

dr inż. Filip Chyliński^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-7322-8087
 mgr inż. Piotr Kupisz¹⁾
 ORCID: 0000-0002-8816-8250
 dr inż. Agnieszka Michalik¹⁾
 ORCID: 0000-0003-3586-9985
 dr inż. Jacek Zychowicz²⁾
 ORCID: 0000-0002-2153-0081

Assessment of possibility of decreasing alkali reactivity of aggregates by using pozzolanic materials

Ocena możliwości obniżenia reaktywności alkalicznej kruszyw przez dodatek materiałów puzolanowych

DOI: 10.15199/33.2024.10.06

Abstract. The article presents preliminary research results aimed at assessing the possibility of reducing the alkaline reactivity of silicate aggregates (ASR – *Alkali-Silica Reaction*) by the addition of two pozzolanic materials – siliceous fly ash and waste ilmenite mud generated in the titanium dioxide production process. The tests involved quartzite aggregate, which has good physical and mechanical properties, however this aggregate is characterized by significant alkaline reactivity and is therefore not used for the production of concrete. The results of preliminary tests confirmed the potential possibility of reducing the risk of ASR by adding pozzolanic materials, including waste ilmenite mud.

Keywords: alkaline reactivity of aggregates; quartzite aggregate; pozzolanic additives; siliceous fly ash; waste ilmenite mud.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań, których celem jest ocena możliwości obniżenia reaktywności alkalicznej kruszyw krzemianowych (ASR – *Alkali-Silica Reaction*) przez dodatek dwóch materiałów puzolanowych – krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowego szlamu ilmenitowego powstającego w procesie produkcji bieli tytanowej. Badaniom poddano kruszywo kwarcytowe, odznaczające się dobrymi właściwościami fizykomechanicznymi, ale kruszywo to cechuje się dużą reaktywnością alkaliczną i dlatego nie jest stosowane do produkcji betonu. Wyniki wstępnych badań potwierdziły możliwość obniżenia ryzyka ASR przez dodatek materiałów puzolanowych, w tym również odpadowego szlamu ilmenitowego.

Słowa kluczowe: reaktywność alkaliczna kruszyw; kruszywo kwarcytowe; dodatki puzolanowe; popiół lotny krzemionkowy; odpadowy szlam ilmenitowy.

Sustainable economic development, including but not limited to the building sector, forces the search for alternative raw materials for the production of building materials [1]. Concrete is among the most popular building materials. Aggregate, which is the key volumetric component of concrete, constitutes 70 – 80% of its volume, 40 – 50% of which is coarse aggregate. Considering the high and constantly increasing demand for concrete, high-quality aggregate is very much needed. Nevertheless, the quality of aggregates available in Poland is diversified, and raw material availability for challenging investments is limited to a few deposits in southern Poland [2]. Another problem related to the potential use of aggregate for concrete production is the possibility of corrosion related to alkali-aggregate reactions (AAR), including alkali-silica reactions (ASR). ASR is a corrosion process resulting from active siliceous minerals reacting with alkali present in concrete. Consequently, products with much larger volume than the substrates are formed in the hardened concrete [3]. In suitable environmental conditions (e.g., the presence of

Z równoważony rozwój gospodarki, a szczególnie sektora budowlanego wymusza poszukiwanie alternatywnych surowców do produkcji wyrobów budowlanych [1]. Jednym z najpowszechniej stosowanych wyrobów budowlanych jest beton. Jego głównym składnikiem pod względem objętościowym jest kruszywo, które stanowi 70 – 80% objętości betonu, z czego 40 – 50% to kruszywo grube. Z uwagi na bardzo wysokie i stale rosnące zapotrzebowanie na beton popyt na kruszywa dobrej jakości stale wzrasta. Niemniej jednak jakość kruszyw dostępnych w Polsce jest zróżnicowana, a dostępność surowca potrzebnego do „wymagających” inwestycji jest ograniczona do kilku złóż na południu Polski [2]. Dodatkowym problemem związanym z wykorzystaniem kruszyw do produkcji betonu jest zagrożenie korozją związaną z reaktywnością alkaliczną kruszyw (AAR – *alkali-aggregate reaction*), w tym reakcją alkalia-krzemionka (ASR – *alkali-silica reaction*). ASR jest procesem korozyjnym wynikającym z przebiegu reakcji aktywnych minerałów krzemionkowych z alkaliami obecnymi w betonie. W wyniku tego w stwardniałym betonie powstają produkty o znacznie większej objętości niż substraty [3]. Proces ten w odpowiednich warunkach środowiskowych (m. in. w obecności wilgoci) może prowadzić do powstania uszkodzeń elementów betonowych i żelbetowych. Ponadto, jeśli beton jest narażony na cykliczne oddziaływanie zamrażania/rozmarza-

¹⁾ Building Research Institute

²⁾ Military University of Technology

^{*}) Correspondence address: f.chylinski@itb.pl

moisture), the process can damage concrete and reinforced concrete elements. Moreover, water penetrates the microcracks formed due to ASR if the concrete is exposed to freeze/thaw cycles. Then, both processes can damage the entire construction [4, 5].

