

Wpływ rozszerzalności powodowanej reakcją kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu na właściwości mechaniczne betonu

Effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete

Alkan Hafci^{1*}, Lutfullah Turanli², Fatih Bektas³

¹ Construction Materials Laboratory, Turkish Standard Institution, 06100 Ankara, Turkey

² Department of Civil Engineering, Yildirim Beyazit University, 06760 Ankara, Turkey

³ Department of Mechanical & Civil Engineering, Minnesota State University, Mankato, USA

*corresponding author: A. Hafci; Tel:+90-312-416-6594, Fax:+90-312-416-6616, E-mail: ahafci@tse.org.tr

Streszczenie

W przeprowadzonych doświadczeniach zbadano wpływ reakcji wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką na mechaniczne właściwości betonu, a mianowicie wytrzymałość na ściskanie i zginanie, na rozłupywanie przy rozciąganiu, moduł elastyczności oraz wytrzymałość, badaną metodą „pull-out”. Uwzględniono także wpływ geometrii próbek na rozszerzalność związaną z tą reakcją kruszywa. Uzyskane wyniki potwierdziły, że ta rozszerzalność przekraczająca 0,04% powoduje znaczne pogorszenie właściwości mechanicznych betonu, jednak z różną prędkością. Ponadto te doświadczenia wykazały, że geometria próbek ma znaczny wpływ na szybkość tej reakcji.

Słowa kluczowe: reakcja sodu i potasu z krzemionką, właściwości mechaniczne betonu, rozszerzalność, geometria próbek

Summary

In this experimental study the effect of alkali silica reaction [ASR] on the mechanical properties of concrete namely compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and pull-out strength is presented. The effect of the specimens' geometry on ASR expansion has also been studied. The results confirm that ASR expansion of over 0.04% causes significant losses in the mechanical properties of concrete, albeit at differing rates. Moreover, this study proves that the specimen geometry has an important role on ASR expansion rate.

Keywords: alkali silica reaction, mechanical properties, expansion, specimen geometry

1. Wprowadzenie

Budowle betonowe nie są odpowiednio dostosowane do niektórych wpływów środowiska i chemicznych procesów. Reakcja krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu [RSNK] jest jedną z reakcji chemicznych, w której reagują wodorotlenki sodu i potasu z reaktywnym kruszywem, w mokrych warunkach, o wilgotności większej od 85% (16). Temperatura jest również jednym z ważnych czynników, wpływającym na czas rozpoczęcia tej reakcji i szybkość jej przebiegu (10). W wyniku reakcji powstaje żel, który rozszerza się absorbując wodę i wywołuje wewnętrzne ciśnienie powodując powstawanie mikropęknięć w mikrostrukturze betonu (12). W związku z powstawaniem spękań RSNK może mieć niekorzystny wpływ na mechaniczne właściwości betonu, a przede

1. Introduction

Concrete structures are not adequately resistant to some environmental and chemical processes. Alkali-silica reaction [ASR] is one of the chemical reactions between concrete alkalis and reactive aggregates, taking place in moist conditions i.e., humidity higher than 85% (16). Temperature is also the main factor affecting the progress and initiation time of this reaction (10). The reaction product is known as ASR gel, which expands with the absorption of water and causes internal pressure, triggering micro-cracks in concrete microstructure (12). Because of these cracks, ASR may have serious negative effects on the mechanical properties of concrete, such as compressive and tensile strengths, pull-out resistance, and modulus of elasticity.

wszystkim na wytrzymałość na ściskanie i zginanie oraz moduł elastyczności.

W konstrukcjach betonowych, pomimo, że zostały zbudowane zgodnie z przyjętymi zasadami i normami, różne formy RSNK są spotykane, które powodują ich zniszczenie, szereg lat po ukończeniu budowy. Ogólnie RSNK występuje głównie w formie odprysków i spękań na powierzchni betonu (13).

W niektórych długich badaniach w celu wykrycia reaktywności kruszywa, metody ASTM C1293, lub kanadyjska CSA-A23.2-14A są stosowane. Rozszerzalność przekraczająca 0,04% może być miarą potencjalnej reaktywności. Badania, w których miernikiem jest rozszerzalność wynosząca 0,04% i 0,10%, mająca szkodliwy wpływ na mechaniczne właściwości betonu, są głównym przedmiotem przeprowadzonych doświadczeń. Drugim celem jest zbadanie wpływu geometrii próbek na rozszerzalność wywołaną RSNK.

2. Materiały

W doświadczeniach stosowano zwykły cement portlandzki, o zawartości alkaliów wyrażonych ekwiwalentem sodowym wynoszącym 0,9-1,2%. Stosowano cement CEM I 42,5R, wyprodukowany zgodnie z normą TS EN 197-1 CEM I.

Kruszywo pochodziło z lokalnie dostępnego źródła, a stosowano go w mieszance betonowej z krzemionkowym piaskiem i kruszonym wapieniem. Ich potencjalną reaktywność RSNK oznaczono stosując przyspieszoną metodę z zastosowaniem beleczek (RILEM AAR-2). Rozszerzalność piasku po czternastu dniach nieznacznie przekraczała 0,20%, co pozwoliło zaliczyć go do reaktywnych. Pokruszony wapień rozszerzał się poniżej 0,05% i został zaliczony do niereaktywnych. 40% reaktywnego piasku o uziarnieniu nie przekraczającym 4 mm i 60% kruszonego wapienia od 4 do 22,4 mm zmieszano, w celu uzyskania mieszanek betonowych.

Miejską wodę wodociągową, która jest uważana za nie zawierającą części organicznych, przede wszystkim nafty i alkaliów, stosowano jako wodę zarobową. Natomiast wodę destylowaną stosowano do przygotowania kondycjonowanego roztworu wodorotlenku sodu. Wodorotlenek sodu [NaOH] stosowano w formie kondycjonowanego roztworu, służącego do przyspieszania RSNK, w przeprowadzanych doświadczeniach. Przygotowano jedno molarny roztwór NaOH, zgodnie z przepisem podanym w RILEM AAR-2.

3. Metody doświadczenia

45 próbek o trzech różnych geometriach – beleczki, kostki i walce przygotowano zgodnie z wykonaniem mieszanek według RILEM AAR-4.1. Wykonano 285 mm × 80 mm × 80 mm beleczki, φ 100 mm × 200 mm walce i 150 mm kostki w celu oceny rozszerzalności RSNK. W tabelicy 1 podsumowano ilość wykonanych próbek z ich założonymi pomiarami, w programie doświadczenia.

Although they are built in accordance with the pre-approved procedures and the related standards, different forms of ASR deterioration can still be seen in concrete structures, several years after the construction is finished. Generally, the ASR deterioration manifests itself as map cracking or pattern cracking, pop outs, and spalling on the surface (13).

In some long-term test methods for detecting ASR susceptibility of aggregates such as ASTM C1293 and Canadian CSA-A23.2-14A, expansion of over 0.04% indicates potential reactivity. An investigation on the extent to which the benchmark 0.04% and 0.10% expansion has a detrimental effect on the mechanical properties of concrete, is the main objective of this study. The secondary objective is to observe the effect of specimen geometry on ASR expansion.

2. Materials

The related standard followed in this study requires an ordinary Portland cement, or similar, with a total alkali content of 0.9-1.2% sodium oxide equivalent. A CEM I 42.5 R produced according to TS EN 197-1 CEM I was used.

Locally available aggregates were used in the concrete mixes—siliceous sand and crushed limestone. Their potential to ASR reactivity had been determined, using the accelerated mortar bar method [RILEM AAR-2]. The fourteenth day expansion of the sand slightly exceeds 0.20%; so it is categorized as a reactive material. The crushed limestone expands less than 0.05% and is determined as non-reactive. 40% reactive sand, of the size 0 to 4 mm, and 60% crushed limestone 4 to 22.4 mm, were blended to produce the concrete mixes.

