate reaction has lithium nitrate (8, 9). Lithium nitrate does not influence the pore solution pH, and is a salt well-soluble in water. Unfortunately, the mechanism of the lithium nitrate action on the reaction of alkalis with the aggregate is still not well examined. The hypotheses concerning this mechanism are among other admitting the modification of the properties of the gel of hydrated sodium-potassium silicate by the lithium ions, the change of electrical double-layer around the gel, or the formation of a protective layer of lithium silicate on the surface of silica (10, 11). The decrease of harmful AAR effect has been attributed by some authors to the properties of this ion which has a smaller radius than the sodium and potassium ions, but higher hydrated radius, caused by higher ionic potential (12-13). Simultaneously, with the decrease of hydrated ion radius its sorption ability on the surface

Skuteczność jonów litu w ograniczaniu niekorzystnych efektów reakcji alkaliów z kruszywem jest upatrywana przez niektórych autorów we właściwościach jonu litu, który ma mniejszy promień jonowy od jonów sodu i potasu, jednak większy promień po hydratacji, ze względu na większy potencjał jonowy (12-14). Równocześnie im mniejszy jest jon po hydratacji tym większa jego zdolność sorpcyjna na powierzchniach różnych faz. Zatem jony potasu i sodu powinny być łatwiej wiązane przez cząstki krzemionki niż jony litu. Z badań wynika jednak, że stężenie jonów litu w roztworze w porach betonu maleje wraz z postępem reakcji, podczas gdy stężenia jonów sodu i potasu pozostają na stałym poziomie (15). Iler (16) uważa, że duży uwodniony jon litu jest słabiej wiązany przez krzemionkę od jonów sodu czy potasu, co zapobiega polimeryzacji żelu. Inna hipoteza przypisuje większe znaczenie potencjałowi jonowemu litu (17). Jony litu powodują, że powstający żel uwodnionego krzemianu sodu i potasu odznacza się mniejszym stopniem ekspansji.

Duże znaczenie w ekspansji wywołanej reakcją kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu odgrywają jony wapnia, jednak ich rola nie została w pełni wyjaśniona. Hipotezę o dużej roli $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wysunął już w 1944 roku Hansen (20), a następnie zagadnienie to badali Owsiak (18) i Chatterji (21). Wiadomo, że w przypadku bardzo małej zawartości jonów wapnia w roztworze nawet duża zawartość sodu i potasu nie powoduje ekspansji. Jony wapnia mogą zastępować w produkcie reakcji jony sodu i potasu, umożliwiając ich dalszą reakcję z krzemionką i powstawanie większej ilości żelu (18 – 20). Doświadczenia wykazały także, że zawartość wapnia w żelu jest zmienna, żele bogate w wapń powstają w większych odległościach od reaktywnych ziaren krzemionki (17). Natomiast w przypadku dodatku azotanu litu do zaprawy przypuszczalnie jest więcej wapnia w żelu, a jak wykazali Struble i Diamond (24) taki żel wykazuje mniejszą ekspansję.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

W badaniach stosowano cement portlandzki CEM I 42,5R o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,66\%$. Skład chemiczny cementu podano w tablicy 1.

Jako reaktywne kruszywo stosowano polodowcowe kruszywo żwirowe. Analiza rentgenograficzna kruszywa wskazała, że w jego skład wchodzi znaczne ilości kwarcu, kalcytu, plagioklazów z przewagą skalenia, a także minerały ilaste (illit, kaolinit), oraz niewielkie ilości dolomitu. Analiza petrograficzna ziaren kruszywa żwirowego wykonana zgodnie z normą PN-92/B-06714-46 pozwoliła na identy-

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU

CEMENT CHEMICAL COMPOSITION

| Składnik | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | SO_3 | K_2O | Na_2O | TiO_2 | LOI ¹ | Cz.n.r. ² | Na_2O_e |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------|------|---------------|----------------------|-----------------------|----------------|------------------|----------------------|-------------------------|
| Zawartość | 20,20 | 4,80 | 3,00 | 61,70 | 1,80 | 2,70 | 0,78 | 0,15 | 0,45 | 3,00 | 1,00 | 0,66 |

¹ LOI – Loss on ignition, Cz.n.r. – non soluble residue

on different phases is increasing. Thus the sodium and potassium ions should be easier bound by the silica particles than the lithium ions. However, it is evident from the experiments that the lithium ions concentration in the concrete pore solution is decreasing with the reaction development, while the concentration of sodium and potassium ions remain on constant level (15). Iler (16) is of the opinion that the hydrated lithium ions form weaker bond with silica than the sodium and potassium ions that prevents the gel polymerisation. Another hypothesis is attributing the higher importance to the lithium ionic potential (17). The lithium ions effect is lowering the expansion ability of hydrated sodium –potassium gel.