Additional requirements for aggregate properties related to the ASR risk occurrence contribute to further limitations in the use of aggregate resources available in Poland [6]. Quartzite is an example of such a reactive aggregate. The material's performance is suitable for concrete technology. It is characterised by high resistance to refining and abrasion, high compressive strength, low polishability and absorbability, and good freeze resistance. The characteristics levels match or outclass those of the best magmatic aggregates. This should constitute their application potential. Nevertheless, the aggregate is not used in concrete technology due to its alkali reactivity. Quartzite is a very hard and resistant metamorphic rock, primarily composed of quartz. It may contain other minerals such as feldspars (orthoclase, microcline and plagioclase), microcrystalline or cryptocrystalline silica and mica. The minerals can be subject to alkali-silica reactions. Various ASR testing methods are used nowadays.

They are described, e.g., in PN-B, ASTM and AASHTO standards, RILEM recommendations and procedures of the GDDKiA (General Directorate of National Roads and Motorways), enabling the determination of the aggregates' potential reactivity. The methods, especially the accelerated ones, assume conducting tests in highly aggressive conditions (high alkali concentration and elevated temperature), and the composition of the tested concrete and mortar specimens often deviates from the standard mixes. Moreover, the test methods used for determining the alkali reactivity of aggregates assume the use of CEM I cement, whose production in Europe is about to end soon due to its high carbon footprint. This cement type is usually modified by adding other primary ingredients or in combination with additives. The modifications make concrete mixes less aggressive for aggregates, potentially reducing the possibility of an alkali-silica reaction. That is why the impact of using concrete additives on limiting the ASR shall be determined based on the example of a specific commercial concrete mix formula. RILEM worked to develop AAR-10 [7] guidelines. They formulate the recommendations for determining the maximum safe alkali content in a concrete mix that contains potentially reactive aggregate. A similar approach was followed in AASHTO PP65-11 and ASTM C1567 [8, 9].

Based on the initial test results, this article assesses the possibility of reducing aggregates' alkali reactivity by using pozzolanic additives. Moreover, the reactivity of quartzite aggregates in concrete was tested. CEM III/A blast furnace slag cement was used instead of CEM I, next to pozzolanic additives. Siliceous fly ash and waste ilmenite mud were the applied pozzolanic materials. Ilmenite mud is a fine waste formed during ilmenite digestion. Ilmenite is the primary raw material for the sulphate-based production of titanium

nia, w mikropęknięcia powstałe w wyniku reakcji ASR wnika woda, wówczas oba procesy mogą powodować zniszczenie nawet całych konstrukcji [4, 5].

Dodatkowe wymagania dotyczące właściwości kruszywa, związane z ryzykiem wystąpienia ASR powodują dalsze ograniczenie wykorzystania zasobów kruszywa dostępnych w Polsce [6]. Przykładem kruszywa reaktywnego jest kwarcyt. Jest to materiał o bardzo dobrych właściwościach użytkowych pod kątem technologii betonu, obejmujących dużą odporność na rozdrabnianie i ścieranie, dużą wytrzymałość na ściskanie, małą polerowalność i nasiąkliwość oraz dobrą mrozoodporność. Cechy te są na poziomie najlepszych kruszyw magmowych, a często ze względu na wykazywaną reaktywność alkaliczną, kruszywo to nie znajduje jednak zastosowania w technologii betonu. Kwarcyt to bardzo twarda i odporna skała metamorficzna, złożona przede wszystkim z kwarcu. Mogą w niej jednak występować także inne minerały, np. z grupy skaleni (ortoklaz, mikroklin, plagioklaz), mikrokrystaliczna lub kryptokrystaliczna krzemionka, mika, ulegające reakcji alkalia-krzemionka.

Obecnie stosuje się wiele metod badawczych dotyczących ASR, opisanych m.in. w normach PN-B, ASTM, AASHTO, rekomendacjach RILEM czy procedurach GDDKiA, umożliwiających określenie potencjalnej reaktywności kruszywa. Metody te, przede wszystkim przyspieszone, zakładają jednak prowadzenie badań w bardzo agresywnych warunkach (duże stężenie alkaliów oraz podwyższona temperatura), a skład badanych betonów lub zapraw często odbiega od faktycznie stosowanych mieszanek. Ponadto metody określania reaktywności alkalicznej kruszywa zakładają wykorzystanie cementu CEM I, który obecnie przestaje być produkowany w Europie ze względu na wysoki ślad węglowy. Cement ten jest najczęściej modyfikowany przez dodawanie innych składników głównych lub w połączeniu z dodatkami. Stosowane modyfikacje powodują, że potencjalnie zmniejsza się prawdopodobieństwo wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka. Konieczne jest więc określenie wpływu dodatków do betonu na ograniczenie wystąpienia ASR na przykładzie konkretnej powszechnie stosowanej receptury mieszanki betonowej. W ramach prac RILEM powstały rekomendacje AAR-10 [7], w których sformułowano zalecenia dotyczące wyznaczania maksymalnej, bezpiecznej zawartości alkaliów w mieszance betonowej zawierającej kruszywo potencjalnie reaktywne. Podobne podejście zastosowano w dokumencie AASHTO PP65-11 oraz ASTM C1567 [8, 9].