Municipal tap water, which is considered free from organic matter, principally oil and alkalis, was used as the mixing water; and distilled water was used in the preparation of ASR conditioning sodium hydroxide solution.

Sodium hydroxide was used in conditioning solution to accelerate the ASR in this investigation. One molar NaOH solution was prepared according to the specified quantity described in RILEM AAR-2.

3. Experimental methods

45 specimens at three different geometries – prism, cube and cylinder, were prepared in accordance with the mix design in RILEM AAR-4.1. 285 mm × 80 mm × 80 mm prisms, φ100 mm × 200 mm cylinders and 150 mm cubes were cast, to evaluate the ASR expansion. Table 1 summarizes the number of specimens produced with their intended measurements, in the experimental programme.

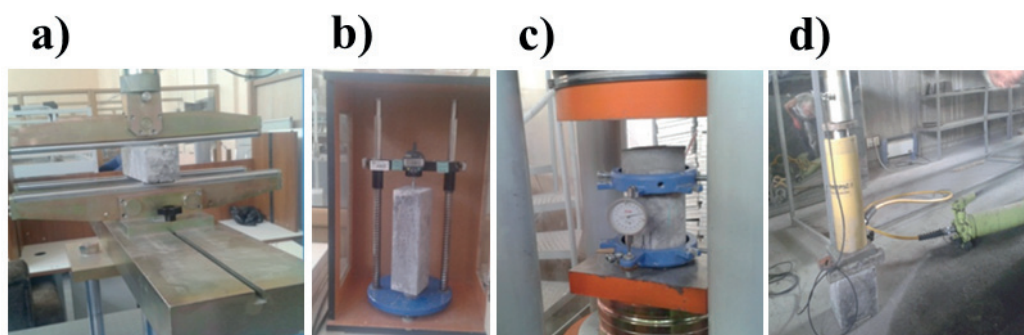
The specimens prepared in accordance with the requirements of RILEM AAR-4.1 were divided into three subgroups, each including three specimens. These subgroups are named as Group A [G-A] for concrete expanding just over 0.04%, group B [G-B] for concrete expanding just over 0.10%, and group C [G-C] for control with

Tablica 1 / Table 1

PRÓBKİ PRZYGOTOWANE DO BADAŃ

SPECIMENS PREPARED FOR THE TESTS

Group	Number and geometry of specimens Ilość i geometria próbek	Dimension Wymiary	Test Measurement / Pomiary
1	9 concrete prisms 9 beleczek betonowych	285 mm × 80 mm × 80 mm	9 prisms for flexural strength [Fig. 1-a] / 9 kostek do badania wytrzymałości na zginanie [Rys. 1-a] 6 prisms for expansion [Fig. 1-b] / 6 kostek do badania rozszerzalności [Rys. 1-b]
2	9 concrete cubes 9 kostek	150 mm	9 cubes for compressive strength / 9 kostek do badania wytrzymałości na ściskanie 6 cubes for expansion / 6 kostek do badania rozszerzalności
3	9 concrete cylinders with reference steel studs 9 betonowych walców ze stojakami stalowymi	φ100 mm × 200 mm	9 cylinders for compressive strength / 9 walców do badania wytrzymałości na ściskanie 9 cubes for modulus of elasticity [Fig. 1-c] / 9 kostek do badania modułu sprężystości [3 of 9 cubes for compression strength / 3 z 9 kostek do badania wytrzymałości na ściskanie] 6 cubes for expansion / 6 kostek na rozszerzalność
4	9 concrete cylinders without measurement studs 9 betonowych walców bez pomiarowych stojaków	φ100 mm × 200 mm	9 cylinders for splitting tensile strength 9 walców do badania wytrzymałości na zginanie
5	9 concrete cubes with 10-mm ribbed steel bar 9 betonowych kostek z 10 mm żebrowanymi prętami stalowymi	150 mm	9 cubes for pull-out strength [Fig. 1-d] 9 kostek do próby "pull out"



Rys. 1. Doświadczenia: (a) badanie wytrzymałości na zginanie, (b) pomiar długości, (c) pomiar modułu elastyczności, (d) badanie siły wiązania metodą "pull-out"

Fig. 1. Experiments: (a) flexural strength test, (b) length measurement, (c) modulus of elasticity test, (d) pull-out strength test

Próbki przygotowane zgodnie z wymaganiami RILEM AAR-4.1 podzielono na trzy podgrupy, każdą obejmującą trzy próbki. Te podgrupy oznaczono jak Grupa A [G-A] dla betonu rozszerzającego się tylko ponad 0,04%, grupa B [G-B] w przypadku betonu rozszerzającego się tylko ponad 0,10% i grupę C [G-C] w celu sprawdzenia braku lub małej ekspansji do pominięcia.

W celu tych badań te dwa poziomy rozszerzalności będą nazywane odpowiednio rozszerzalność 0,04%, lub ograniczona rozszerzalność i ekspansja 0,10%, lub duża ekspansja. Początkowo wszystkie próbki umieszczono w formach na 24 godziny w 20±2°C, to jest w warunkach laboratoryjnych. Natychmiast po wyjęciu z form,

no, or negligible expansion. For the purpose of this paper these two expansion levels will be termed as 0.04% expansion or limit expansion and 0.10% expansion or high expansion, alternatively. Initially, all specimens were kept in the moulds for over 24 hours at 20±2°C – i.e., room condition. Immediately after demoulding, all specimens were immersed in water at 20°C; initial measurement was taken after curing in water at 20°C for 24 h. After these processes were applied to all specimens, for each group, 3 of 9 specimens were subjected to ASR conditioning at temperature 60 ± 2°C and a relative humidity >95% for durations varying from 6 to 8 weeks, until the expansion exceeded the limit 0.04%. This

wszystkie próbki zostały zanurzone w wodzie w 20°C; początkowe pomiary podjęto po dojrzeniu w wodzie w 20°C w ciągu 24 h. Po tym procesie, któremu poddano wszystkie próbki, dla każdej grupy, 3 z 9 próbek poddano warunkom RSNK, w temperaturze 60± 2°C i wilgotności względnej >95%, na okres zmieniający się od 6 do 8 tygodni, aż rozszerzalność przekroczyła limit 0,04%. Tę podgrupę trzech próbek nazwano G-A beton o rozszerzalności większej od 0,04%, jak to wspomniano wcześniej. Podobnie jak dla betonu G-A, beton G-B poddano takiemu samemu wpływowi RSNK przez 14 tygodni. Celem tej wydłużonej obróbki było zbadanie wpływu RSNK na mechaniczne właściwości betonu w przypadku rozszerzalności przekraczającej 0,10%, jednak ta rozszerzalność nie mogła być osiągnięta w tych warunkach ekspozycji. W związku z tym te próbki przeniesiono do roztworu NaOH w celu dalszego działania RSNK; próbki zostały przeniesione do roztworu NaOH na dwa do czterech tygodni, aż uzyskały rozszerzalność 0,10%. Ostatnie trzy próbki podgrupy betonu G-C, dojrzewały w wodzie w 20°C, aż poziom rozszerzalności betonu G-A przekroczył 0,04%. Te próbki wykorzystano jako grupę kontrolną, w celu porównania z grupami G-A i G-B.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wpływ rozszerzalności RSNK na wytrzymałość na ściskanie betonu

Badano próbki w formie kostek i walców w celu znalezienia wpływu rozszerzalności RSNK na wytrzymałość na ściskanie betonu. Rozszerzalność i wytrzymałość na ściskanie wszystkich próbek podano w tablicy 2. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie próbek w formie kostek i walców oznaczono porównując grupy G-A i G-B, dojrzewające w warunkach RSNK, z grupą odniesienia G-C.

