

STOSOWANIE KRUSZYW NATURALNYCH W BUDOWNICTWIE

Nastawienie w Polsce budownictwa, a zwłaszcza budownictwa mieszkaniowego na formę przemysłową, w której podstawę stanowią prefabrykowane elementy betonowe spowodowało ogromne zapotrzebowanie w zakresie ilości cementów i kruszyw. Spowodowało to pogorszenie jakości cementów oraz potrzebę uruchomienia nowych złóż surowców skalnych do produkcji kruszyw do betonów, które stały się głównym materiałem w budownictwie obecnej doby. Zarys stosowania kruszyw w budownictwie ściśle się łączy z jakością produkowanych w Polsce cementów, a zwłaszcza z ilością zawartych w nich alkaliów, jak również z ilością i rodzajem dodatków stosowanych bądź to w celu zwiększenia masy cementu, bądź ze względu na zagospodarowanie odpadów przemysłowych. Obecnie na rynek trafiają nie czyste cementy portlandzkie o ustalonym składzie chemicznym, lecz cementy mieszane. Przejście na produkcję cementów mieszanych, wysokoalkalicznych wymagało przeprowadzenia badań możliwości stosowania różnego rodzaju kruszyw do betonów oraz określenia ich wrażliwości na działanie alkaliów zaczynu cementowego.

Badania reakcji zachodzących w betonie pomiędzy alkaliami a kruszywem i ich wpływu na zachowanie się betonów prowadzone są w Instytucie Technologii i Organizacji Produkcji Budowlanej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem autorki od 1968 r. Z placówką tą współpracują inne jednostki naukowe: Instytut Geologiczny, Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Kruszyw Budowlanych, Instytut Techniki Budowlanej, Politechnika Świętokrzyska, Miastoprojekt Lublin i CEBFT.

Zakres prowadzonych prac był bardzo szeroki gdyż obejmował:

- opracowanie nowych metod badań i adaptację metod stosowanych w USA i Kanadzie,
- opracowanie propozycji nowych kryteriów oceny przydatności do betonów kruszyw ze skał węglanowych (15),
- wyjaśnienie wpływu składników chemicznych i mineralogicznych kruszyw na ich zachowanie się w betonach (17),

– wskazanie możliwości zmniejszenia ekspansji betonów wykonanych z reaktywnymi kruszywami węglanowymi (7).

Przebadano szczegółowo ponad 20 złóż różnych surowców skalnych pod względem ich przydatności do betonów oraz 11 złóż naturalnych kruszyw żwirowych.

Badania te miały na celu wytypowanie złóż skał węglanowych wapieni i dolomitów do produkcji kruszywa łamanego do betonów, co pozwoliło na uruchomienie kilku zakładów produkcyjnych (10). W małym zakresie były również prowadzone badania piaskowców (17). Uruchomienie zakładu produkcyjnego kruszywa chalcedonitowego ze złóża w Teofilowie k. Inowłodza było również poprzedzone badaniami, które wykazały, że kruszywo to może być stosowane do betonów, ale z cementami niskoalkalicznymi (8). Badania żwirów naturalnych przeprowadzone w latach 1974–77 wykazały, że żwiry Nizy Polskiego są reaktywne i nie mogą być stosowane do betonów z cementami wysokoalkalicznymi (18). Do niedawna stosowanie kruszyw żwirowych do betonów nie budziło zastrzeżeń, gdyż produkowane w Polsce cementy były w przeważającej większości niskoalkaliczne, tj. zawierały alkalia ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) w ilości mniejszej od 0,6% (11).

ZAWARTOŚĆ ALKALIÓW W CEMENTACH

Obserwowany w ostatnich latach wzrost ilości alkaliów w cementach (21) jest związany ze zmianą technologii produkcji cementów oraz dodawaniem do klinkieru pyłów lotnych i żużli, zawierających alkalia.

W krótkich piecach starych konstrukcji, pracujących metodą mokrą i suchą bez urządzeń odpylających, 50–60% alkaliów było emitowanych z pyłami do atmosfery. Podobnie piece długie bez elektrofiltrów dawały klinkier o niskiej zawartości alkaliów. Ze względu na ochronę środowiska wprowadzono obecnie urządzenia odpylające. W nowoczesnych piecach krótkich pracujących metodą suchą, wyposażonych w zewnętrzne fluidalne wymienniki ciepła i wstępne dekarbonizatory, przy całkowitym zwrocie pyłów z elektrofiltrów, w klinkierze pozostaje do

80% alkaliów. Zawartość ich w klinkierze waha się obecnie od 0,7 do 1,2% obliczeniowego Na_2O . Ponieważ wśród alkaliów w naszych cementach występuje o wiele więcej potasu niż sodu – suma alkaliów może osiągać wartości bardzo wysokie, jak np. suma alkaliów w cemencie Nowiny II wynosi 1,80%, co w przeliczeniu na Na_2O stanowi 1,29% (tab.).

Przeprowadzone szczegółowe badania 5 cementów portlandzkich „350”, odpowiadających wymaganiom normy PN-74/B-30 000 wykazały, że suma alkaliów w 4 cementach (tab.) zamykała się w granicach 1,03–1,80%. Cement „Chełm” do niedawna o małej ilości alkaliów zawierał ich 0,79%. Zawartość alkaliów, głównie potasu, rozpuszczalnych w wodzie w temperaturze 100°C była bardzo wysoka dla cementu „Nowiny II” i wynosiła 1,30–1,47%, dla cementu „Saturn” była niższa 0,88–0,92%. Pozostałe cementy zawierały stosunkowo mało rozpuszczalnych alkaliów – 0,22–0,56%. Zawartość alkaliów nierozpuszczalnych była bardzo niska w cemencie „Nowiny II” – 0,21–0,33%. W pozostałych cementach nierozpuszczalnych alkaliów było dwukrotnie więcej.