W artykule, na podstawie wstępnych wyników prowadzonych badań, zaprezentowano ocenę możliwości zmniejszenia reaktywności alkalicznej kruszywa przez zastosowanie dodatków pucolanowych. Ponadto, przeprowadzono badania reaktywności kruszywa kwarcytowych w betonach, w których oprócz dodatków pucolanowych zastosowano cement żużlowy CEM III/A zamiast cementu CEM I. Zastosowanymi materiałami pucolanowymi były krzemionkowy popiół lotny oraz odpadowy szlam ilmenitowy, który jest drobnopiękistym odpadem, powstającym przy roztwarzaniu ilmenitu będącego podstawowym surowcem w produkcji bieli tytanowej metodą siarczanową. Jak wykazały wyniki badań realizowanych w Instytucie Techniki Budowlanej, odpad ten charakteryzuje się aktywnością pucolanową na poziomie zbliżonym do krzemionkowych popiołów lot-

white. The results of tests conducted in the Building Research Institute demonstrated that the waste's pozzolanic activity is similar to that of siliceous fly ash [10]. The literature analysis [8, 11] revealed the possibility of AAR effective reduction by adding fly ash to the concrete mix. Based on many years of observations, e.g., in the USA [8, 11], no cases of AAR were observed in concrete with over 20% content of fly ash or 50% of blast furnace slag. According to test results, the application of microsilica does not offer so good AAR prevention results; this is particularly true for silica with higher alkali content [8, 11]. Moreover, the pozzolanic activity of ilmenite mud was discovered to be similar to that of high-quality fly ash [12, 13]. This paper presents the possibilities of using the referenced waste to reduce the AAR, which is an additional novelty aspect.

Test methods

The compressive strength of concrete was tested on cubic samples (150 mm edge) in accordance with PN-EN 12390-3 [14]. Three specimens of each concrete type were tested. Before the test, the samples were cured in water at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ for 56 days [15].

Alkali reactivity of quartzite aggregates was tested with a long-term method according to ASTM C1293 [16], using the modifications described in RILEM AAR-10 [7]. They approve testing concrete whose composition deviates from the recommended one and with no additional increase in alkali content. Concrete beams' shrinkage (expansion) was measured for several modified concrete compositions. The concrete mix's reference formula (REF) was a standard one for reinforced concrete bridge components, where the risk of ASR is aggravated due to a high cement content and higher alkali concentration, as well as a periodically humid environment promoting corrosion. The designed compressive strength grade was C35/45 ($w/c=0.45$). The design assumptions considered the impact of an aggressive environment in the XC4, XA1, XD3, and XF4 exposure classes in accordance with PN-EN 206 recommendations [17].

In order to keep the bridge concrete's formula as close to the original as possible, neither the aggregate ratio nor the grain size distribution curve was modified, contrary to the recommendations of the PB-2 testing procedure of the GDDKiA [18]. Additionally, following the RILEM AAR-10 recommendations [7], no air-entraining admixture was used, typically applied in bridge concrete production, as it could negatively impact the expansion measurements. Then, the reference formula (REF) was modified (Kw). The whole 2/8 and 8/16 coarse non-reactive (granite) aggregate was replaced with 2/8 and 8/16 coarse, alkali-reactive (quartzite) aggregate. While replacing the coarse aggregate, the grain size distribution of the quartzite and granite used in the tests was as similar as possible.

Another modification assumed adding siliceous fly ash (Kw-FA) complying with PN-EN 450-1 [19] in the maximum amount according to the „K” factor (value) concept described

nych [10]. Analiza literatury [8, 11] wykazała możliwość efektywnego obniżenia ryzyka zajścia AAR przez zastosowanie dodatku popiołu lotnego do mieszanki betonowej. Na podstawie wieloletnich obserwacji prowadzonych m.in. w Stanach Zjednoczonych [8, 11] nie stwierdzono żadnego przypadku występowania AAR w betonach zawierających więcej niż 20% popiołu lotnego lub 50% żużla wielkopieczowego. Wyniki badań pokazują natomiast, że stosowanie mikrokrzemionki nie daje tak dobrych rezultatów w prewencji AAR, szczególnie mikrokrzemionki ze zwiększoną zawartością alkaliów [8, 11]. Stwierdzono również, że szlam ilmenitowy wykazuje aktywność pucolanową zbliżoną do krzemionkowych popiołów lotnych bardzo dobrej jakości [12, 13]. W artykule przedstawiono również możliwości zastosowania tego odpadu w celu ograniczenia wystąpienia AAR, co stanowi dodatkowy aspekt nowości.