Wyniki próbek kostkowych wykazują, że procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie wzrasta z rozszerzalnością. W porównaniu z grupą odniesienia średni ubytek wynosi 7,4% i 13,9%, w przypadku rozszerzalności odpowiednio 0,04% i 0,10%. Spadek w procentach nie jest wprost proporcjonalny do procentowej rozszerzalności; stopień ten zmniejsza się. Postępująca hydratacja cementu, co ma korzystny wpływ na wytrzymałość może być przyczyną spowolnienia tego zmniejszania się wytrzymałości na ściskanie. Pomiar wytrzymałości na ściskanie próbek walcowych dały wyniki podobne do pomiarów na kostkach. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu G-C wyniosła 40,7 MPa: porównawczo daje to straty dla betonu G-A, który miał rozszerzalność 0,04% i G-B betonu mającego 0,10% odpowiednio 8,7% i 12,5%. Różnica ubytku w procen-

3-specimen subgroup is called as G-A; concrete with an expansion of greater than 0.04%, as mentioned above. Similar to G-A concrete, G-B concrete was exposed to the same ASR conditioning for 14 weeks. The aim of this extended exposure was to investigate the effect of ASR on mechanical properties of concrete at expansion exceeding 0.10%, however, this expansion cannot be reached for the exposure conditions set. Therefore, these specimens were transferred to 1 molar NaOH solution to further promote ASR; they were kept in NaOH solution for two to four weeks, until they reached the 0.10% expansion. The last 3-specimen subgroup, G-C concrete, was cured in water at 20°C, until the expansion level of G-A concrete exceeded 0.04%. These specimens were used as a control group, to compare with the groups G-A and G-B.

4. Results and discussion

4.1. Effect of ASR expansion on compressive strength of concrete

The specimens as cubes and cylinders were tested to found the effect of ASR expansion on the compressive strength of concrete. The expansion and compressive strength results for all specimens are given in Table 2. The loss in compressive strength of the specimens as cubes and cylinders was determined by comparing ASR conditioned groups G-A and G-B, to the control group G-C.

The results of the cube specimens show that the loss percentage in compressive strength, increases with expansion. Compared to the control group, the average loss is 7.4% and 13.9% at 0.04% and 0.10% expansions, respectively. The loss percentage is not directly proportional to expansion percent; the rate decreases. Ongoing cement hydration that provided some positive effect on

Tablica 2 / Table 2

SPADEK WYTRZYMAŁOŚCI PRÓBEK BETONU, KTÓRE PRZESZŁY REAKCJĘ KRZEMIONKI Z WODOROTLENKAMI SODU I POTASU, W PORÓWNIANIU DO PRÓBKII KONTROLNEJ

LOSS IN COMPRESSIVE STRENGTH OF ASR-AFFECTED CONCRETE COMPARING WITH CONTROL CONCRETE

Cube Specimens Kostki, 150 mm	Expansion Rozszerzalność, %		Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa			Loss / Strata, %	
	G-A	G-B	G-A	G-B	G-C	G-A	G-B
1	0.042	0.101	48.3	45.0	52.2	7.5	13.8
2	0.042	0.101	48.6	44.9	52.3	7.1	14.1
3	0.043	0.101	48.5	45.3	52.6	7.8	13.9
Average / Średnia	0.042	0.101	48.5	45.1	52.4	7.4	13.9
Cylindrical Specimens Walce φ100 mm × 200 mm	Expansion / Rozszerzalność, %		Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa			Loss / Strata, %	
	G-A	G-B	G-A	G-B	G-C	G-A	G-B
1	0.042	0.103	37.1	35.6	40.6	8.6	12.3
2	0.040	0.099	37.4	36.0	41.1	9.0	12.4
3	0.039	0.099	36.9	35.2	40.3	8.4	12.7
Average/Średnia	0.040	0.100	37.1	35.6	40.7	8.7	12.5

tach próbek w formie kostek i walców jest bardzo mała. Może to być spowodowane przez dłuższy okres hydratacji walcowych próbek, w celu osiągnięcia założonej rozszerzalności granicznej, wynoszącej 0,04% i 0,10%. Niemniej jednak na wytrzymałość na ściskanie RSNK ma niekorzystny wpływ. Ponadto, podczas gdy bieżąca hydratacja kompensuje ubytki wytrzymałości na ściskanie w przypadku wszystkich próbek, zmniejszając niekorzystny wpływ rozszerzalności spowodowanej RSNK, nie wydaje się aby ograniczała zwiększanie się z tego powodu odzysku wytrzymałości, który nie występuje. W zakresie wpływu RSNK na wytrzymałość na ściskanie doświadczenia prowadzili także inni badacze. Ahmet i in. (1) badali dwa bardzo reaktywne kruszywa, jedno ze stopionej krzemionki, jako dodatek do mało reaktywnego kruszywa, jako kontrolne. Kostkowe próbki dojrzewały przez 28 dni w wodzie w 20°C, a następnie w 38°C, w celu przyspieszenia hydratację. Stwierdzono spadek wytrzymałości dla obu w 20°C i w 38°C, jak rozszerzalność wzrastała. Równocześnie bardzo duży spadek wystąpił w 38°C, szczególnie w mieszance zawierającej bardzo reaktywną, stopioną krzemionkę. Cope i Slade (7) w innej pracy stwierdzili wzrost wytrzymałości na ściskanie w mieszance zawierającej stopioną krzemionkę i stwierdzili, że dojrzewanie betonu z wolno reagującym kruszywem w wysokiej temperaturze nie ma wpływu na wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu w początkowym okresie, a nawet przez cały okres dojrzewania. Podobnie Jones i Clark (11) stwierdzili, że rozszerzalność RSNK ma niekorzystny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Natomiast są pewne badania, w których stwierdzono, że RSNK nie ma dużego wpływu na wytrzymałość na ściskanie (15, 20). Przyczyną tych przeciwstawnych wyników może być rodzaj próbek, warunki doświadczeń i właściwości materiałów (14).

4.2. Wpływ rozszerzalności RSNK na wytrzymałość na zginanie betonu

Rozszerzalność betonu G-A, początkowo dojrzewającego w 60°C i 100% WW, przekraczała 0,04% po sześciu tygodniach; oznaczono wytrzymałość na zginanie tych beleczek, o średniej rozszerzalności 0,046%. Średnia wytrzymałość na zginanie wyniosła 3,5 MPa; beton odniesienia G-C, dojrzewający w wodzie w 20°C sześć tygodni, osiągnął 4,5 MPa. Obliczony spadek wytrzymałości na zginanie wynosił 22,1%. Ten spadek oznacza duży ubytek wytrzymałości na zginanie, jeżeli rozszerzalność przekraczała 0,04%. Dalsza rozszerzalność powoduje większe zmniejszenie wytrzymałości na zginanie. W przypadku rozszerzalności 0,10% wytrzymałość na zginanie wyniosła 2,5 MPa. Wyniki podano w tabelicy 3. Oceniając wyniki podane w tabelicach 2 i 3 można stwierdzić, że wytrzymałość na zginanie zależała bardziej od niekorzystnej rozszerzalności RSNK niż wytrzymałość na ściskanie. Jeżeli rozszerzalność przekracza 0,04% spadek wytrzymałości na zginanie wynosił 22,1%, a zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie kostek i walców, odpowiednio 7,4% i 8,7%. Ze wzrostem rozszerzalności różnica pomiędzy spadkiem wytrzymałości na zginanie i ściskanie jest większa od 0,10%, a spadek wytrzymałości na zginanie osiąga 45,6%. Natomiast ubytek wytrzymałości na ściskanie wyniósł w tych warunkach 13,9% i 12,5%, odpowiednio

strength may be the reason for the decrease in the loss rate in compressive strength.