The importance on the destructive role of aggregate reaction with the alkali hydroxides of calcium ions is significant, but it is not fully understand. The hypothesis of the importance of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was developed already 1944 by Hansen (20) and then the problem was examined by Owsiak (18) and Chatterji (21). It is known that in the case of low concentration of calcium in solution even high content of sodium and potassium did not lead to expansion. Calcium ions can substitute potassium and sodium ions in the gel, giving the possibility of their further reaction with silica, with formation of new gel quantity (18-20). The experiments have also shown that the calcium content in the gel is changeable in the case of addition of lithium nitrate to the mortar, more calcium is probably incorporated into the gel than in the case when no lithium is used. As Struble and Diamond (24) have shown it is linked with lower expansion of the gel.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Portland cement CEM I 42,5R with the alkali content of 0.66% of Na_2O_e was used in experiments. The chemical composition of cement is shown in Table 1. To study the influence of the alkali content in cement on alkali-silica reaction two additional samples of cement were prepared to which K_2SO_4 was added in such a quantity that the Na_2O_e was equal to 0.9% and 1.1%.

The post-glacial gravel aggregate was used as the reactive aggregate. The XRD of the aggregate showed that its composition is reach in quartz, calcite, plagioclase (mostly feldspar), as well as clay minerals (illite, kaolinite) and a minor content of dolomite. The petrographic analysis of the gravel aggregate grains according to the PN-92/B-06714-46 standard assessed the mineral composition of the reactive grains (20). The reactive aggregate grains are including organodetritic sparite-micrite limestone, metamorphic quartz-pyroxene shale with opal binder, quartz-glaucinite sand-

fikację składników reaktywnych. Są nimi wapień organodetrytyczny sparytowo-mikrytowy, metamorficzny łupek kwarcowo-piroksenowy o spoiwie opalowym, piaskowiec kwarcowo-glaukonitowy o spoiwie ilasto-węglanowym z dodatkiem chalcedonu oraz ziarna kwarcu w granicie skaleniowo-biotytowym. Składniki reaktywne stanowią około 49 % masy badanego kruszywa.

2.1. Metody badań

Do oceny reaktywności kruszywa żwirowego zastosowano metodę badania odkształceń liniowych zapraw, zgodnie z normą ASTM C227. Z zapraw wykonano beleczki o wymiarach 25x25x250 mm bez dodatku oraz z dodatkiem azotanu litu. Lit dodawano do zapraw wraz z wodą zarobową, zachowując stosunek molowy Li/Na+K równy 0,74, dodając równocześnie do cementu K_2SO_4 w takiej ilości aby ekwiwalent sodowy Na_2O_e wynosił, poza wyjściowym stężeniem 0,66%, 0,9% Na_2O_e oraz 1,1 % Na_2O_e . Beleczki zapraw przechowywano w zamkniętej komorze, nad lustrem wody, w temperaturze 38°C. Pomiary długości beleczek wykonano po 14, 30, 60, 90, 180, 270 dniach. Ponadto badano mikrostrukturę zapraw pod elektronowym mikroskopem skaningowym, z mikroanalizą rentgenowską.

3. Wyniki badań

Na powierzchni próbek, bez dodatku litu oraz z jego dodatkiem, z cementów o różnej zawartości alkaliów występowały liczne wycieki (rysunek 1). Nie zauważono różnic w intensywności powstających wycieków w zależności od zawartości alkaliów i dodatku azotanu litu w cementach, z których wykonano zaprawy.