Metody badań

Wytrzymałość na ściskanie betonu zbadano na próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [14]. W przypadku każdego rodzaju betonu badaniom poddano trzy próbki, które przed badaniem dojrzewały w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 56 dni [15].

Reaktywność alkaliczną kruszyw kwarcytowych określono metodą długą, zgodnie z normą ASTM C1293 [16], z zastosowaniem modyfikacji opisanych w dokumencie RILEM AAR-10 [7], które dopuszczają badanie betonów o składzie odbiegającym od zalecanego i bez dodatkowego zwiększania zawartości alkaliów. Pomiary skurczu (ekspansji) belek betonowych zostały przeprowadzone w przypadku kilku odpowiednio zmodyfikowanych składów betonu. Receptura wyjściowa (REF) mieszanki betonowej była typową recepturą betonu stosowanego do wykonywania żelbetowych elementów mostowych, gdzie ryzyko wystąpienia reakcji ASR jest spotęgowane ze względu na dużą zawartość cementu i zwiększone stężenie alkaliów oraz okresowo wilgotne warunki środowiskowe, sprzyjające rozwojowi korozji. Zaprojektowano klasę wytrzymałości na ściskanie C35/45 ($w/c=0.45$). Założenia projektowe uwzględniały oddziaływanie środowiska agresywnego w klasach ekspozycji XC4, XA1, XD3, XF4 zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 206 [17].

W celu zachowania możliwie oryginalnej receptury betonu mostowego nie zmieniano proporcji kruszyw ani krzywej uziarnienia w przeciwieństwie do zaleceń procedury badawczej PB-2 GDDKiA [18]. Dodatkowo, zgodnie z zaleceniami dokumentu RILEM AAR-10 [7], nie zastosowano domieszki napowietrzającej, stosowanej w produkcji betonów mostowych, gdyż mogłoby to wpływać niekorzystnie na prowadzone pomiary ekspansji. Następnie receptura podstawowa (REF) została zmodyfikowana (Kw), zamieniono bowiem w całości kruszywo grube 2/8 i 8/16 niereaktywne (granit) na kruszywo grube 2/8 i 8/16 reaktywne alkalicznie (kwarcyt). Zamieniając kruszywo grube, zastosowano w badaniach możliwie zbliżony rozkład uziarnienia kwarcytu i granitu.

Kolejna modyfikacja zakładała użycie dodatku krzemionkowego popiołu lotnego (Kw-FA), zgodnego z PN-EN 450-1 [19] w maksymalnej ilości zgodnej z koncepcją współczynnika „k”, opisanej w normie PN-EN 206 [17]. Ponadto, zastosowano

in PN-EN 206 [17]. Moreover, waste ilmenite mud (Kw-RM) was used in the mass amount corresponding to fly ash. Successive modifications involved replacing CEM I Portland cement with CEM III/A blast furnace cement (Kw-BF-FA and Kw-BF-RM). The modifications were aimed to further reduce the potential ASR risk by adding blast furnace slag and reducing alkali content in concrete. The elemental composition of the applied cement and additives is summarised in Table 1. Table 2 presents the composition of the tested concrete mixes.

After striking the formwork, the concrete samples were stored in accordance with the PB-2 testing procedure of the General Directorate of National Roads and Motorways and ASTM C1293 at 38°C; their lengths were regularly measured (so far the measurements have been conducted 1, 7, 14, 28, 90 and 130 days after placing the specimens in the formwork) [16, 18].

According to the GDDKiA procedure, length measurements should be conducted for a year, while RILEM recommends a two-year measurement period [7, 18]. This paper presents the initial results of tests covering the measurements up to 130 days of curing the samples. Considering the possibility of a higher scatter of results due to the non-homogeneity of coarse aggregate, the number of test samples used in the study was twice higher than recommended (six samples for each formula). Additionally, the results for the concrete compressive strength tests are presented to evaluate the impact of the formula change on the feature 56 days into curing. The curing period of the samples was extended from the standard 28 days to 56 days due to the significant share of type II additives, as recommended in PN-B-06265 [20].

Results and discussion

Compressive strength. Figure 1 shows the results of compressive strength tests 56 days into curing. Analysing the concrete's compressive strength test results, one can notice that replacing granite aggregate with quartzite aggregate

odpadowy szlam ilmenitowy (Kw-RM) w ilości masowej odpowiadającej popiołowi lotnemu. Następne modyfikacje polegały na całkowitej zamianie cementu portlandzkiego CEM I na cement hutniczy CEM III/A (Kw-BF-FA oraz Kw-BF-RM). Modyfikacje te miały na celu dalsze zmniejszenie ryzyka wystąpienia potencjalnej reakcji ASR, przez dodatek żużla wielkopiecowego i obniżenie zawartości alkaliów w betonie. Skład

Table 1. Elemental composition of the applied cement and additives (primary ingredient contents identified with the WD-XRF method)