W cemencie „Chełm” alkalia nierozpuszczalne stanowiły ponad 2/3 wszystkich alkaliów. Jednakże, jak stwierdzono, wchodzi one w reakcje jedynie z pewnym opóźnieniem (ok. 1–2 miesięcy) (18). Alkalia nierozpuszczalne występują w klinkierze głównie w postaci NC_{11}A_4 i $\text{KC}_{23}\text{S}_{12}$ * wówczas, gdy surowce lub paliwo zawierają małe ilości siarki. Przy większych ilościach siarki alkalia przechodzą w podwójne sole siarczanowe z układu potrójnego $\text{CaSO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4$ (6). Alkalia są wprowadzane do surowcowej mieszanki do produkcji cementu wraz z surowcami ilastymi zawierającymi illity i skalenie. Powstałe w procesie spiekania związki zawierające alkalia wpływają na procesy wiązania i twardnienia cementu oraz są źródłem alkaliów.

Nie można jednak zrezygnować z przechodzenia na produkcję cementów metodą suchą, gdyż jest ona ekonomiczniejsza ze względu na mniejsze zużycie paliwa. Również wymogi ochrony środowiska zmuszają do stosowania elektrofiltrów. Wyjściem z sytuacji jest częściowe

bocznikowanie pyłów tak, żeby można było uzyskać cement o niższej zawartości alkaliów.

Pyły z elektrofiltrów, ze względu na ich skład mineralny, dużą zawartość potasu i węgla wapnia oraz drobne uziarnienie mogą stanowić pełnowartościowy produkt do wapniowania i nawożenia potasowego gleb. Próby takie są prowadzone z powodzeniem w St. Zj. (6).

REAKCJE ZACHODZĄCE W BETONIE MIĘDZY ALKALIAMI ZACZYNU CEMENTOWEGO A SKŁADNIKAMI KRUSZYWA

Stwierdzono występowanie dwóch rodzajów reakcji między alkaliami zaczynu cementowego a niektórymi składnikami kruszywa (16). Reakcje te wywierają szkodliwe działanie na beton i mogą spowodować obniżenie jego wytrzymałości a nawet doprowadzić do jego uszkodzeń.

1. Reakcja między rozpuszczalną, tzw. aktywną krzemionką a alkaliami

Krzemionka występuje w skałach w postaci kwarcu, chalcedonu, opalu, rzadziej trydymitu i krystobalitu. Kwarc tylko powierzchniowo w niewielkim stopniu ulega działaniu alkaliów, co nawet polepsza przyczepność ziarn kwarcu do zaczynu cementowego. Chalcedon zbudowany z włóknistego lub mikrokrystalicznego kwarcu jest już mniej odporny na działanie alkaliów. Trydymit i krystobalit są wysokotemperaturowymi odmianami krystalicznej krzemionki i w normalnych warunkach nie są stabilne, ulegają więc działaniu alkaliów. Opal jako amorficzna forma krzemionki jest bardzo wrażliwy na działanie alkaliów. W pewnych przypadkach (5) wystarcza, żeby kruszywo zawierało 1% opalu i reakcja ma przebieg niebezpieczny dla betonów. Aktywna krzemionka w formie opalu występuje w piaskowcach o lepszemu krzemionkowym, w wapieniach zsylikowanych porowatych i zbitych. Może również być obecna w skałach magmowych wylewnych zawierających szkliwo, jak również w produktach wietrzenia krzemianów.

ZAWARTOŚĆ ALKALIÓW W 5 CEMENTACH PORTLANDZKICH „350”

Cement	Nr próbek	Zawartość alkaliów w %											
		rozpuszczalnych w HCl				rozpuszczalnych w H_2O w temp. 100°				nierozpuszczalnych w H_2O w temp. 100°			
		Na_2O	K_2O	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	suma w przel. na Na_2O	Na_2O	K_2O	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	suma w przel. na Na_2O	Na_2O	K_2O	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	suma w przel. na Na_2O
Portl. „350” „Nowiny II”	1	0,30	1,21	1,51	0,98	0,30	1,00	1,30	0,89	0	0,21	0,21	0,14
	2	0,56	1,24	1,80	1,29	0,42	1,05	1,47	1,04	0,14	0,19	0,33	0,25
Portl. „350” „Saturn”	1	0,30	1,00	1,30	0,89	0,30	0,58	0,88	0,64	0	0,42	0,42	0,28
	2	0,56	1,01	1,57	1,15	0,36	0,56	0,92	0,69	0,20	0,45	0,65	0,46
Portl. „350” „Chełm”	1	0,31	0,48	0,79	0,63	0,008	0,22	0,228	0,153	0,302	0,26	0,562	0,473
Portl. „350” „Groszowice”	1	0,38	0,65	1,03	0,808	0,10	0,28	0,38	0,285	0,28	0,37	0,65	0,523
Portl. „350” „Grodzicz”	1	0,25	0,96	1,21	0,882	0,10	0,46	0,56	0,403	0,15	0,50	0,65	0,479

Współczynnik przeliczeniowy K_2O na $\text{Na}_2\text{O} = 0,659$

* C = CaO, S = SiO_2 , A = Al_2O_3 , K = K_2O , N = Na_2O .

Krzemionka aktywna (20) tworzy z alkaliami kompleksowy koloidalny związek uwodnionego krzemianu alkaliów, który może pobierać znaczne ilości wody, wskutek czego pęcznieje aż do przejścia w stan ciekły. Następstwem tego jest powstawanie wycieków i naskorupień koloidalnej krzemionki na powierzchniach betonów oraz odprysków i ubytków, jak również pęcznienia, deformacji i uszkodzeń betonów. Z czasem tracąc wodę krzemian alkaliów tworzy na powierzchniach białe naloty i wykwyty. Wskutek wyciekania krzemianu alkaliów zostaje osłabiona struktura betonu, ziarna reaktywnego kruszywa zawierającego krzemionkę stają się porowate i pęcznią, co powoduje obniżenie wytrzymałości betonu (18).