Wyniki badań ekspansji próbek bez i z dodatkiem azotanu litu, w przypadku trzech różnych zawartości alkaliów przedstawiono na rysunkach 2-4. W przypadku zapraw z dodatkiem azotanu litu, i trzech zawartości alkaliów nastąpiło zmniejszenie wielkości ekspansji do poziomu bezpiecznego, a więc nie przekraczającego 0,05%. Zakresy dopuszczalnej rozszerzalności próbek, a tym samym niegroźnej reaktywności kruszywa, zostały oznaczone na rysunkach 2-4 za pomocą czerwonej linii. Rozszerzalność przekraczająca 0,05% przed dziewięćdziesiątym dniem oraz 0,10% po 90 dniach wykazuje, że kruszywo jest potencjalnie reaktywne.

stone with clay-carbonate binder containing chalcedony, and quartz grains in feldspar-biotite granite. Reactive grains content is around 49% by mass of the aggregate.

2.2. Methods

The aggregate reactivity was examined according with the ASTM C227 standard and mortar bars 25x25x250 mm were used. To one series of mortars the lithium nitrate was added with the mixing water, in percentage fulfilling the molar ratio of Li/Na+K equal 0.74. The mortar bars were placed in a closed chamber over the water surface, at the temperature of 38°C.

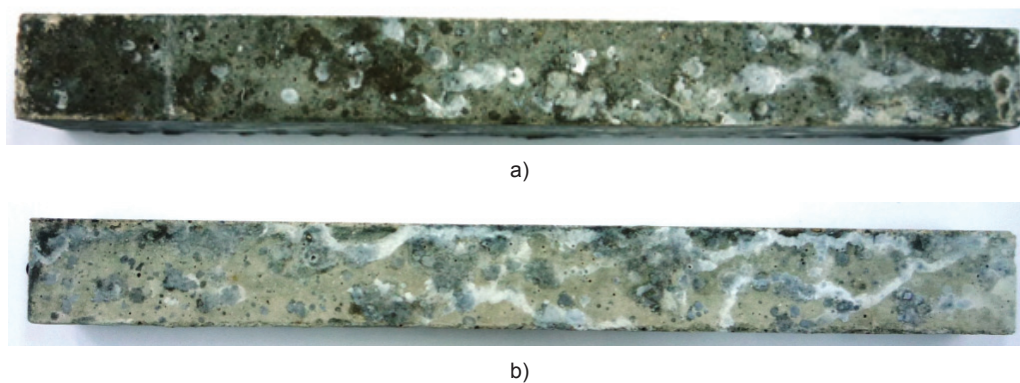
After 14, 30, 60, 90, 180, and 270 days the bars length, were measured. The microstructure of mortar samples, both with and without lithium nitrate addition, was examined under SEM, coupled with EDS.

3. Results

From the prism surface, in both cases without and with lithium nitrate addition the white gel was exuded (Fig. 1). The mass of this gel amount was independent of the content of alkalis in the samples and of the addition of lithium.

The results of the samples expansion measurements, both with and without lithium nitrate addition, for three different alkalis content in cement, are presented in Figs. 2-4. The range of admissible expansion of the samples are marked with the red lines on these Figs. In the case of the mortars with lithium nitrate, the expansion decreased for all alkali levels and reached a safe value, i.e. not higher than 0.05%. The expansion exceeding 0.05% before 90 days or 0.10% after this period is the proof of the aggregate potential reactivity. The samples without the lithium nitrate addition exceeded the expansion limit as early as after 30 days, for bars from cement with 0.66% and 0.9% Na_2O_e . In the case of the highest alkali content equal 1.1% Na_2O_e the limit of expansion was exceeded after 14 days. After 270 days the highest expansion have the mortars from the cement with the lowest content of alkali.