The compressive strength measurements on cylinders had the results that are similar to the cube results. The average compressive strength of G-C concrete was 40.7 MPa: comparatively this shows losses: for G-A concrete which had 0.04% expansion and G-B concrete with 0.10% expansion 8.7% and 12.5%, respectively. The difference between the loss percentages of cube and cylindrical specimens is marginal. This may be attributed to the longer hydration period of cylindrical specimens to reach the set expansion limits, 0.04% and 0.10%. Nonetheless, the compressive strength is negatively affected by ASR expansion. Moreover, while the ongoing hydration compensates the loss in compressive strength for all specimens against ASR expansion, it does not seem to limit the extension of crack pattern. Therefore, a recovery in strength is not observed.

ASR effect on compressive strength of concrete has been examined by other researchers. Ahmet et al. (1) tested two highly reactive aggregates, one being fused silica, in addition to a low reactive aggregate, as control. The cube specimens were cured for 28 days in water at 20°C and then at 38°C, to accelerate the hydration. A drop in the strength was observed both at 20°C and at 38°C, as the expansion increases. On the other hand, a dramatic drop was remarkable especially in the mix containing highly reactive fused silica, at 38°C. In another study, Cope and Slade (7) have observed the compressive strength increase in a mix similarly containing reactive fused silica and asserted that the curing of concrete including slowly reaction aggregate at high temperature does not have an increased effect on compressive strength of concrete at the early age, or even after total time passes. Similarly, Jones and Clark (11) have concluded that the ASR expansion negatively affects the compressive strength. On the other hand, there are some studies concluding that compressive strength is not significantly affected by ASR (15, 20). The reasons for these contradictory results can be caused by specimen type, test conditions and materials properties (14).

4.2. Effect of ASR expansion on flexural strength of concrete

The expansion of G-A concrete, initially stored at 60°C and 100% RH, exceeds 0.04% in six weeks; the prismatic specimens with average expansion of 0.046% were tested on flexural strength. The average flexural strength was 3.5 MPa; the control concrete, G-C, cured in water at 20°C for six weeks was determined as 4.5 MPa. The loss percentage in flexural strength is calculated as 22.1%. This loss signs a sharp drop in flexural strength when the expansion exceeds 0.04%. Further expansion higher reduction in flexural strength is causing. The flexural strength at 0.10% expansion was 2.5 MPa. The results are given in Table 3.

Evaluating the data in Tables 2 and 3, it can be deduced that flexural strength was far more sensitive to the detrimental effects of ASR expansion, as compared to compressive strength. As expansion

Tablica 3 / Table 3

WPLÝW REAKCJI KRZEMIONKI Z WODOROTLENKAMI SODU I POTASU NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE

INFLUENCE OF ASR-AFFECTED CONCRETE ON FLEXURAL STRENGTH

Prismatic Specimens Próbki pryzmatyczne, 285 mm × 80 mm × 80 mm	Expansion Rozszerzalność, %		Flexural strength Wytrzymałość na zginanie, MPa			Loss in flexural strength Spadek wytrzymałości, %	
	G-A	G-B	G-A	G-B	G-C	G-A	G-B
1	0.044	0.106	3.6	2.5	4.6	21.7	45.7
2	0.047	0.105	3.6	2.5	4.5	20.0	44.4
3	0.047	0.107	3.4	2.4	4.5	24.4	46.7
Av.	0.046	0.106	3.5	2.5	4.5	22.1	45.6

dla kostek i beleczek. W oparciu o te wyniki można uważać, że naprężenia wewnętrzne spowodowane przez RSNK i wywołujące pęknięcia, mają bardziej niekorzystny wpływ na wytrzymałość betonu na zginanie.

Swamy i Al-Asali (22) przeprowadzili badania mechaniczne i ich wyniki są zgodne z uzyskanymi w tych badaniach. Ich wyniki wykazują, że znaczny spadek najpierw występuje w betonie zawierającym stopioną krzemionkę, po 7 miesiącach, podczas gdy w pierwszych dniach występuje wzrost wytrzymałości, ponieważ hydratacja zachodzi wcześniej. W porównaniu z wzorcową próbką spadek wytrzymałości betonu spowodowany RSNK wynosi 77%, co jest wynikiem katastrofalnym. Swamy i Al-Asali (22) stwierdzili, że wytrzymałość na zginanie wykazuje większe zmniejszenie niż na ściskanie, pod wpływem RSNK.

W innej pracy Marzouk i Langdon (12) zbadali doświadczalnie wpływ rozszerzalności RSNK na wytrzymałość na zginanie betonów o normalnej i wysokiej wytrzymałości, zawierających przeciętne i bardzo reaktywne kruszywa. Po poddaniu działaniu roztworu NaOH w ciągu 12 tygodni, zmniejszenie wytrzymałości próbek z kruszywem reaktywnym wyniosło 9%, jeżeli końcowa wytrzymałość na zginanie jest porównywana z początkową wytrzymałością, po dojrzewaniu przez 28 dni. W przypadku próbek z przeciętnie reaktywnym kruszywem, otrzymano podobne wyniki, jednak wszystkie próbki w dejonizowanej wodzie osiągnęły mały przyrost wytrzymałości po 12 tygodniach. Natomiast, pozorny przyrost wytrzymałości na zginanie wszystkich próbek dojrzewających w tych samych warunkach, w roztworze NaOH, uzyskano w tych doświadczeniach. Wzrost wytrzymałości próbek z kruszywem o dużej reaktywności wyniósł 10%, a tych ze średnio reaktywnym kruszywem znacznie więcej 21% (12).

4.3. Wpływ rozszerzalności RSNK na wytrzymałość na zginanie betonu

Sporządzono próbki walcowe o średnicy 100 mm i długości 200 mm w celu zbadania wpływu rozszerzalności RSNK na wytrzymałość na rozłupywanie przy zginaniu betonu. Trzeba przypomnieć, że same próbki nie miały pomiarowych słupków; rozszerzalność takich samych próbek stosowanych do oznaczenia

exceeds 0.04%, the loss in flexural strength is 22.1%; the losses in compressive strength for cube and cylindrical specimens were 7.4% and 8.7%, respectively. With the increasing expansion, the difference between the loss in flexural and compressive strength grows wider, at an expansion value higher than 0.10%, the loss in flexural strength reaches 45.6%. On the other hand, the loss in compressive strength at that level was 13.9% and 12.5% for the cube and cylindrical specimens, respectively. According to these results, ASR induced internal stresses followed by cracking, has a more detrimental effect on the flexural strength of concrete.

Swamy and Al-Asali (22) have performed mechanical tests and their results were in agreement with the present study. Their results show that the sharp decrease firstly appears in fused silica concrete after 7 months, while an increase in strength occurs in the first days because of early hydration. As compared to the control concrete, the loss in strength of ASR-affected concrete is 77% that is a dramatic value. Swamy and Al-Asali (22) have also concluded that flexural strength is far more sensitive than compressive strength, to ASR.

In another study, Marzouk and Langdon (12) have performed experimental studies of the effect of ASR expansion on the flexural strength by defining concretes as normal strength concrete and high strength concrete, containing highly reactive aggregates or moderately reactive aggregates. After exposure to NaOH solution for 12 weeks, the reduction of the strength of the specimens with the highly reactive aggregate was 9%, if the final flexural strength is compared with the initial strength, after 28-days of curing period. For the specimens with the moderately reactive aggregate, the similar results were obtained, however, all specimens in the de-ionised water show a small increase of the strength after 12 weeks. On the other hand, an apparent increase in the flexural strength of all specimens in the same condition with NaOH solution, is found in this study. The increase of the strength of the specimens with the highly reactive aggregate is 10% and that with the moderately reactive aggregate is 21% (12).