Przy stosowaniu cementu o małej zawartości alkaliów może powstać w betonie potrójny, uwodniony związek kompleksowy wapniowego krzemianu alkaliów, który ma ograniczoną zdolność pęcznienia (20). Związek ten tworzy na powierzchniach ziarn reaktywnego kruszywa ochronną warstwę i zapobiega wydzielaniu się z nich krzemionki. Jednakże, żeby zaszała reakcja bezpieczna musi być zachowana w betonie odpowiedni stosunek $\text{CaO}:\text{Na}_2\text{O}$. W okresie kiedy produkowane w Polsce cementy były niskoalkaliczne w betonach z kruszywami reaktywnymi nie ujawniała się reakcja alkalia – krzemionka i np. żwiry Niżu Polskiego były szeroko stosowane jako pełnowartościowe kruszywo do betonów. W przypadku stosowania cementów wysokoalkalicznych żwiry Niżu Polskiego okazały się kruszywem reaktywnym (11). Reakcja alkalia – krzemionka ujawnia się szybko w betonach i już po miesiącu lub dwóch zaczynają występować jej objawy (11). Naparzenie elementów betonowych przyspiesza ujawnienie się reakcji. Najczęściej po roku przebywania betonów w warunkach dużej wilgotności środowiska, reakcja dobiega końca. W warunkach suchego środowiska reakcja przebiega bardzo powoli i może nie ujawniać się. Jednakże zmiana środowiska na wilgotne natychmiast uruchamia reakcję i to w sposób niebezpieczny dla betonu (20).

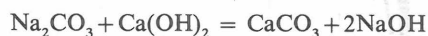
2. Reakcja dedolomityzacji

W niektórych skałach węglanowych: dolomitach i wapieniach dolomitycznych, jak również w piaskowcach fliszu karpackiego, występuje dolomit, który pod działaniem alkaliów ulega rozkładowi.

Reakcja wg D.W. Hadleya (3) i J.E. Gillota (2) ma przebieg następujący:



Powstający w reakcji węglan sodu reaguje z produktami hydratacji cementu



Następuje regeneracja alkaliów, co pozwala na kontynuację reakcji z dolomit, aż do całkowitego wyczerpania się dolomitu lub unieruchomienia alkaliów wskutek reakcji ubocznych. Tworzący się w reakcji CaCO_3 powoduje karbonizację uwodnionego glinianu wapnia w zaczynie w strefie przyziarnowej. Reakcje te wywołują zmiany składu i struktury ziarn kruszywa, ich pęcznienie oraz powstawanie stref reakcyjnych w zaczynie i kruszywie. Wskutek tego następuje naruszenie struktury betonu, powstawanie w nim mikrorys i spękań (22). Na przebieg i stopień nasilenia reakcji w betonie wpływa ilość alkaliów zawartych w cemencie, stopień reaktywności kruszywa, wymiary jego ziarn oraz temperatura i wilgotność środowiska. Stopień reaktywności kruszywa zależy od jego struktury i tekstury, składu mineralnego – ilości zawartej w skale dolomitu i substancji ilastych (16). Reakcja

dedolomityzacji w normalnych warunkach przebiega powoli i może się ujawnić dopiero po kilkunastu latach, co jest szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji betonowych.

RODZAJE KRUSZYW STOSOWANYCH OBECNIE W BUDOWNICTWIE

Z uwagi na ostry deficyt w ostatnim dziesięcioleciu uległ znacznemu rozszerzeniu asortyment produkowanych kruszyw. Z naturalnych kruszyw żwirowych są stosowane do betonów kruszywa Niżu Polskiego oraz żwiry dolnośląskie i podkarpackie. Coraz częściej jednak napływają informacje o niekorzystnych zjawiskach występujących w betonach wykonanych ze żwirów Niżu Polskiego i cementów wysokoalkalicznych (12).

Coraz szersze zastosowanie mają kruszywa łamane otrzymywane z wapieni i dolomitów rejonu kieleckiego i śląskiego, odznaczające się małą wrażliwością na działanie alkaliów. Eksploatowane dla potrzeb rejonu łódzkiego jest złożo chalcedonitu w Teofilowie koło Inowłodzi. Kruszywa do betonów dostarczają piaskowce fliszowe okręgu bieszczadzkiego. Do dyspozycji budownictwa są złoża bazaltów na Dolnym Śląsku, których stosowanie do betonów z cementami wysokoalkalicznymi wymaga jednak przeprowadzenia szczegółowych badań. Stwierdzono bowiem na podstawie badań wstępnych (9), że ziarna oliwiny występujące w bazaltach jako prakryształy ulegają rozkładowi pod działaniem alkaliów zaczynu cementowego. Produkty rozkładu wędrują do zaczynu a na miejsce rozłożonego oliwiny wchodzi składniki zaczynu. W procesie tym uwalnia się aktywna krzemionka, która wchodzi w reakcję z alkali. Na granicy ziarn kruszywa bazaltowego powstają zmiany składu fazowego oraz rysy i mikroszczeliny, co osłabia strukturę betonu (tab., ryc. 1).

Kruszywo granitowe z okręgu Dolnego Śląska jest stosowane w budownictwie w małym zakresie. Zwiększenie jego produkcji wymaga uruchomienia nowych złóż oraz zbadania zachowania się kruszyw granitowych w betonach z cementami wysokoalkalicznymi. Nowa sytuacja w przemyśle cementowym, powodująca produkowanie cementów wysokoalkalicznych, wymaga wielkiej ostrożności zarówno przy uruchamianiu produkcji kruszywo do betonów z nowych złóż, jak również przy stosowaniu kruszyw ze złóż już eksploatowanych. Dotychczasowe, dobre zachowanie się kruszyw w betonach z cementami niskoalkalicznymi nie gwarantuje ich zadowalającego zachowania się w betonach z cementami wysokoalkalicznymi, czego przykładem są żwiry Niżu Polskiego (19).