Tabela 1. Skład pierwiastkowy zastosowanych cementów i dodatków (zawartość składników głównych oznaczona metodą WD-XRF)

Ingredient/Składnik	SiO ₂ [%]	CaO [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MgO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	SO ₃ [%]	TiO ₂ [%]
CEM I 42.5R cement/ Cement CEM I 42,5R	18,84	62,15	5,10	4,58	1,70	0,12	0,54	2,82	0,26
CEM III/A 42.5N cement/ Cement CEM III/A 42,5N	25,35	50,27	5,90	2,21	3,86	0,22	0,93	3,37	0,36
Fly ash/Popiół lotny	50,02	2,67	26,46	8,56	1,65	0,48	2,21	0,39	1,61
Ilmenite mud/ Szlam ilmenitowy	34,43	4,31	4,93	10,58	6,90	0,98	0,15	1,16	39,10

Table 2. Composition of the tested concrete samples

Tabela 2. Skład badanych betonów

Ingredient/Składnik	Contents/Zawartość [kg/m ³]					
	REF	Kw	Kw-FA	Kw-RM	Kw-BF-FA	Kw-BF-RM
CEM I 42.5R cement/ Cement CEM I 42,5R	340	340	300	300	–	–
CEM III/A 42.5N cement/ Cement CEM III/A 42,5N	–	–	–	–	300	300
Additive – S (mud), P (ash)/ Dodatek – S (szlam), P (popiół)	–	–	100 P	100 S	100 P	100 S
0/2 fine aggregate/Kruszywo drobne 0/2,	680	680	655	670	655	670
2/8 coarse aggregate G (granite), K (quartzite)/ Kruszywo grube 2/8 G (granit), K (kwarcyt)	515 G	515 K	490 K	505 K	490 K	505 K
8/16 coarse aggregate G (granite), K (quartzite)/ Kruszywo grube 8/16 G (granit), K (kwarcyt)	640 G	640 K	615 K	620 K	615 K	620 K
Water/Woda	154	154	154	154	154	154

pierwiastkowy zastosowanych cementów i dodatków podano w tabeli 1, natomiast skład badanych mieszanek betonowych w tabeli 2

Przygotowane betony po rozformowaniu były przechowywane zgodnie z procedurą badawczą PB-2 GDDKiA oraz normą ASTM C1293 w temperaturze 38°C i okresowo dokonywano pomiaru ich długości. Na obecnym etapie badań wykonano pomiary po upływie 1, 7, 14, 28, 90 i 130 dni od zaformowania próbek [16, 18].

Zgodnie z procedurą GDDKiA pomiary długości powinny być prowadzone przez rok, natomiast zgodnie z zaleceniami dokumentu RILEM nawet przez dwa lata [7, 18]. W artykule przedstawiono wstępne

wyniki badań obejmujące pomiary do 130 dnia dojrzewania próbek. Ze względu na możliwość wystąpienia dużego rozrzutu wyników badań, spowodowanego niejednorodnością kruszywa grubego, zastosowano dwukrotnie większą liczbę próbek badawczych niż zalecana (6 próbek w przypadku każdej receptury). Dodatkowo przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów w celu oceny wpływu zmiany składu receptury na tę cechę po 56 dniach dojrzewania. Okres dojrzewania próbek został wydłużony z najczęściej stosowanych 28 dni na 56 dni, ze względu na znaczny udział dodatków typu II, zgodnie z zaleceniami normy PN-B-06265 [20].

Wyniki badań i dyskusja

Wytrzymałość na ściskanie. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonu po 56 dniach dojrzewania. Na ich podstawie stwierdzono, że zmiana kruszywa granitowego na kwarcytowe wpływa w istotny sposób na zwiększenie wytrzymałości betonu na ściskanie po 56 dniach dojrzewania. Może być to spowodowane lepszy-

significantly improves the concrete's compressive strength 56 days into curing. This can be caused by the better physicochemical characteristics of quartzite aggregate compared to granite. Reducing the addition of Portland cement in favour of fly ash and waste ilmenite sludge does not significantly change the compressive strength after 56 days, which confirms the reactivity of both additives. The concrete in which Portland cement (CEM I) was replaced with blast furnace cement (CEM III) and pozzolanic additives were used demonstrated higher compressive strength after 56 days (Kw-BF-FA, Kw-BF-RM). One should remember that the performance of concrete with such a high content of type II additives (active) is declared even after 90 days of curing according to the recommendations of PN-B-06265 [20], which might mean a further significant increase in their compressive strength in time. All tested concrete samples reached and significantly exceeded the designed C35/45 strength grade after 56 days of curing. This could result from no additional aeration of the concrete mix considered in the concrete's original formula.