4.3 Effect of ASR expansion on splitting tensile strength of concrete

Cylindrical specimens, 100 mm in diameter and 200 mm in length, were cast to investigate the effect of ASR expansion on splitting tensile strength of concrete. It is worth noting that the specimens themselves were not equipped with the measurement studs; the expansion of identical specimens used for modulus of elasticity and compressive strength was taken as reference. Mix designs are based on RILEM AAR-4.1. ASTM C496 / C496M – 11 for test method in determination of splitting tensile strength, of the specimens. The results are given in Table 4. The losses in splitting tensile strength at 0.04% and 0.10% expansions were 13.7% and

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU BETONÓW, KTÓRE PRZE-
SZŁY REAKCJĘ WODOROTLENKÓW NA I K Z KRZEMIONKĄ

SPLITTING TENSILE STRENGTH OF ASR-AFFECTED CONCRETES

Cylindrical Specimens Walce, φ100 mm × 200 mm	Expansion Rozszerzalność, %		Splitting tensile strength Wytrzymałość na rozcią- ganie przy rozłupywaniu, MPa			Loss in splitting tensile Strata tej wytrzymałości, %	
	G-A	G-B	G-A	G-B	G-C	G-A	G-B
1	0.042	0.103	2.9	2.5	3.2	9.4	21.9
2	0.040	0.099	2.8	2.5	3.6	22.2	30.6
3	0.039	0.099	2.9	2.4	3.2	9.4	25.0
Av.	0.040	0.100	2.9	2.5	3.3	13.7	25.8

modułu elastyczności i wytrzymałości na ściskanie przyjęto jako wyniki odniesienia. Projektowanie mieszanki oparto na normach RILEM AAR-4.1. ASTM C496 / C496M – 11, podających metody oznaczania wytrzymałości próbek na rozłupywanie przy zginaniu. Wyniki podano w tablicy 4. Ubytek wytrzymałości na rozłupywanie przy zginaniu w przypadku rozszerzalności 0,04% i 0,10% wynosił odpowiednio 13,7% i 25,8%. Podobnie do wyników wytrzymałości na ściskanie i zginanie, wytrzymałość na rozłupywanie przy zginaniu uległa także zmniejszeniu pod wpływem RSNK, jednak w różnym stopniu.

W innej pracy Doran (9) stwierdził, że procentowy spadek wytrzymałości na rozłupywanie przy zginaniu próbek walcowych po 28 dniach wyniosła 15%, 25%, 45%, i 60%, odpowiednio przy rozszerzalności 0,05%, 0,10%, 0,25% i 0,50%. Natomiast Clayton i in.(6) oraz Swamy (23) stwierdzili, że spadek wytrzymałości na zginanie betonu zachodzi w rzeczywistości przed pojawieniem się dużej ekspansji.

4.4. Wpływ rozszerzalności RSNK na moduł elastyczności betonu

Moduł elastyczności oznaczono stosując walcowe próbki o wymiarach φ 100 mm × 200 mm. Pomiary modułu elastyczności przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C469/ C469M – 10. Ogólnie szybkość i zakres spadku modułu elastyczności ulega

Tablica 5 / Table 5

MODUŁ ELASTYCZNOŚCI BETONÓW PO ZAJĘCIU REAKCJI WODOROTLENKÓW SODU I POTASU Z KRZEMIONKĄ

MODULUS OF ELASTICITY OF ASR-AFFECTED CONCRETES

Cylindrical Specimens / Walce, φ100 mm × 200 mm	Expansion Rozszerzalność, %		Modulus of elasticity Moduł elastyczności, GPa			Loss in modulus of elasticity Zmniejszenie modułu elastyczności, %	
	G-A	G-B	G-A	G-B	G-C	G-A	G-B
1	0.042	0.103	--	--	--	--	--
2	0.040	0.099	28.2	21.7	33.6	16.1	35.4
3	0.039	0.099	26.9	23.1	36.3	25.9	36.4
Av.	0.040	0.100	27.6	22.4	35.0	21.0	35.9

25.8%, respectively. Similarly to the compressive and flexural strength results, the splitting tensile strength is also negatively affected by ASR, however, at a different degree.

In another study, Doran (9) has concluded that the loss of splitting tensile strength in percentages, of cylindrical specimens for 28-days strength are 15%, 25%, 45% and 60% at expansions of 0.05%, 0.10 %, 0.25% and 0.50%, respectively. On the other hand, Clayton et al (6) and Swamy (23) have concluded that the loss in tensile strength of concrete virtually appears before severe expansion emerged.

4.4. Effect of ASR expansion on the modulus of elasticity of concrete

The modulus of elasticity was determined by using cylindrical specimens of φ100 mm × 200 mm. The measurement of modulus of elasticity was performed in accordance with ASTM C469/ C469M – 10. In general, the rate and extent of loss in modulus of elasticity are affected by expansion rate as shown in Table 5. Similar to the previous analyses, the loss in modulus of elasticity is determined by comparing ASR conditioned groups, G-A and G-B, to the control group G-C. The reduction at 0.04% expansion is 21%; this indicates modulus of elasticity is very sensitive to ASR. Additionally, that 35.9% loss was found at 0.10% expansion prominently supports the outcome for high sensitivity of this property.

Smaoui et al. (21) have investigated the effects of ASR on the modulus of elasticity of concrete, by employing two concretes – low-alkali and high-alkali. Both concretes reveal the result in the same direction for 28 days: even though the elasticity in high alkali concrete is lower than in low-alkali concrete, in the long term. In the opinion of Smaoui et al. (21), this result may be appeared due to lower cracking that occurs in the cement paste when compression stress applied between 0% and 40% of the ultimate strength for both low-alkali and high-alkali concretes.

4.5. Effect of ASR expansion on pull-out strength of concrete

ASTM C900-13 method was used as the basis for the pull-out strength test. Instead of the specified metal to be inserted into fresh concrete required, a 10 mm ribbed reinforcement bar was used. The bar was inserted into fresh concrete cast in 150 mm cube mould. The results are given in Table 6. The expansion values used as reference are from concrete cubes equipped with measurement studs from Table 2.

Table 7 compares the losses in various strengths at limited expansion, equal to 0.04% and high expansion, equal to 0.10%. The pull-out strength seems more sensitive than compressive

Tablica 6 / Table 6

PULL-OUT STRENGTH OF ASR-AFFECTED CONCRETES

WYTRZYMAŁOŚĆ PULL-OUT BETONU PO REAKCJI KRZEMIONKI Z WODOROTLENKAMI SODU I POTASU

Cube Specimens Kostki, 150mm	Expansion Rozszerzalność, %		Pull-out strength, MPa			Loss in pull-out strength/ spadek wytrzymałości, %	
	G-A	G-B	G-A	G-B	G-C	G-A	G-B
1	0.042	0.101	3.5	2.6	3.6	2.8	27.8
2	0.042	0.101	3.3	2.8	3.7	10.8	24.3
3	0.043	0.101	3.2	2.8	3.5	8.6	20.0
Av.	0.042	0.101	3.3	2.7	3.6	7.4	24.0

strength and nearly as sensitive as splitting tensile strength but less than flexural strength and modulus of elasticity, particularly for expansions greater than 0.10%. Table 7 also shows the deterioration ratio defined by the loss percentage at high expansion, divided by the loss at limit expansion. It should be noted that the ratio in pull-out strength loss between 0.04% expansion and 0.10% expansion is the highest, among all other mechanical properties. The value is 3.2 for pull-out strength, and between 1.4 and 2.1 for all others. This could be caused by the cracks widening as ASR is progressing, thus, the bonding between concrete and the bar was further deteriorated, as expansion increases.