The microstructure analysis of mortar bars from cement with 0,9% Na_2O_e and with the lithium nitrate addition revealed the cracks



Rys. 1. a) beleczka z zaprawy z cementu o zawartości 0,9 % Na_2O_e , bez litu, po reakcji alkaliów z kruszywem, b) Próbką zaprawy z cementu o zawartości 0,9 % Na_2O_e z dodatkiem azotanu litu, po reakcji alkaliów z kruszywem

Fig. 1. a) mortar bar of cement with 0.9% Na_2O_e without lithium, after AAR; b) mortar bar from the same cement with the lithium nitrate addition, after AAR

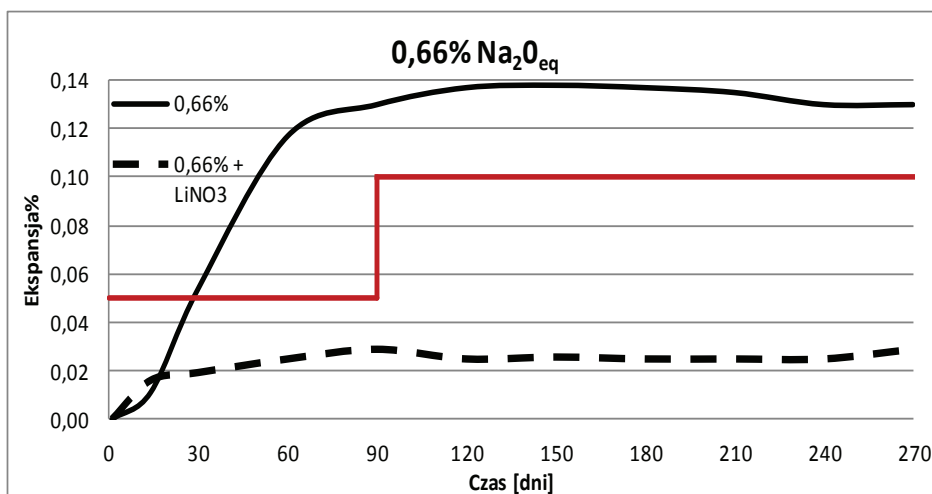
W próbkach bez dodatku azotanu litu przekroczenie granicznej ekspansji nastąpiło po 30 dniach w zaprawach z cementów zawierających 0,66%Na₂O_e i 0,9%Na₂O_e, natomiast w przypadku największej zawartości alkaliów równej 1,1%Na₂O_e przekroczenie nastąpiło już po 14 dniach. Największą rozszerzalność po 270 dniach dojrzewania wykazały zaprawy z cementu z najmniejszą zawartością alkaliów.

Mikrostruktura próbek zapraw z cementu o zawartości alkaliów, wynoszącej 0,9% Na₂O_e, z dodatkiem azotanu litu, wykazała wystąpienie mniejszej ilości spękań w porównaniu z próbkami bez tego dodatku. Natomiast w pustkach powstały znaczne ilości portlandytu (rysunek 5).

W próbce z cementu o zawartości alkaliów równej 0,9% Na₂O_e, bez dodatku azotanu litu, wystąpiły liczne spękania. W żelu występowały mikroobszary bogate w kryształity. Skład chemiczny żelu miał różną zawartość jonów Ca²⁺ (rysunek 6). Stosunek C/S w żelu wynosił około 0,9 [punkt 1], natomiast w obszarze położonym dalej od kruszywa [punkt 2 na rysunku 7b) był on znacznie mniejszy i wynosił około 0,5. Masywny żel, widoczny na rysunku 6e [punkt 3] był w zasadzie fazą C-S-H, z dużą zawartością potasu.