ZACHOWANIE SIĘ BETONÓW Z NATURALNYMI KRUSZYWAMI ŻWIROWYMI I CEMENTAMI WYSOKOALKALICZNYMI

Badaniami objęto 10 złóż żwirów Niżu Polskiego oraz żwir z Krzyżanowic z okolic Opola (18). Skład petrograficzny kruszywo Niżu Polskiego był bardzo zróżnicowany. Występowały w nim skały magmowe: granity, porfiry, diabazy i melafiry, skały przeobrażone: gnejsy i kwarcyty, skały osadowe: wapienie zbite, piaskowce, krzemienie, lidyty (w grupie południowej), zsylikowane wapienie porowate – opoki i czerty. Skałami reaktywnymi, tj. wrażliwymi w wysokim stopniu na działanie alkaliów okazały się piaskowce o lepszemu krzemionkowym, czerty, opoki, krzemienie i w mniejszym stopniu, lecz również w nadmiernym niektóre wapienie. Żwir z Krzyżanowic zawierał znaczną ilość piaskowców glaukonitowych o lepszemu krzemionkowym wrażliwych na działanie alka-

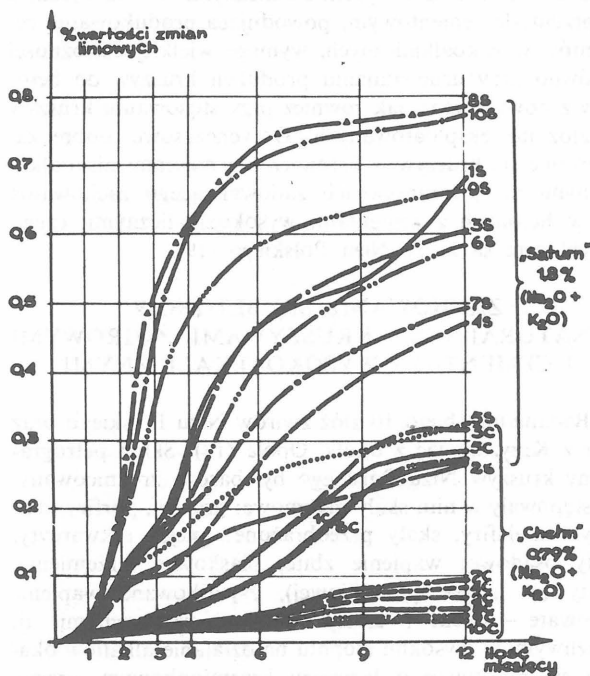
liów oraz niewielką ilość lignitu, rozkładającego się pod wpływem alkaliów (19).

Betony wykonane z badanych kruszyw Niżu Polskiego, przechowywane w warunkach dużego zawilgocenia wykazały obecność odprysków mikrorys, nacieków, wykwitów i haskorupień. Niektóre beleczki uległy zwężeniu, wystąpiły spękania i uszkodzenia (tab., ryc. 1–6). Beleczki wykonane z cementami wysokoalkalicznymi, „Saturn” i „Nowiny II”, wykazały wzrost wymiarów przekraczający kilkakrotnie górną granicę wzrostu wymiarów ustaloną dla tych warunków w normach ASTM-C-33 i C-342 na 0,2% (ryc. 1, 2). Beleczki betonowe z kruszywami „Bielinek” i „Drawsko” z cementem „Saturn”, a z cementem „Nowiny II” z kruszywami „Bielinek”, „Krzywólka” i „Bzurze” wykazały nadmierny wzrost wymiarów, lecz niewiele przekraczający wartość 0,3%. Kruszywo „Zadworzany” z cementem „Nowiny II” wykazało mały wzrost wymiarów, natomiast z cementem „Saturn” wzrost wymiarów dla tego kruszywa wynosił ok. 0,47%. Beleczki betonowe wykonane z cementem „Chełm” dla 6 kruszyw wykazały mały wzrost wymiarów 0,1%. Dla pozostałych 4 kruszyw wzrost wymiarów był większy i dochodził lub przekraczał 0,3% (ryc. 1). Wzrost wymiarów beleczek betonowych przy zastosowaniu cementów „Saturn” i „Nowiny” był szybki i po upływie 1 roku nie osiągnął wartości maksymalnych. Natomiast dla cementu „Chełm” był powolny i po roku osiągnięty został stan równowagi. Beleczki wykonane z cementami wysokoalkalicznymi „Grodziec” i „Groszowice” (tab.) z kruszywem „Krzyżanowice” przechowywane w warunkach silnego zawilgocenia (metoda 1) i w wodzie (metoda 2) wykazały niewielki wzrost wymiarów, nie przekraczający 0,1%, co wskazuje, że jest to kruszywo tylko słabo reaktywne. Wszystkie beleczki betonowe przechowywane w warunkach powietrzno-suchych wykazały skurcz, lecz o wartościach nieco mniejszych od wartości uzyskiwanych dla kruszyw nie-

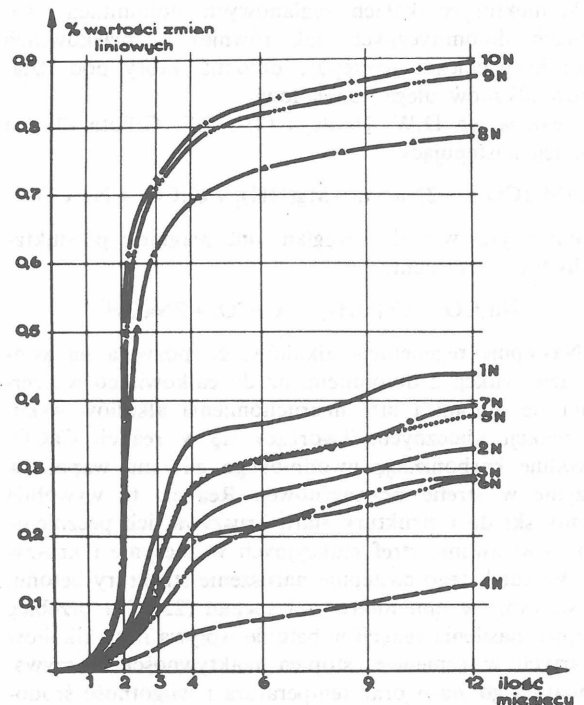
reaktywnych.

