Andrzej M. Brandt
Daria Jóźwiak-Niedźwiedzka
Grzegorz Nowowiejski
Piotr Denis

Wyniki badania betonu osłonowego z kruszywem magnetytowym

TEST RESULTS OF CONCRETE WITH MAGNETITE AGGREGATE FOR SHIELDS AGAINST RADIATION

Streszczenie

Betony magnetytowe przeznaczone są jako materiał osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej. Betony ciężkie wymagają starannego projektowania, aby zapewnić odpowiednią urabialność mieszanki i jednorodność struktury betonu.

Referat zawiera wyniki projektowania trzech mieszanek betonowych z kruszywem magnetytowym oraz obrazy struktury i wytrzymałość na ściskanie próbek wykonanych z tych betonów. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono możliwość poprawnego wykonania betonów magnetytowych bez dodatku piasku naturalnego, uzyskując wytrzymałość od C35/45 do C45/55.

Abstract

Magnetite concretes are used for shields against ionizing radiation in nuclear power plants. For heavy concretes careful design and execution is required in order to ensure necessary workability of the mix and homogeneity of hardened concrete structure.

In the paper the results of design of three magnetite concretes are presented as well as images of structure and compressive strength of specimens made with these concretes. After testing, the possibility of correct execution of design mixes without natural sand was checked and compressive strength within the limits C35/45–C45/55 was confirmed.

prof. dr hab. inż. Andrzej M. Brandt – Instytut Podstawowych problemów Techniki
dr inż. Daria Jóźwiak-Niedźwiedzka – Instytut Podstawowych Problemów Techniki
mgr inż. Grzegorz Nowowiejski – Hydrobudowa-1 Betoniarnia-Laboratorium
mgr inż. Piotr Denis – Instytut Podstawowych Problemów Techniki

1. Betony osłonowe – wymagania techniczne

Wymagania w stosunku do betonów osłonowych dotyczą różnych właściwości, zależnie od rozmaitych zastosowań betonu w obiektach energetyki jądrowej, składach materiałów i odpadów promieniotwórczych i in.

Podstawowym wymaganiem jest ochrona personelu i otoczenia przed strumieniem neutronów i promieniowaniem gamma. Betony z odpowiednio dobranych kruszyw są głównym materiałem do różnych konstrukcji osłon, zewnętrznych w stosunku do powłoki stalowej i ewentualnie ołowianej. Materiały o wysokiej gęstości zatrzymują promieniowanie gamma, więc ciężkie kruszywa są tu niezbędne. Również hamowanie strumieni neutronów prędkich odbywa się w takich kruszywach. Natomiast materiały zawierające wodór są potrzebne do zatrzymywania powolnych i termicznych neutronów. W zwykłym betonie potrzebne jest ok. 0,45% wodoru, co odpowiada ok. 4% wody. Ponieważ w całkowicie dojrzałym betonie nie ma dostatecznej ilości wody, to używane są kruszywa zawierającego związki wodoru (H) i boru (B), np. kolemanit, Alexander i Mindess [1].

Wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i ścinanie jest niezbędna we wszelkich konstrukcjach, które przenoszą obciążenia wynikające z normalnej eksploatacji i oddziaływań środowiska. Szczególne wymagania odnoszą się do elementów narażonych na obciążenia awaryjne, na które osłony nie są projektowane. W elementach betonowych, pełniących jedynie funkcje osłonowe, wymagania wytrzymałościowe są znacznie mniejsze, natomiast konieczna jest osłonność, stosownie do usytuowania tych elementów wobec procesów technologicznych. We wszystkich przypadkach trzeba spełnić wymagania technologiczne, co oznacza, że konsystencja betonu powinna umożliwić prawidłowe wykonanie i zagęszczenie mieszanki.

Szczególne znaczenie ma zapewnienie trwałości betonu w warunkach oddziaływania czynników klimatycznych, promieniowania, podwyższonej temperatury oraz wobec ewentualnych reakcji zachodzących w betonie pod wpływem działania alkaliów na kruszywo, działania związków siarki z wód gruntowych i procesów korozyjnych prętów zbrojeniowych.