Alkali reactivity. Figure 2 shows the initial (130 days) results for alkali reactivity in aggregates of various compositions. By analysing the curves of the tested concrete linear length change in time, one can observe some differences. The reference concrete containing granite aggregate and Portland cement (Fig. 2: REF) revealed shrinkage throughout the entire test period. The highest shrinkage (0.007%) was recorded during the measurements on day 14 of the test, and then it stabilised to 0.004%. In the initial weeks of the test, the shrinkage value of the concrete in which coarse granite aggregate was replaced entirely with quartzite (Fig. 2: Kw) was similar to that of the control concrete. On day 90 of the test, the concrete revealed no shrinkage, but significant expansion continued. Relatively high shrinkage of both concrete types in the initial weeks of the test, compared to others, resulted from a relatively high content of CEM I cement. However, the shrinkage is not high or typical of concrete because the samples were stored in high humidity conditions throughout the test. The concrete samples containing Portland cement, quartzite aggregate and pozzolanic additives (Fig. 2: Kw-FA and Kw-RM) revealed minor shrinkage in the initial weeks of the test, whereby the concrete beam lengths returned to

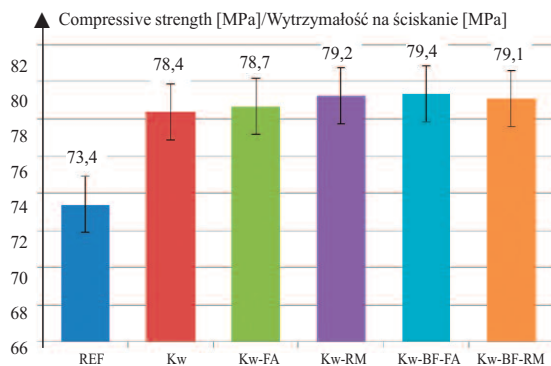


Fig. 1. Results of compressive strength of concrete tests 56 days into curing

Rys. 1. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonu po 56 dniach dojrzewania

mi właściwościami fizykomechanicznymi kruszywa kwarcytowego w porównaniu z granitowym. Zastąpienie części cementu portlandzkiego zarówno popiołem lotnym, jak i odpadowym szlaczem ilmenitowym nie wpłynęło istotnie na zmianę wytrzymałości na ściskanie po 56 dniach dojrzewania, co potwierdza reaktywność obu dodatków. Betony, w których zastąpiono cement portlandzki (CEM I) cementem hutniczym (CEM III) oraz zastosowano dodatki pucolanowe, wykazywały największą wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach (Kw-BF-FA, Kw-BF-RM). Należy jednak podkreślić, że właściwości użytkowe betonów zawierających tak duży udział dodatków typu II (aktywnych) są deklarowane nawet po 90 dniach dojrzewania zgodnie z zaleceniami PN-B-06265 [20], co może oznaczać dalszy istotny przyrost ich wytrzymałości na ściskanie w czasie. Wszystkie z badanych betonów osiągnęły projektowaną klasę wytrzymałości C35/45 po 56 dniach dojrzewania, a nawet znacznie ją przekroczyły, co częściowo mogło wynikać z braku dodatkowego napowietrzenia mieszanki betonowej, uwzględnionego w wyjściowej recepturze betonu.

Reaktywność alkaliczna. Na rysunku 2 przedstawiono wstępne (po 130 dniach) wyniki badania reaktywności alkalicznej kruszyw w betonach o różnym składzie. Analizując przebieg krzywych przedstawiających zmianę długości liniowej badanych betonów w czasie, stwierdzono różnice. Beton referencyjny zawierający kruszywo granitowe oraz cement portlandzki (na rysunku 2 REF) wykazywał skurcz przez cały okres badania. Największy skurcz zarejestrowano przy pomiarach wykonanych w 14. dniu badania (0,007%). Następnie skurcz ten stabilizował się do wartości ok. 0,004%. Beton, w którym zastąpiono całkowicie granitowe kruszywo grubym kwarcytem (na rysunku 2 Kw), wykazywał w pierwszych tygodniach badania skurcz o wartości zbliżonej do betonu kontrolnego, natomiast w 90. dniu badania nie wykazywał żadnego skurczu, a w dalszym okresie obserwowano zdecydowaną ekspansję. Dostatecznie duży skurcz obu betonów w pierwszych tygodniach badania

w porównaniu z pozostałymi betonami wynikał z relatywnie wysokiej zawartości cementu CEM I. Należy zaznaczyć, że nie jest to duży, typowy skurcz betonu, co wynika z przechowywania próbek w warunkach dużej wilgotności w trakcie całego badania. Betony zawierające cement portlandzki, kruszywo kwarcytowe oraz dodatki pucolanowe (Kw-FA i Kw-RM na rysunku 2) wykazywały niewielki skurcz w pierwszych tygodniach badania, po czym długość belek betonowych wracała do poziomu wyjściowego, a w kolejnych miesia-