Tablica 7 / Table 7

SPADEK WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH W %, BETONÓW PO REAKCJI WODOROTLENKÓW NA I K Z KRZEMIONKĄ

MECHANICAL PROPERTIES LOSS IN PERCENTAGES OF ASR-AFFECTED CONCRETO

Mechanical property Właściwość mechaniczna	Loss / Strata, %		Deterioration Ratio Współczynnik postępu zniszczenia
	0.04% expansion rozszerzalność 0,04%	0.10% expansion rozszerzalność 0,10%	$\frac{\text{Expansion 0.10\%}}{\text{Expansion 0.04\%}}$ $\frac{\text{Rozszerzalność 0,04\%}}{\text{Rozszerzalność 0,10\%}}$
Compressive Strength [Cube / Cylinder] Wytrzymałość na ściskanie [Kostka / Walec]	7.4/8.7	13.9/12.5	1.9/1.4
Flexural Strength Wytrzymałość na zginanie	22.1	45.6	2.1
Splitting Tensile Strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	13.7	25.8	1.9
Modulus of Elasticity Moduł elastyczności	21.0	35.9	1.7
Pull-out Strength Wytrzymałość na wrywanie	7.4	24.0	3.2

przebiegowi rozszerzalności, jak to podano w tablicy 5. Podobnie do poprzednich doświadczeń spadek modułu elastyczności oznaczono porównując grupy betonów G-A i G-B, które przeszły proces RSNK, do grupy porównawczej G-C. W przypadku rozszerzalności 0,04% zmniejszenie modułu wynosi 21%, co wskazuje na bardzo duży wpływ RSNK na moduł elastyczności. Dodatkowo, jego zmniejszenie o 35,9% stwierdzone w przypadku 0,10% rozszerzalności, wykazuje doskonale jego zależność od tego parametru.

Smaoui i in. (21) zbadali wpływ RSNK na moduł elastyczności stosując dwa betony – o małej i dużej zawartości alkaliów. Oba betony uległy takim samym zmianom po 28 dniach: elastyczność betonu o dużej zawartości alkaliów była mniejsza niż betonu o małej zawartości alkaliów, po długim okresie. Według Smaoui i in. (21) ten wynik może być spowodowany przez mniejsze spękania, które wystąpiły w zaczynie cementowym uboższym w alkalia, w związku z naprężeniami ściskającymi w zakresie od 0% do 40% ostatecznej wytrzymałości, w przypadku obu betonów o niskiej i dużej zawartości alkaliów.

4.6 Effect of specimens geometry on ASR expansion

Expansion measurement expressed in terms of length change is a basic, widely accepted method for monitoring the physical effect of ASR. In this study, reference stainless steel studs were installed in the end faces of the prisms and the cylinders, on two surfaces of cube specimens. The gauge lengths were 285 mm, 200 mm, and 125 mm for prisms, cylinder and cubes, respectively. The measurements of the prisms and the cylinders were made with a digital length comparator [Fig. 1-b] with a sensitivity of 0.001 mm; and the digital calliper with a sensitivity of 0.001 mm, was used for the cubes. For each geometry, six specimens of G-A and G-B concretes were utilized to measure expansion. The results are given in Tables 8 and 9. The data points represent the average of three specimens. The measurements were done until after the defined limits – 0.04% and 0.10%, were reached. The expansion results of G-A and G-B concretes are also plotted in Figs. 2 and 3.

Tablica 8 / Table 8

WPLYW GEOMETRII PRÓBK NA ROZSZERZALNOŚĆ W WYNIKU REAKCJI WODOROTLENKÓW SODU I POTASU Z KRZEMIONKĄ

EFFECT OF SPECIMEN GEOMETRY ON ASR EXPANSION

Age, weeks Wiek, tygodnie	Avg. Expansion of G-A concretes Średnia ekspansja betonów G-A, %		
	Prism	Cube	Cylinder
Time elapsed at 60°C and 100 % RH / Czas przetrzymywania próbek w 60°C i 100% WW			
2	0.018	0.017	0.014
3	0.028	0.024	0.021
4	0.039	0.034	0.029
6	0.046	0.042	0.036
8	-	-	0.040

4.5. Wpływ rozszerzalności RSNK na wytrzymałość „pull-out” betonu

Stosowano metodę ASTM C900-13, jako podstawę do badania wytrzymałości „pull-out”. W miejsce specjalnego metalu do zanurzenia go w świeżym betonie, zastosowano żebrowany pręt zbrojeniowy, o średnicy 10 mm. Ten pręt wprowadzono do świeżego betonu, w 150 mm formie sześcienniej. Wyniki podano w tablicy 6. Do wielkości rozszerzalności zastosowanej jako odniesienia użyto kostki betonowe wyposażone w pomiarowe pręty podane w tablicy 2.

W tablicy 7 porównano ubytki różnych wytrzymałości w przypadku ograniczonej rozszerzalności wynoszącej 0,04% i dużej rozszerzalności równej 0,10%. Wytrzymałość „pull out” wydaje się bardziej zależna niż wytrzymałość na ściskanie i prawie tak zależna jak rozłupywanie przy zginaniu, lecz mniej niż wytrzymałość na zginanie i moduł elastyczności, szczególnie dla rozszerzalności przekraczającej 0,10%. W tablicy 7 można stwierdzić stopień zniszczenia, określony jako procentowy spadek przekraczający przy dużej rozszerzalności podzielonej przez ubytek przy ograniczonej rozszerzalności. Trzeba podkreślić, że spadek wytrzymałości „pull out” pomiędzy rozszerzalnością 0,04% i 10%, jest największy ze wszystkich właściwości mechanicznych. Wielkość ta dla wytrzymałości „pull out” wynosi 3,2, a dla innych przypadków pomiędzy 1,4 i 2,1. Może to być spowodowane przez zwiększenie rozstępu pęknięć przy postępie RSNK, w związku z czym wiązanie pomiędzy betonem i prętem ulega dalszemu zniszczeniu, w miarę wzrostu rozszerzalności.

4.6. Wpływ geometrii próbek na rozszerzalność RSNK

Pomiar rozszerzalności, wyrażony jako zmiany długości, jest podstawową, powszechnie akceptowaną metodą w celu śledzenia fizycznego efektu RSNK. W tej pracy, zainstalowano stalowe słupki jako odniesienie na końcu powierzchni beleczek i walców oraz na dwóch powierzchniach kostek. Urządzenia pomiarowe miały długość 285 mm, 200 mm i 125 mm, odpowiednio dla beleczek, walców i kostek. Pomiary beleczek i walców prowadzono cyfrowym komparatorem długości [Rys. 1-b] o dokładności 0,001 mm i cyfrową suwmiarką o dokładności 0,001 mm, w przypadku kostek.

Table 9 gives comparative results of expansion for various specimen geometry, with respect to age. From taking the first measurement of expansion at the end of the second week after casting, the results show that the highest expansion rate among three types of specimens is in prisms with an expansion of 0.018% and the lowest one is in cylinders with an expansion of 0.014%. For the expansion in cubes, it is 0.016%. It is worth noting that these values are very close. However, the difference increases proportionally in the following weeks. After 14 weeks of exposure to ASR conditioning at 60°C over water, none of the groups exceeds the limit of 0.10%, required to perform the second step of this study, including tests for mechanical properties. Additionally, the increased rate of expansion starts to decrease after 10 weeks. Therefore, the specimens were transferred to NaOH solution at 60°C to promote further reaction, until the high expansion limit was reached. Two weeks of exposure in NaOH solution was enough for the prisms to attain the limit but not for cubes and cylinders. Cubes reached the 0.10% expansion at the end of the third week whereas the cylinder had the end at the fourth week.