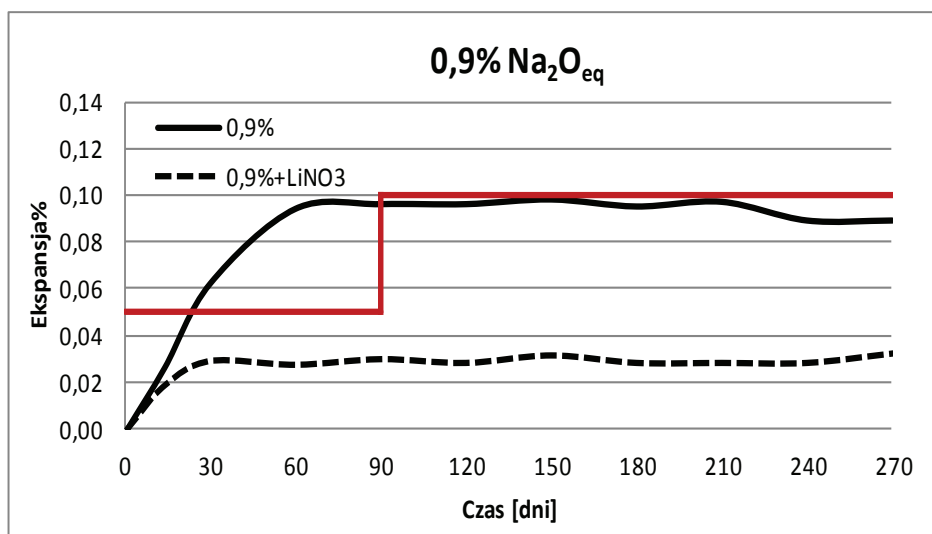
4. Dyskusja wyników

Jak można było oczekiwać, doświadczenia wykazały, że ekspansja zapraw z kruszy-



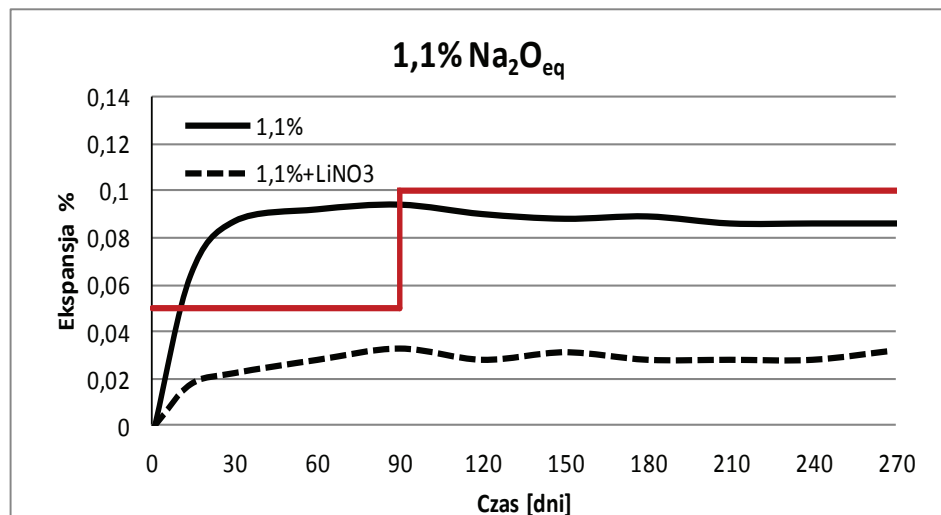
Rys. 2. Ekspansja próbek zaprawy z cementu o zawartości 0,66% Na₂O_e

Fig. 2. The bars expansion of mortars from cement with 0.66% of Na₂O_e



Rys. 3. Ekspansja próbek zaprawy z cementu o zawartości 0,9% Na₂O_e

Fig. 3. The bars expansion of mortars from cement with 0.9% of Na₂O_e



Rys. 4. Ekspansja próbek zapraw z cementu o zawartości 1,1% Na₂O_e

Fig. 4. The bars expansion of mortars from cement with 1.1% of Na₂O_e

content significantly lower than in the case of the samples without lithium. Simultaneously significant amount of portlandite crystals were found in the voids (Fig. 5).

In the sample of cement with alkali content equal 0.9% of Na₂O_e, without lithium nitrate addition, the numerous cracks appeared. In the gel some micro-areas were reach of crystallites. The chemical composition of gel revealed different content of calcium [Fig. 6]. The gel C/S molar ratio was around 0.9 [point 1], however, further of aggregate grains [point 2 in Fig. 6b) it was much lower, about 0.5. The massive gel, shown in Fig. 6e [point 3] was practically composed of C-S-H phase, with high potassium content.