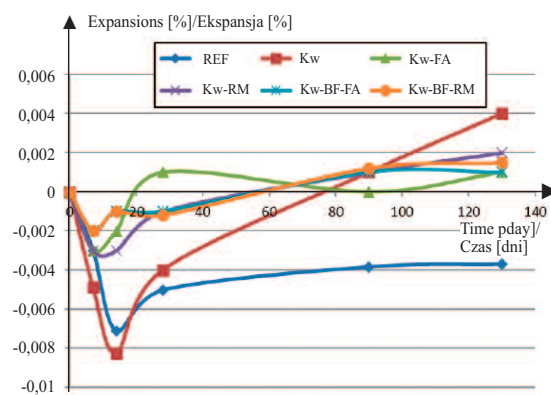


Fig. 2. Tested concrete expansion in time

Rys. 2. Ekspansja badanych betonów w czasie

their original level, and minor expansion of concrete was observed in the following months. The waveforms of the curves illustrating the length change of concrete containing quartzite aggregate, blast furnace cement and pozzolanic additives (Fig. 2: Kw-BF-FA and Kw-BF-RM) were similar. The differences were observed mainly in the initial weeks of the measurements when the recorded shrinkage values were even lower. Reducing the concrete shrinkage by decreasing the Portland cement clinker content (CEM I cement quantity) and replacing it with pozzolanic and hydraulic additive (blast furnace slag) reduces the concrete shrinkage, which is a normal phenomenon, typically observed in concrete technology [21, 22]. The fact that concrete beam length returns to its original value is worthy of attention. This could be caused by quartzite aggregate alkali reactivity, but it cannot be confirmed at this stage of tests (130 days). There are plans to continue the measurements of concrete beam lengths until they are two years of age.

Table 3 summarises the classification requirements for alkali reactivity of aggregates according to the PB-2 procedure of the GDDKiA [18]. Analysing the test results for the concrete samples' expansion obtained at this stage, referring to the assessment criteria described in the PB-2 procedure of the GDDKiA (Table 2) [18], one should note that the observed changes in the beam lengths 130 days into the test are an order of magnitude lower than those required for non-reactive aggregates. That is why it is too early to draw definitive conclusions. Nevertheless, differences in the length change of the concrete samples and the expansive nature of concrete containing quartzite aggregate and Portland cement with no additives can be observed at this stage. This can be attributed to the minerals present in the quartzite aggregate and subject to alkali-silica reaction. Although the concrete containing quartzite aggregate and reactive additives (type II) reveals a slightly expansive nature at this stage, it is lower than that of concrete containing quartzite aggregate and no additives.

Summary and conclusions

Modifying the bridge cement composition by replacing coarse granite aggregate with quartz aggregate contributes to improving the compressive strength. Replacing a part of cement with pozzolanic additives such as siliceous fly ash or ilmenite mud and substituting Portland cement with blast furnace cement does not reduce the compressive strength 56 days into curing.

Based on the previous test results, it can be concluded that adding siliceous fly ash, waste ilmenite mud, and blast furnace slag can promote the initial reduction of the alkali

each observed a negligible expansion of these concretes. The course of the curves illustrating the change in the length of concrete beams containing quartzite aggregate, blast furnace cement and pozzolanic additives (Kw-BF-FA and Kw-BF-RM on Fig. 2). It was observed that before all in the first few weeks of measurements, when the recorded shrinkage values were even lower. Reducing the cement content (quantity of CEM I cement) and replacing it with pozzolanic or hydraulic additives (blast furnace slag) leads to a reduction in concrete shrinkage, which is a normal phenomenon and commonly observed in concrete technology [21, 22]. It is worth noting that the change in the length of concrete beams to their original value, which may be caused by the alkali reactivity of quartzite aggregate, cannot be confirmed at this stage of tests (130 days). It is planned to continue the measurements of the length of concrete beams at least until the age of 2 years.

Table 3. Classification of alkali reactivity of aggregates according to the PB-2 procedure of the General Directorate of National Roads and Motorways [18]

Tabela 3. Klasyfikacja reaktywności alkalicznej kruszyw wg PB-2 GDDKiA [18]

Aggregate reactivity category/ Kategoria reaktywności kruszywa	Reactivity description/ Opisowe określenie reaktywności	Change in the samples' length in 365 days [%]/ 365-dniowa zmiana długości próbek [%]
R0	non-reactive/ niereaktywne	≤ 0,04
R1	moderately reactive/ umiarkowanie reaktywne	>0,04 : ≤ 0,12
R2	strongly reactive/ silnie reaktywne	> 0,12 : ≤ 0,24
R3	very strongly reactive/ bardzo silnie reaktywne	> 0,24

W tabeli 3 przedstawiono wymagania klasyfikacyjne reaktywności alkalicznej kruszyw zgodnie z procedurą PB-2 GDDKiA [18]. Analizując uzyskane na tym etapie wyniki badań ekspansji próbek betonowych w odniesieniu do kryteriów oceny podanych w procedurze PB-2 GDDKiA (tabela 2) [18] stwierdzono, że zmiana długości belek po 130 dniach badania jest o rząd wielkości mniejsza niż wymagania stawiane kruszywom niereaktywnym. W związku z tym jest za wcześnie na wyrażenie wniosków. Na tym etapie można natomiast zaobserwować różnice w zmianie długości próbek betonowych oraz zdecydowany ekspansywny charakter betonu zawierającego kruszywo kwarcytowe i cement portlandzki bez żadnych dodatków. Może to wynikać z obecności minerałów ulegających reakcji alkalia-krzemionka w zastosowanym kruszywie kwarcytowym. Na tym etapie badania betony zawierające kruszywo kwarcytowe oraz dodatki reaktywne (typu II) wykazują co prawda nieznacznie ekspansywny charakter, lecz w znacznie mniejszym stopniu niż beton z kruszywem kwarcytowym bez takich dodatków.