Betony wykonane z kruszywem grubym z cementem „Chełm” po 28 dniach przechowywania w temp. 20°C wykazały wytrzymałość na ściskanie niższą od projektowanej 3–22%, z cementem „Saturn” od 5–33%. Tylko betony z kruszywem „Zadworzany” wykazały dla obydwóch niewielki wzrost wytrzymałości wynoszący 1–4%. Próbkę betonową z cementem „Chełm”, przechowywaną w komorze w temp. 40° i bardzo dużej wilgotności, wykazały po 360 dniach dla wszystkich kruszyw wzrost wytrzymałości w stosunku do R_{28} . Uzyskiwane wytrzymałości na zginanie dla betonów z badanymi kruszywami są zgodne z przeciętnie uzyskiwanymi, również współczynniki sprężystości tych betonów nie odbiegają od wartości uzyskiwanych w praktyce.

Jak wykazały przeprowadzone badania wszystkie zbadane kruszywa żwirowe pochodzące z Niżu Polskiego wykazują wrażliwość na działanie alkaliów. W betonie zachodzi reakcja pomiędzy aktywną krzemionką zawartą w niektórych ziarnach występujących w badanych kruszywach a alkaliami zaczynu cementowego. Natomiast nie zaobserwowano reakcji pomiędzy dolomitą a alkali. Szczególnie niekorzystne jest zachowanie się betonów wykonanych z cementami wysokoalkalicznymi przechowywanymi w warunkach silnego zawilgocenia. Zachowanie się betonów z cementem „Chełm”, o najmniejszej zawartości alkaliów, wykazuje, że do betonów z kruszywami żwirowymi Niżu Polskiego należy stosować cementy niskoalkaliczne, zawierające alkalia obliczone jako równoważnik wagowy Na_2O , w ilości nie większej niż 0,6%. W przypadku użycia do betonów z kruszywem Niżu Polskiego cementów o wyższej zawartości alkaliów należy dodawać do kruszywa żwirowego kruszywa niereaktywnego w ilości 25–75%, zależnie od ilości alkaliów występujących w cemencie oraz stopnia reaktywności kruszywa (10).



Ryc. 1. Wykres zmian liniowych beleczek betonowych wykonanych przy użyciu cementów portlandzkich „350” Saturn (S) i „Chełm” (C) oraz kruszywa drobnego ze złóż Niżu Polskiego: Rybaki (1), Bielinek (2), Sobolewo (3), Zadworzany (4), Drawsko (5), Bzurze (6), Żabiny (7), Halinów (8), Rydwan (9), Stobiecko (10).



Ryc. 2. Wykres zmian liniowych beleczek betonowych wykonanych przy użyciu cementu portlandzkiego „350” Nowiny II oraz kruszywa drobnego ze złóż jak na ryc. 1.

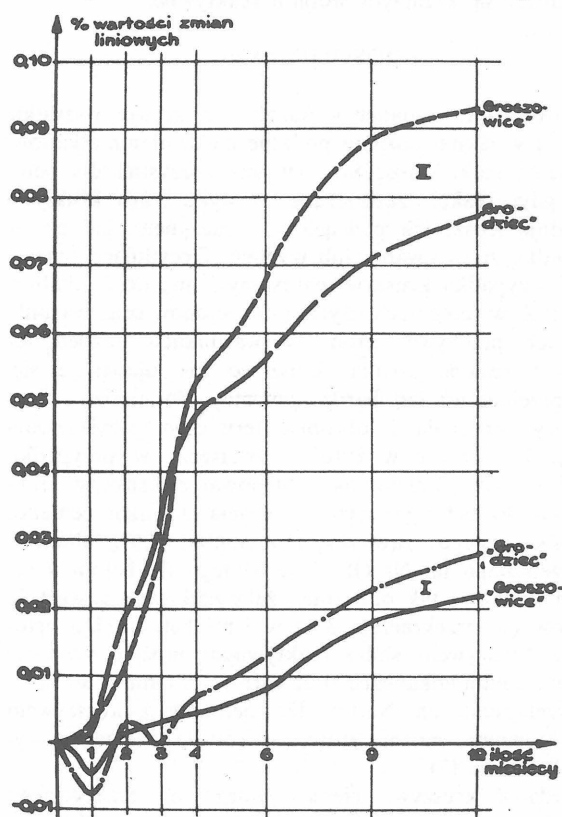
ZACHOWANIE SIĘ WAPIENI I DOLOMITÓW W ŚRODOWISKU ALKALIÓW I W BETONIE

Badaniami objęte były wapienie ze złóż Morawica, Jazwica, Karwów, Góraźdże – Borsuki, wapienie dolomitowe ze złóż Radkowice, Laskowa, Tęcza, Ublinek, wapienie zsylikowane ze złóż Piechcin, Trawniki i Karsy, dolomity ze złóż Korzecko, Zachełmie, Tęcza, Ublinek, Brzeziny, Nowa Wioska.

Badania podatności wymienionych skał na działanie alkaliów wykazały (17), że dolomit z Zachełmia jest skałą reaktywną, nieprzydatną do produkcji kruszyw do betonów. Wapień z Piechcina, dolomit z Brzeziny mogą być stosowane do produkcji kruszywa do betonów pod warunkiem użycia do nich cementu niskoalkalicznego, gdyż w złożach tych wśród warstw słabo reaktywnych występują warstwy materiału reaktywnego. Wapieniami z Piechcina przydatnymi do produkcji kruszyw do betonów są tylko te, które zawierają do 10% krzemionki. Wapień ze złoża Borsuki może być stosowany do betonów nie poddawanych obróbce cieplnej. Wapienie zsylikowane z Trawnika oraz z Kars są wysokoreaktywne (13, 1, 14). Pozostałe złoża zawierają materiał mało wrażliwy na działanie alkaliów i ich zachowanie się w betonach jest zadowalające.