In general, with increasing expansion, cracks become wider and visible, and their concentration increase on concrete surface. Simultaneously, surface cracks become wider, deeper and intense visually [Fig. 4].

Tablica 9 / Table 9

SZYBKOŚĆ ROZSZERZALNOŚCI BETONÓW G-B O WSZYSTKICH KSZTAŁTACH PRÓBEK

EXPANSION RATES OF G-B CONCRETES FOR ALL SHAPES OF SPECIMENS

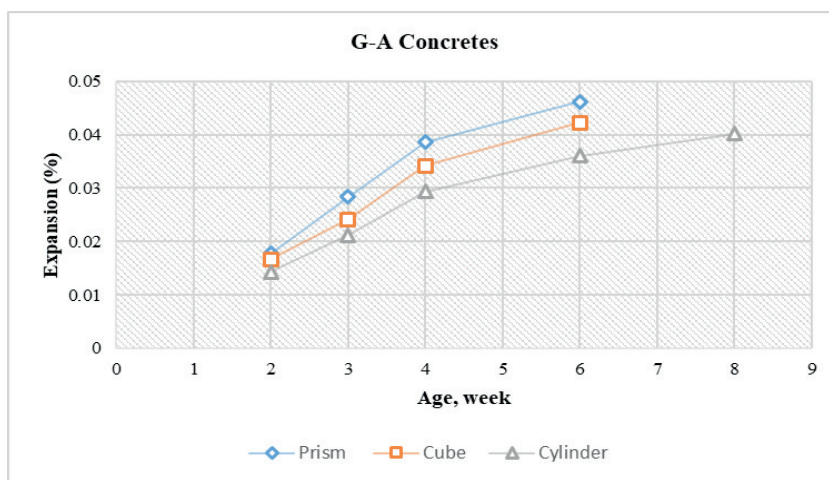
Age, weeks Wiek, tygodnie	Average Expansion for G-B concretes Średnia rozszerzalność betonów G-B, %		
	Prisms Beleczki	Cubes Kostki	Cylinder Walec
Time elapsed at 60°C and 100 % RH / Czas dojrzewania w 60°C i 100% WW			
2	0.018	0.016	0.014
3	0.030	0.025	0.020
4	0.039	0.034	0.028
6	0.048	0.043	0.035
8	0.056	0.050	0.039
10	0.063	0.057	0.044
12	0.067	0.060	0.049
14	0.069	0.062	0.051
Time elapsed at 60°C and NaOH solution / Czas w 60°C w roztworze NaOH			
15	0.089	0.080	0.070
16	0.106	0.092	0.082
17		0.101	0.091
18			0.100

W przypadku każdego rodzaju próbek przygotowano ich po sześć z betonów G-A i G-B, do pomiaru rozszerzalności. Wyniki podano w tablicach 8 i 9. Punkty określające dane są średnią z trzech próbek. Pomiary prowadzono aż do osiągnięcia granicznych rozszerzalności – 0,04% i 0,10%. Wyniki rozszerzalności betonów G-A i G-B także ujęto na rysunkach 2 i 3.

W tabelicy 9 podano porównawcze wyniki rozszerzalności dla próbek o różnych geometriach w stosunku do wieku. Przyjmując pierwszy pomiar rozszerzalności na końcu drugiego tygodnia po zaformowaniu, wyniki pokazują, że największą szybkość rozszerzalności pomiędzy trzema rodzajami próbek mają beleczki o rozszerzalności 0,018%, a najmniejszą walce, o rozszerzalności 0,014%. W przypadku kostek wynosi ona 0,016%. Trzeba podkreślić, że te wielkości są bardzo zbliżone. Jednak różnica wzrasta proporcjonalnie do czasu trwania w tygodniach. Po 14 tygodniach wystawienia na warunki odpowiadające RSNK w 60°C nad wodą, żadna z tych grup nie przekroczyła granicy 0,10%, wymaganej do przejścia do drugiego kroku w tej próbie, obejmującej oznaczenie właściwości mechanicznych. Ponadto, wzrost szybkości rozszerzalności przechodzi w fazę spadku szybkości po 10 tygodniach. W związku z tym próbki przeniesiono do roztworu NaOH w 60°C w celu aktywacji dalszej reakcji, aż osiągnięto granicę dużej rozszerzalności. Dwa tygodnie poddania działaniu roztworu NaOH wystarczyło dla beleczek do osiągnięcia tej granicy, jednak nie było wystarczające dla kostek i walców. Kostki osiągnęły rozszerzalność 0,10% przy końcu trzeciego tygodnia, podczas gdy walce na końcu czwartego tygodnia. Ogólnie z rosnącą rozszerzalnością, pęknięcia mają większą widoczną rozwartość i ich udział na powierzchni betonu także wzrasta. Równocześnie ze wzrostem powierzchni pęknięć wzrasta także ich zagęszczenie i stają się widoczniejsze wzrokowo [Rys. 4].

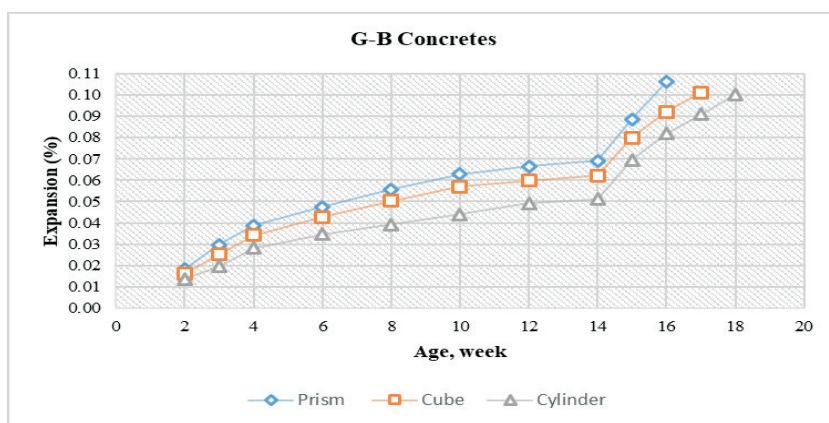
5. Wnioski

W pracy badano wpływ rozszerzalności RSNK na mechaniczne właściwości betonu, a przede wszystkim wytrzymałość na ściskanie i zginanie, na rozłupywanie przy zginaniu, wytrzymałość „pull out”. Stwierdzono, że ogólnie RSNK wpływa niekorzystnie na wszystkie mechaniczne właściwości betonu, jednak w różnym stopniu. Wnioski wynikające z doświadczeń można podsumować następująco:



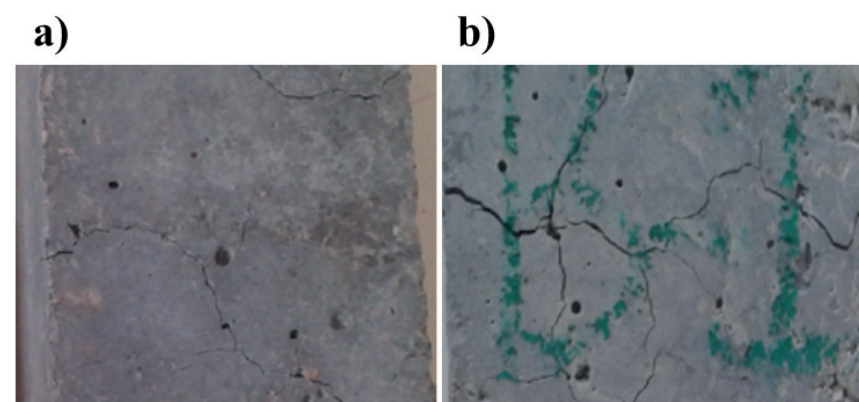
Rys. 2. Krzywe szybkości rozszerzalności betonów G-A dla różnych kształtów próbek