Podsumowanie i wnioski

Modyfikacja składu betonu mostowego przez zastąpienie granitowego kruszywa grubego kwarcytowym wpływa pozytywnie na zwiększenie jego wytrzymałości na ściskanie. Zastąpienie części cementu dodatkami pucolanowymi, takimi jak krzemionkowy popiół lotny czy szlam ilmenitowy, oraz zmiana cementu portlandzkiego na hutniczy nie wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 56 dniach dojrzewania.

Na podstawie dotychczasowych wyników badań stwierdzono, że krzemionkowy dodatek popiołów lotnych, ilmenitowego szlamu odpadowego oraz żużla wielkopieczowego może

reactivity of aggregates in concrete. Nevertheless, the results presented in this paper are initial, and tests shall be continued.

wpływać korzystnie na zmniejszenie reaktywności alkalicznej kruszyw w betonie w początkowym okresie jego dojrzewania. Należy jednak zaznaczyć, że przedstawione w artykule badania mają charakter wstępny i będą kontynuowane.

Received: 13.08.2024
Revised: 24.08.2024
Published: 22.10.2024

Artykuł wpłynął do redakcji: 13.08.2024 r.
Otrzymał poprawiony po recenzjach: 24.08.2024 r.
Opublikowano: 22.10.2024 r.

Literature

- [1] Czarniecki L. Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny. *Materiały Budowlane*. 2022; vol. 1, no. 1: 66 – 69.
- [2] Pietrzykowski P, Brzeziński D, Miśkiewicz W, Tymiński M. *Mineralne kruszywa naturalne*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny, 2020.
- [3] Kukielska D, Góralczyk S. Reaktywność alkaliczna kruszyw. *Min. Sci. – Miner. Aggregates*, vol. 22, no. 1, pp. 101–110.
- [4] Facilities N, Service, E Hueneme P, Force A, Engineer C, Agency S. Report on Alkali-Aggregate Problems on Portland Cement Concrete Airfield Pavements, no. September, 2006.
- [5] Stark D. Handbook for The Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures. 1991; p. 49.
- [6] Garbacik A, Hernik K, Adamski G, Glinicki MA. Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw – cele i założenia projektu ASR-RID, in *Dni Betonu*, 2016.
- [7] Rønning TF, Wigum BJ, Lindgård J. Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-10: determination of binder combinations for non-reactive mix design using concrete prisms – 38 °C test method. *Mater. Struct. Constr.* 2021; vol. 54, no. 6.
- [8] AASHTO PP65-11 Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [9] ASTM C1567-04 Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), *Annu. B. ASTM Stand.* 2005; vol. 04.02, pp. 774–778.
- [10] Chyliński F. Microstructural Assessment of Pozzolanic Activity of Ilmenite Mud Waste Compared to Fly Ash in Cement Composites. 2024; pp. 1–19.

- [11] Selecting Measures to Prevent Deleterious Alkali-Silica Reaction in Concrete Rationale for the AASHTO PP65 Prescriptive Approach. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012.
- [12] Chyliński F, Bobrowicz J, Łukowski P. Undissolved Ilmenite Mud from TiO₂ Production – Waste or a Valuable Addition to Portland Cement Composites? *Materials (Basel)*. 2020; vol. 13 (16), no. 3555.
- [13] Chyliński F, Kuczyński K, Łukowski P. Application of Ilmenite Mud Waste as an Addition to Concrete. *Materials (Basel)*. 2020; vol. 13, no. 4, p. 866.
- [14] PN-EN 12390-3:2019-07 *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań*. Warszawa, Polska: Polski Komitet Normalizacyjny, 2019.
- [15] PN-EN 12390-2:2019-07 *Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielegnacja próbek do badań wytrzymałościowych*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2019.
- [16] ASTM C1293 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. American Society for Testing and Materials, 2023.
- [17] PN-EN 206+A2:2021-08 *Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- [18] *Procedura Badawcza GDDKiA PB/2/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, 2019.
- [19] PN-EN 450-1:2012 *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2012.
- [20] PN-B-06265:2022-08 *Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2: 2021-08*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2018.
- [21] Neville A. M. *Properties of Concrete*, no. 5th edition. 2011.
- [22] Jamróży Z. *Beton i jego technologie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.