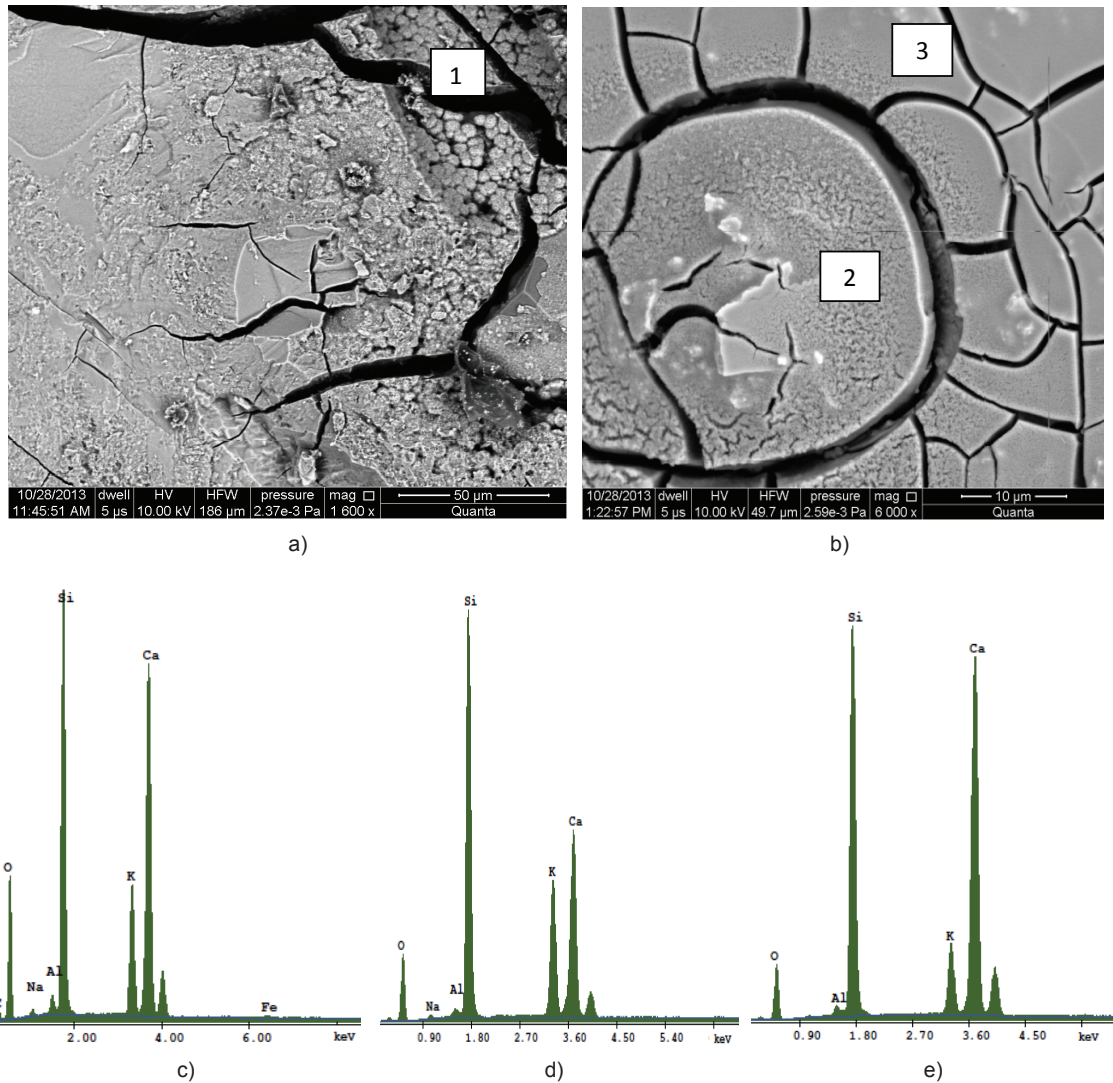
Rys. 5. Pustka wypełniona częściowo kryształami portlandytu

Fig. 5. The void filled partially with portlandite crystals

4. Discussion

As it should be expected, the experiments have shown that the expansion of mortars from gravel aggregate was depended on the alkali content in cement. In all series of mortars without lithium nitrate the expansion exceed the threshold value for the potential aggregate reactivity. The addition of lithium nitrate, in the percentage equal to molar ratio $\text{Li}/\text{Na}+\text{K}$ equal 0.74, caused the significant decrease of expansion, that practically was not dependent on the alkali content in cement. In the mortar samples, without lithium nitrate, numerous cracks appeared, and the gel formed as a product of the AAR was rich in potassium, with different calcium content [Figs. 6c-d]. In the micro-area, shown in Fig. 6e, the C-SH phase enriched in potassium was present. As it is known it will not have expansive properties (24).