Na ryc. 4 przedstawiono średnie wartości zmian liniowych w środowisku alkaliów próbek niereaktywnego wapienia ze złoża Morawica, próbek z dwóch różnych warstw wysoko reaktywnego dolomitu ze złoża Zachełmie (próbki z trzeciej warstwy po 4 miesiącach uległy rozpadowi) oraz próbek z jednej warstwy reaktywnego piaskowca ze złoża w Komańczy. Próbki z innych warstw tego złoża były słabo reaktywne. Według ASTM-C 586 dopuszczalne zwiększenie wymiarów po 1 roku przebywania próbek w środowisku alkaliów nie powinno przekraczać 0,1%.

Na podstawie badań własnych i literatury zagranicznej



Ryc. 3. Wykres zmian liniowych beleczek betonowych wykonanych przy użyciu cementów portlandzkich „350” Grodziec i Groszowice oraz kruszywa drobnego z Krzyżanowic (okolice Opola).

(16), stwierdzono, że niereaktywne są wapienie zawierające małe ilości dolomitu i substancji ilastych. Największą reaktywność wykazują wapienie i wapienie dolomitowe o strukturze zwartej, bardzo drobnoziarnistej, zawierające ok. 50% dolomitu, tkwiącego w formie pojedynczych romboedrów w drobnoziarnistej masie kalcytu, o zawartości ponad 2% substancji ilastych.

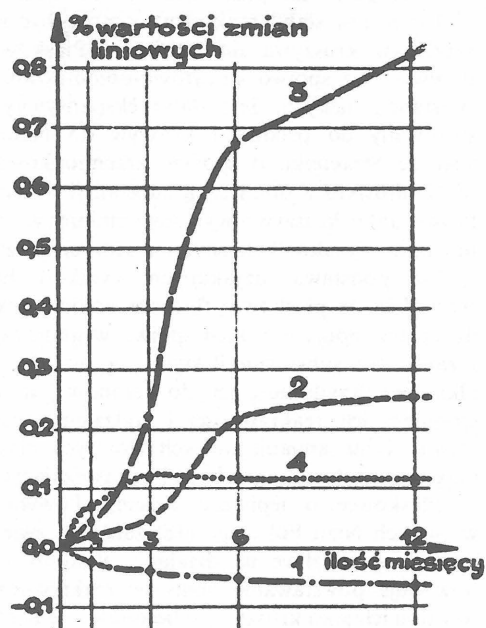
Wapienie zsylikowane zwarte i porowate, zawierające ponad 10% krzemionki są reaktywne. Reaktywność dolomitów zależy od ich uziarnienia. Im większe wymiary ziarn tym są one mniej reaktywne. Dolomit z Zachełmia, wysokoreaktywny miał strukturę bardzo drobnoziarnistą i zawierał substancje ilaste. Dolomit z Nowej Wioski jest zbudowany z dużych ziarn dolomitu i nie wykazuje reaktywności.

ZACHOWANIE SIĘ SKAŁ KRZEMIONKOWYCH I PIASKOWCÓW W ŚRODOWISKU ALKALIÓW I W BETONACH

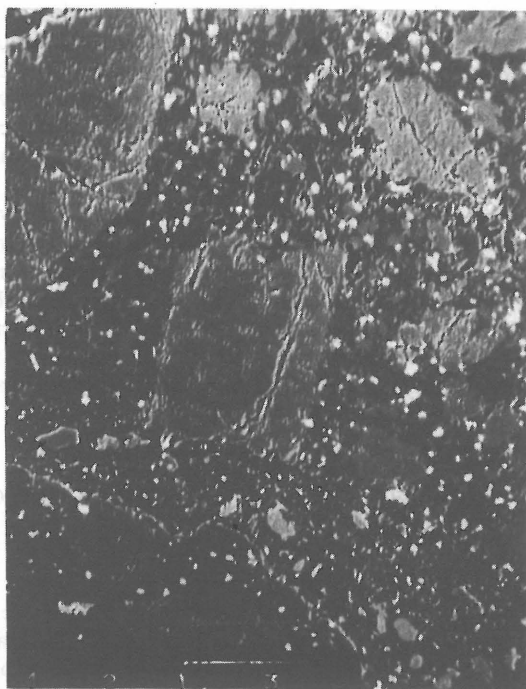
Ze skał krzemionkowych badaniami odporności na działanie alkaliów objęto dolomit ze złoża Leszczawka (17, 18), chalcedonit z Teofilowa oraz odłamki opok, czert, krzemieni i litydów występujących w żwirach Niżu Polskiego. Dolomit z Leszczawki okazał się wysokoreaktywny. Próbki w środowisku alkaliów już po 2 tygodniach uległy rozpadowi. Chalcedonit z Teofilowa zawierał dwie odmiany skały: słabo reaktywną, zbitą oraz porowatą – zawierającą substancje ilaste o znacznej reaktywności (8). Ponieważ odmiany zbitą było znacznie więcej kruszywo oceniono jako przydatne do betonów wykonanych z cementami niskoalkalicznymi.

Jak wykazały badania (18) próbki czert i opok ulegają rozpadowi w środowisku alkaliów, a w betonach wykazują pęcznienie i spękania oraz powodują powstawanie wycieków wskutek dyfuzji krzemionki do zaczynu i powstawania w nim uwodnionego krzemianu alkaliów. Stopień reaktywności krzemieni i litydów zależy od ich struktury i formy w jakiej występuje w nich krzemionka (18, 5).

Z piaskowców fliszowych podkarpackich zbadano skały



Ryc. 4. Wykres zmian liniowych w roztworze alkaliów prostodłościanów wyciętych z wapienia Morawica (1), dolomitu z Zachełmia (2, 3) i piaskowca z Komańczy (4).