Fig. 2. The curves of expansion rates of G-A concretes for various specimen geometry



Rys. 3. Krzywe szybkości rozszerzalności betonów G-B dla wszystkich kształtów próbek

Fig. 3. The curves of expansion rates of G-B concretes for all shapes of specimens



Rys. 4. Pęknięcia na powierzchni betonu: a) beleczka z betonu G-A, b) z betonu G-B

Fig. 4. Cracking pattern on concrete surface: (a) G-A concrete prism; (b) G-B concrete prism

5. Conclusions

In this study, the effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete including compressive, flexural, splitting tensile, pull-out strengths and modulus of elasticity, were investigated. Moreover, the effect of specimen geometry on ASR expansion

1. Wytrzymałość na zginanie jest wskaźnikiem uszkodzeń RSNK. Badanie wytrzymałości na zginanie i na rozłupywanie pokazują duży ich spadek, gdy rozszerzalność RSNK jest duża
2. Moduł elastyczności ulega dużym zmianom pod wpływem RSNK, stwierdzono duży zmniejszenie o 21,0% gdy rozszerzalność wyniosła 0,04% i 35,9% dla rozszerzalności 0,10%.
3. Stosunkowo małe straty stwierdzono w przypadku wytrzymałości na ściskanie dla różnych szybkości rozszerzalności, w porównaniu do innych właściwości mechanicznych. Można więc stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie ulega mniejszemu wpływowi RSNK i prawdopodobnie nie jest dobrym wskaźnikiem RSNK. Wytrzymałość na ściskanie w przypadku próbek walcowych ma nieco mniejsze zmiany od kostek.
4. Wytrzymałość „Pull Out” ulega zmniejszeniu w przypadku rozszerzalności RSNK. Spadek jest większy niż dla wytrzymałości na ściskanie lecz mniejszy w porównaniu z wytrzymałością na zginanie i modułem elastyczności.
5. Pomiar rozszerzalności wykazały, że szybkość i zasięg szkodliwej rozszerzalności zależy od geometrii próbek. Beleczki wykazują większą rozszerzalność przy różnych szybkościach niż kostki i walce, w związku z czym mogą osiągnąć wybraną graniczną rozszerzalność to znaczy 0,04% i 0,10%, przechodząc badania najszybciej. Walce wykazują większą odporność na rozszerzalność w porównaniu z beleczkami i przypuszczalnie z bezkształtnymi próbkami.

was examined. It was observed that, in general, ASR affects all mechanical properties of the concrete negatively, however, at varying degrees. The conclusions obtained from these experiments can be summarized as follows:

1. Tensile strength is a reliable indicator of ASR damage. Both flexural and splitting tests show high strength reductions when ASR expansion is high.
2. Modulus of elasticity is very sensitive to ASR; the reductions are significant, recorded as 21.0% at 0.04% expansion and 35.9% at 0.10% expansion.
3. Relatively low losses are found for compressive strength at any expansion rates, if compared with other mechanical properties. Therefore, it can be concluded that compressive strength is less sensitive to ASR and perhaps is not a good indicator of ASR. Compressive strength for cylindrical specimens seems slightly less sensitive than that for cube specimens.
4. Pull-out strength is affected negatively by ASR expansion. The losses are higher than compressive strength but lower compared to tensile strength and modulus of elasticity.
5. The expansion measurements reveal that the rate and extent of detrimental expansion are directly affected by specimen geometry. The prisms show higher expansion at any expansion rate than cubes and cylinders, so they can reach the benchmark expansions i.e., 0.04% and 0.10% to perform tests earliest among all. The cylinders show more resistance to expansion compared to prisms and cubes, due probably to non-angular structure.

Literatura / References

- 1.T. Ahmed, B. Burley, S. Rigden, A.I. Abu-Tair, The Effect of Alkali Reactivity on the Mechanical Properties of Concrete. *Constr. Build. Mater.* **17**, 123–144 (2003).
- 2.ASTM C1260, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregate (Mortar – Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, (2014).
- 3.ASTM C1293, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, Annual Book of ASTM Standards, (2018).
- 4.ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standards, (2014).
- 5.ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, (2017).
- 6.N. Clayton, K.J. Currie, R.M. Moss, The Effect of Alkali Silica Reaction on The Strength of Pre-Stressed Concrete Beams. *Eng. Struct.* **15**, 287–92 (1990).
- 7.R.J. Cope, L. Slade, Effect of AAR on Shear Capacity of Beams, Without Shear Reinforcement. 9th Int. Conf. on AAR in Concrete, London, UK, 184 (1992).
- 8.CSA A23.2-14A. Potential Expansivity of Aggregates Due to AAR in Concrete Prisms, Canadian Standards Association, (2014).
- 9.D.K. Doran, Structural Effects of Alkali Aggregate Reaction. The Institution of Structural Engineer, London (1992).
- 10.G. Giaccio, R. Zerbino, J.M. Ponce, O.R. Batic, Mechanical behaviour of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* **38**, 993-1004(2008).

- 11.A.E.K. Jones, L.A. Clark, The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment. *Eng. Struct.* **20**, 785-791 (1998).
- 12.H. Marzouk, S. Langdon, The Effect of Alkali Aggregate Reactivity on the Mechanical Properties of High and Normal Strength Concrete, *Cem. Concr. Comp.* **25**, 549–556 (2003).
- 13.S. Mindess, J.F. Young, *Concrete*. New Jersey: Prentice Hall (1981).
- 14.A. Mohammadi, E.B. Ebrahim Ghiasvand, M. Mahmoud Nili, Relation between Mechanical Properties of Concrete and Alkali-Silica Reaction (ASR); a review. *Constr. Build. Mater.* **258**, 119567 (2020).
- 15.L. Monette, J. Gardner, P. Grattan-Bellew, Structural effects of the alkali-silica reaction on non-loaded and loaded reinforced concrete beams. *Proc. 11th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction, ICON/CANMET*, 999–1008 (2000).
- 16.A. Neville, *Properties of Concrete* (3rd ed.) New York: Longman Scientific and Technical (1990).
- 17.M. Pathirage, F. Bousikhane, M. D'Ambrosia, M. Alnaggar, G. Cusatis G (2018). Effect of alkali silica reaction on the mechanical properties of aging mortar bars: Experiments and numerical modelling. *International Journal of Damage Mechanics*, 1-32.
- 18.RILEM AAR-2, Detection of potential alkali-reactivity – accelerated mortar-bar test method for aggregates, In: *Special Issue RILEM TC 219-ACS, Materials & Structure*, (2015).
- 19.RILEM AAR-4, Detection of potential alkali-reactivity - accelerated method for testing aggregate combinations using concrete prisms, In: *Special Issue RILEM TC 219-ACS, Materials & Structure* (2015).
- 20.F. Saint-Pierre, P. Rivard, G. Ballivy, Measurement of Alkali-Silica Reaction Progression by Ultrasonic Waves Attenuation, *Cem. Concr. Res.* **37**, 948–956 (2007).
- 21.N. Smaoui, M.A. Berube, B. Fournier, B. Bissonnette, B. Durand, Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. *Cem. Concr. Res.* **35**, 203-212 (2005).
- 22.R.N. Swamy, N.M. Al-Asali, Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, *ACI Mater. J.* **85**-M41, 367-374 (1988).
- 23.R.N. Swamy, *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow and London, UK: Blackie and Son Ltd (1992).