The calcium ions play the double role in the reaction itself and in destruction process; gel is showing high expansion when formed in cracks in the aggregate grains, because this environment is poor in calcium ions and gel has a high $\text{Na}+\text{K}/\text{Ca}$ ratio, for a long time (22). Also Kawamura et al. (23) found that the expansion of



Rys. 6. Próbkki zaprawy bez azotanu litu. a) b) mikrostruktura, produkty reakcji i powstałe spękania, c) mikroanaliza rentgenowska w punkcie 1, d) mikroanaliza w punkcie 2, e) mikroanaliza w punkcie 3.

Fig. 6. Microstructure of samples without lithium nitrate addition: a) and b) microstructure, reaction products and cracks, c) EDS in point 1, d) same in point 2, e) same in point 3.

wa zwirowego była zależna od zawartości alkaliów w cemencie. We wszystkich próbkach bez azotanu litu ekspansja przekroczyła granicę potencjalnej reaktywności kruszywa. Dodatek azotanu litu, w ilości spełniającej stosunek molowy Li/Na+K równy 0,74, spowodował radykalne zmniejszenie ekspansji, która praktycznie nie zależała od zawartości alkaliów w cemencie. W próbkach zapraw bez azotanu litu wystąpiły spękania, a powstały w wyniku reakcji żel zawierał dużo potasu, przy zmiennej zawartości jonów wapnia [rysunki 6c-d]. W mikroobszarze pokazanym na rysunku 6e występuje faza C-S-H, wzbogacona potasem. Jak wiadomo nie będzie ona miała właściwości ekspansywnych. Jony wapnia odgrywają podwójną rolę w samej reakcji i procesie destrukcji; żel wykazuje dużą ekspansję gdy powstaje w pęknięciach wewnątrz ziarn kruszywa ponieważ środowisko to jest ubogie w jony wapnia i żel ma duży stosunek Na+K/Ca przez długi okres (22). Także Kawamura i in. (23) stwierdzili, że ekspansja betonu jest ograniczona gdy $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w zaczynie „jest łatwo dostępny”. Natomiast w późniejszym okresie wodorotlenek wapnia, będący źródłem jonów hydroksylowych w roztworze w porach betonu, może wymieniać jony sodu i potasu w żelu. Uwolnienie tych jonów powoduje wzrost ich stężenia w roztworze w porach betonu, co prowadzi do dalszej reakcji kruszywa z utworzeniem żelu.

Badania za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego wyposażonego w analizator rentgenowski nie mogły jednak wykryć litu, który jest pierwiastkiem zbyt lekkim, niewykrywalnym tą metodą. Dalsze badania są niezbędne do wyjaśnienia mechanizmu działania jonów litu.

5. Wnioski

1. Ekspansja zapraw z reaktywnym kruszywem żwirowym ulega radykalnemu zmniejszeniu po dodaniu do próbek azotanu litu. Stosowano stosunek molowy jonów litu do sodu i potasu w cemencie wynoszący 0,74.
2. Nie stwierdzono zależności ekspansji zaprawy od zawartości alkaliów w cemencie.
3. Ze względu na stosowaną metodę nie było możliwości zbadania rozmieszczenia litu w próbkach zapraw.

Literatura / References

1. Z. Owsiak, *Reakcje kruszyw krzemionkowych z alkaliami w betonie*, *Polski Biuletyn Ceramiczny*, 72 (2002).
2. W. Kurdowski, *Chemia cementu i betonu*, SPC, Kraków 2010.
3. J. Lindgård, Ö. Andiç-Çakir, I. Fernandes, T. F. Rønning, M. D. A. Thomas, Alkali-silica reaction (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, *Cem. Concr. Res.*, **42**, 2, 223-243 (2012).
4. Š. Lukschová, R. Příkryl, Z. Pertold, Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from 20th century bridges, *Constr. Build. Mat.*, **23**, 734-741 (2009).
5. T. Katayama, The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) – Its mineralogical and geochemical detail, with special reference to ASR, *Cem. Concr. Res.*, **40**, 643-675 (2010).

concrete is limited when $\text{Ca}(\text{OH})_2$ “is easily available” in the cement matrix. However, in the later period calcium hydroxide can supply calcium ions which will substitute the sodium and potassium ions in the reaction product. It is releasing these ions and increasing their concentration in the pore solution, which leads to the further reaction of aggregate, with additional quantity of gel formation.