Ryc. 5. Mikrofotografia próbki betonu z kruszywem bazaltowym wykonana za pomocą mikroskopu elektronowego (Compo pow. 100×). Widoczne ziarna kruszywa bazaltowego z licznymi wewnętrznymi mikroszczelinami oraz szczelinami oddzielającymi je od zaczynu cementowego.



Ryc. 6. Powierzchnie beleczek betonowych z kruszywem ze złóż Halinów (1, 2), Żabiny (3), Rydwan (4, 5) oraz z cementami portlandzkimi „350” Nowiny II (1, 3, 5) i Saturn (2, 4). Pow. 2×.

i betony wykonane z kruszyw pochodzących ze złóż Osielec, Komańcza, Bóbrka, Poniwiec i Straconka. Piaskowce fliszowe jako spoiwo zawierały dolomit z domieszką substancji ilastych. Piaskowiec z Komańczy jest reaktywny, a zwłaszcza jedna z jego warstw. Kruszywo z tego piaskowca działa niekorzystnie na betony z cementami wysokoalkalicznymi. W ziarnach kruszywa obserwuje się rozluźnienie struktury, w zaczynie cementowym powstają szerokie strefy reakcyjne, jak również mikrorysy i mikroszczeliny. Piaskowiec z Bóbrki jest reaktywny, lecz w mniejszym stopniu niż piaskowiec z Komańczy. Piaskowiec z Osielec jest słabo reaktywny i może być stosowany do produkcji kruszywa do betonów. Piaskowiec ze złoża Poniwiec ma spoiwo kalcytowo-dolomitowe, z domieszką substancji ilastych. Jest słabo ekspansywny i może być stosowany do produkcji kruszyw do betonów. Piaskowiec ze Straconki, o spoiwie krzemionkowo-węglanowo-dolomitowym z domieszką substancji ilastych, jest reaktywny. Jako kruszywo wywołuje zmiany w betonach z cementami wysokoalkalicznymi i sam ulega zmianom.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że piaskowce fliszowe podkarpackie, ze względu na występujące w nich spoiwo węglanowo-dolomitowe i zawartość substancji ilastych, są podatne na działanie alkaliów. Przydatność ich do betonów jest warunkowana stopniem ich reaktywności i rodzajem stosowanego cementu. Uruchamianie nowych złóż tych piaskowców wymaga przeprowadzenia badań sprawdzających.

Piaskowce o lepszym krzemionkowym występowaniu w żwirach Niżu Polskiego (18) zarówno zwięzłe, jak i porowate są wrażliwe na działanie alkaliów. Ich obecność powoduje powstawanie objawów reaktywności, przy stosowaniu ich jako kruszyw do betonów z cementami wysokoalkalicznymi. Pod działaniem alkaliów zaczynu następuje dyfuzja krzemionki w strefę reakcyjną w zaczynie, powstają zmiany w ziarnach kruszywa oraz wycieki, naszkorwienia i odpryski na powierzchniach betonów. Na-

łożone na betony z objawami reakcji alkalia-krzemionka tynki mogą wykazywać, zwłaszcza w pierwszym roku odpryski, ubytki i spękania (12). Piaskowce kwarcytowe i kwarcyty są w małym stopniu reaktywne.

PODSUMOWANIE

Prowadzone badania wykazały, że prawie wszystkie skały są w jakimś stopniu podatne na działanie alkaliów. Niewielka reaktywność kruszyw jest korzystna dla betonów, gdyż reakcje zachodzące na styku ziarn kruszywa powodują lepsze ich powiązanie z zaczynem, jak np. w przypadku ziarn kwarcu lub wapieni. Decydujące znaczenie w przypadku kruszyw reaktywnych ma ilość alkaliów zawartych w cementach użytych do betonów oraz warunki w jakich przebywa beton. W warunkach powietrzno-suchych reakcje alkalia-kruszywo nie ujawniają się, gdyż przebieg ich jest bardzo powolny. Podniesienie temperatury otoczenia i obróbka termiczna przyspieszają reakcje zachodzące w betonie, zwłaszcza w przypadku reakcji alkalia-krzemionka. Stosowanie kruszyw reaktywnych do betonów wymaga użycia do nich cementu niskoalkalicznego, zawierającego poniżej 0,6% alkaliów (w przeliczeniu na Na_2O). Ilość użytego do betonów cementu musi być tak obliczona, żeby całkowita zawartość alkaliów nie przekraczała 3 kg w 1 m^3 betonu. Do betonów z kruszywem słabo reaktywnym można stosować cementy średnioalkaliczne o zawartości alkaliów do 0,8% (w przeliczeniu na Na_2O). Do betonów z kruszywem niereaktywnym można stosować również cementy wysokoalkaliczne (7).

Dodatek kruszywa niereaktywnego do reaktywnego zabezpiecza betony przed uszkodzeniem w przypadku użycia do nich cementów wysokoalkalicznych. Ilość tego dodatku zależy od stopnia reaktywności kruszywa i od ilości zawartych w cemencie alkaliów. Dodatek pucołany

lub bardzo drobno zmielonego piasku kwarcowego w ilości ok. 10% wpływa korzystnie na beton w przypadku, gdy zachodzić w nim może reakcja alkalia – krzemionka (20). Dodatek do 8% pyłów węglanowych (bez substancji ilastych) do betonów z kruszywem z wapieni poprawia jego właściwości wówczas, gdy w betonie zachodzi reakcja między dolomitem zawartym w wapieniu a alkaliarnymi złącznikami cementowymi (17).

Stosowanie kruszyw do betonów wymaga obecnie dobrego rozeznania ich jakości. Informacja, że dane kruszywo odpowiada normom jest niewystarczająca. Obowiązujące w Polsce normy nie uwzględniają wymagań co do podatności kruszyw na działanie alkaliów zaczynu cementowego. Podobnie wymagania dla cementów nie zawierają ograniczenia ilości zawartych w nich alkaliów. W stosunku do odpowiedzialnych konstrukcji należy zachować specjalną ostrożność przy wyborze materiałów do betonów oraz dobrać odpowiednio współczynnik bezpieczeństwa.