The mortars examination with SEM coupled with EDS cannot unfortunately detect lithium, which is a too light element. Further research are necessary to elucidate the lithium action mechanism.

5. Conclusions

1. The expansion of mortar bars with gravel aggregate is drastically decreased by lithium nitrate addition. The molar ratio of lithium to sodium and potassium equal to 0.74 was applied.
2. No correlation of the alkali content in cement with the mortar samples expansion was found.
3. The SEM/EDS analysis gave no possibilities for lithium detection.

6. P. E. Grattan-Bellew, L. D. Mitchell, J. Margesin, D. Min, Is alkali-carbonate reaction just a variant of silica reaction $ACR = ASR?$, *Cem. Concr. Res.*, **40** (2010) 556-562.
7. W. J. McCoy, A. G. Caldwell, New approach in inhibiting alkali-aggregate expansion, *ACI Materials Journal*, **22**, 9, 693-706 (1951).
8. X. Feng, M. D. A. Thomas, T. W. Bremner, K. J. Folliard, B. Fournier, Summary of research on the effect of $LiNO_3$ on alkali-silica reaction in new concrete, *Cem. Concr. Res.*, **40**, 636-642 (2010).
9. X. Feng, M. D. A. Thomas, T. W. Bremner, K. J. Folliard, B. Fournier, New observations on the mechanism of lithium nitrate against alkali silica reaction (ASR), *Cem. Concr. Res.*, **40**, 94-101 (2010).
10. L. D. Mitchell, J. J. Beaudoin, P. Grattan-Bellew, The effects of lithium hydroxide solution on alkali silica reaction gels created with opal, *Cem. Concr. Res.*, **34**, 4, 641-649 (2004).
11. X. Mo, C. Yu, Z. Xu, Long-term effectiveness and mechanism of $LiOH$ in inhibiting alkali silica reaction, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 1, 115-119 (2003).
12. Q. Bian, S. Nishibayashi, T. Wu X. Kuroda, M. Tang, Various chemicals in suppressing expansion due to alkali-silica reaction, *Proc. 10th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction*, CSIRO Division of Building Construction and Engineering, p. 868, Melbourne, Australia 1996.
13. M. Xiangyin, Y. Chenjie, X. Zhongzi, Long-term effectiveness and mechanism of $LiOH$ in inhibiting alkali-silica reaction, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 115-119 (2003).
14. A. Bielański, *Basic Inorganic Chemistry*, 530, PWN Warszawa 1981.
15. M. Xiangyin, Laboratory study of $LiOH$ in inhibiting alkali-silica reaction at 20 jC: a contribution, *Cem. Concr. Res.*, **35**, 499-504 (2005).
16. K. E. Kurtis, P. J. M. Monteiro, Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control, *J. Mat. Sci.*, **38**, 2027 (2003).
17. X. Feng, M. D. A. Thomas, T. W. Bremner, B. J. Balcom, K. J. Folliard, Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review, *Cem. Concr. Res.*, **35**, 1789-1796 (2005).
18. Z. Owsiak, Rola wodorotlenku wapnia w reakcji alkaliów z krzemionką, *Cement Wapno Beton*, **69**, 259-263 (2003).
19. Z. Owsiak, Wpływ fazy ciekłej w betonie na reakcje alkalia-krzemionka, *Cement Wapno Beton*, **67**, 61-70 (2001).
20. W. C. Hansen, *J. Amer. Concr. Inst.*, **15**, 213 (1944).
21. S. Chaterji, *Cem. Concr. Res.*, **9**, 185 (1979).
22. H. F. W. Taylor, *Cement Chemistry*, Academic Press, 1990.
23. M. Kawamura, K. Takemoto, S. Hasaba, *Proc. 6th Int. Conf. on Alkalies in Concrete*, p. 167, Copenhagen 1983.
24. L. J. Struble, S. Diamond, *Cem. Concr. Res.*, **11**, 611 (1981).

Normy

- PN-92/B-06714-46 Mineral Aggregates. Researches. Designation of potential alkaline reactivity by rapid method.
- ASTM C 227 - 10 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).