W Polsce istnieje duża różnorodność złóż materiałów kamiennych sypkich i ilastych, o różnym stopniu reaktywności, co pozwala na racjonalny wybór. Nie wszystkie produkowane u nas cementy powinny być wysokoalkaliczne i w najbliższej przyszłości sprawa ta musi być właściwie uregulowana. Produkcja betonów metodami przemysłowymi stawia bowiem nowe wymagania, którym trzeba się będzie podporządkować. Właściwości kruszyw, jako materiału naturalnego ukształtowanego w określonych procesach geologicznych nie możemy zmienić. Można jedynie częściowo eliminować jego wady. Natomiast produkcja cementu jest procesem technologicznym, zależnym od człowieka, możemy ją więc tak ustawić, aby otrzymać produkt najbardziej przydatny do stosowania w obecnym budownictwie. Asortyment produkowanych cementów powinien uwzględniać „czysty” cement portlandzki o niskiej zawartości alkaliów. Inne kraje (St. Zj., ZSRR) produkują takie cementy (16). Należy nowelizować normy dla cementów i kruszyw oraz wprowadzić odpowiednie wymagania, co do ilości zawartych w cementach alkaliów oraz dopuszczalnej reaktywności kruszyw.

LITERATURA

1. Ciach T.D., Penkala B., Zasuń H. – Zachowanie się w betonie kruszywa z wapienia z Trawnika zawierającego aktywną krzemionkę. Mat. XIX Konf. Nauk. Kom. Inż. PAN i Kom. Nauki PZITB – Krynica 1973.
2. Gillot J.E. – Mechanism and kinetics of expansion in the alkali carbonate rock reaction. Res. Paper 1964 nr 222, NRC Canada 8040.
3. Hadley D.W. – Alkali reactivity of carbonate rock expansion and dedolomitisation. Proc. DRB 1961 no. 40.
4. Kurdowski W., Błach S. – Właściwości cementów polskich w porównaniu z cementami światowymi na tle wymagań normowych. Cement – Wapno – Gips 1978 nr 6.
5. Locher T.W., Sprung S. – Ursache und Wirkungsweise der Alkali Reaction. Beton 1973 nr 7/8.
6. Mehta P.K. – Energia, zasoby surowcowe i ochrona środowiska – przegląd sytuacji przemysłu cementowego w USA. Cement – Wapno – Gips 1979 nr 6.
7. Penkala B. – Zagadnienie zmniejszenia ekspansji betonów z reaktywnym kruszywem ze skał węglanowych. Ibidem 1974 nr 10.
8. Penkala B. – Ocena chalcedonu z Inowłódza jako surowca do produkcji kruszywa do betonów. Ibidem 1975 nr 4.
9. Penkala B. – Badania przydatności bazaltu jako kruszywa do betonów ITiOPB PW, materiały niepubl. 1976.
10. Penkala B. – Reakcje zachodzące w betonie między alkaliarnymi a kruszywem. Mat. Konf. Nauk. Wydz. Inż. Łąd. PW, referat 1977.
11. Penkala B. – Wpływ ilości zawartych w cementach alkaliów na zachowanie się betonów z kruszywami żwirowymi. Cement – Wapno – Gips 1978 nr 6.
12. Penkala B. – Analiza przyczyn uszkodzenia struktury betonu oraz ocena jego przydatności w konstrukcji ITiOPB, PW, spraw. w maszynopisie 1979.
13. Penkala B., Gańska-Wysocka W., Zasuń H. – Badanie przydatności zsilifikowanego wapienia z Trawnika do produkcji kruszywa do betonów. Prace ITiOPB, PW 1973 nr 5.
14. Penkala B., Gańska-Wysocka W., Zasuń H. – Ocena własności betonów wykonanych z lekkiego wapienia zsilifikowanego. Ibidem 1975 nr 9.
15. Penkala B., Piasta J. – Nowe kryteria określania przydatności skał węglanowych do produkcji kruszywa do betonów. Cement – Wapno – Gips 1970 nr 1, 2, 4.
16. Penkala B., Piasta J. – Wpływ środowisk alkalicznych na wapienie ze złoża Morawica. Ibidem 1971 nr 11.
17. Penkala B. (z zespołem) – Wpływ składników chemicznych i mineralogicznych (związki siarki, dolomitu, minerałów ilastych, związków organicznych) w wapieniach, wapieniach dolomitowych, dolomitach i piaskowcach na ich przydatność do produkcji kruszyw przeznaczonych do betonów konstrukcyjnych. Spraw. w maszynopisie, ITiOPB, PW, 1974–76.
18. Penkala B. (z zespołem) – Ocena jakości oraz przydatności do betonów kruszyw naturalnych obszaru Niżu Polskiego w zależności od ich składu petrograficznego. Spraw. w maszynopisie. Ibidem 1974–1977.
19. Penkala B. (z zespołem) – Badanie reaktywności i zdolności do ekspansji skał i betonów oraz wpływu słabej agresji chemicznej na betony. Spraw. w maszynopisie. Ibidem 1978.
20. Powers T.C., Steinoor N.H. – An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction. Part I – The chemical reaction and mechanism of expansion. Part II – A hypothesis concerning safe and unsafe reaction with reactive silica in concrete J.Y. ACY 1955 nr 6 i 8.
21. Redakcja „Cement – Wapno – Gips” – Niektóre zagadnienia związane z zawartością alkaliów w klinierze i dopuszczalną ich zawartością w cemencie. CWT 1978 nr 6.
22. Swenson F.G., Gillot J.E. – Alkali reactivity of dolomitic limestone aggregate. Mag. of Concrete Research 1967 nr 59.

SUMMARY

The question of the use of various types of artificial aggregates of carbonate and siliceous rocks and sandstones, and natural aggregates in the building industry in Poland is discussed with reference to the Author's data and those published in the literature. Some recent changes in technology of production of cement in the country resulted in marked increase in content of alkali in portland cements and, therefore, alkali reactivity of the above mentioned artificial and natural aggregates.