Wymagana trwałość konstrukcji betonowych w takich obiektach zwykle obejmuje okres co najmniej 60 lat przewidzianej eksploatacji, więc niezbędne jest odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie osłon betonowych. Konieczne jest przeprowadzenie poprzedzających prac doświadczalnych i studialnych, aby zagadnienie trwałości w konkretnym przypadku odpowiednio rozwiązać, przy czym projektowanie na określony okres (*performance-based design*) nie zostało powszechnie wprowadzone w budownictwie poza elektrowniami jądrowymi. Możliwość wdrożenia takiego projektowania na określony okres i właściwości (*prescription to performance P2P*) powinna być uwzględniona przy budowie elektrowni atomowych, składowisk odpadów i podobnych obiektów. Podstawowymi trudnościami jest tu brak niezawodnych metod doświadczalnych pomiaru niezbędnych właściwości oraz sprawdzonych modeli, służących do przewidywania jakości betonu po 50 czy 100 latach użytkowania.

Wymagana trwałość wiąże się m.in. z trudnym do spełnienia warunkiem jednorodności struktury i dobrego przewodzenia ciepła, aby uniknąć nadmiernych gradientów temperatury i wywołanych tym rys. Kruszywa ciężkie charakteryzują się anizotropią odkształcalności termicznej, co może powodować znaczne naprężenia wewnętrzne na skutek wzrostu temperatury osłony pod wpływem promieniowania. Zagadnienia naprężeń termicznych wywołanych promieniowaniem w osłonach betonowych były szczegółowo opisane już przez Hilsdorfa i in. [2] jeszcze w latach 70. ubiegłego stulecia.

Jest konieczne przyjęcie wymagania, aby w projektowaniu uwzględnić warunki, wynikające z dotychczasowych doświadczeń i zaleceń w krajach, w których technologia energetyki jądrowej jest dostatecznie rozwinięta. Prace badawcze w Projekcie „Atomshield" rozpoczęto od obszernych studiów metod projektowania i wykonywania osłon betonowych, Brandt [3], Brandt, Jóźwiak-Niedźwiedzka [4], które w okresie ostatnich 40 lat rozwijały się intensywnie zarówno w sensie zakresu badań, jak i stosowanych metod.

W projekcie uwzględnione są także wyniki uzyskane w tej dziedzinie w Polsce w latach 70. in 80., Ablewicz, Jóźwik [5], Ablewicz, Dubrowski, [6]. W niniejszym referacie przedstawiono wstępne wyniki, uzyskane przy komponowaniu i badaniu właściwości betonów magnetytowych.

2. Betony magnetytowe w osłonach przed promieniowaniem jonizującym

Betonowe osłony przed promieniowaniem gamma wykonywane są z kruszyw uzyskanych z nieuwodnionych rud żelaza. Są to: magnetyt Fe_3O_4 (do 71% Fe), hematyt Fe_2O_3 (do 68% Fe) oraz syderyt $FeCO_3$ (do 45% Fe) i limonit, przy czym syderyt i limonit są uważane jako ubogie rudy, a już w latach 70. w Polsce badano dwie pierwsze rudy do betonów osłon, Ablewicz i Jóźwik [5], Ablewicz i Dubrowski [6], a także stosowano jako kruszywa ścinki i odpadki stalowe. Rudy magnetytowe ze Szwecji, używane w Polsce przy budowie reaktorów badawczych były wysokiej jakości, a wykonywane z nich betony miały następujące właściwości:

- gęstość objętościowa 3,75 – 3,90 g/cm^3;
- wytrzymałość na ściskanie f_c = 30 – 40 MPa (przy 300-350 kg/m^3 cementu ‚350');
- wytrzymałość na rozciąganie f_t = (0,08 – 0,13) f_t;
- moduł sprężystości między 90 a 120 MPa;
- współczynnik Poissona 0,20 – 0,23.

Rozszerzalność termiczna kryształów magnetytu jest niewielka i mało różni się w trzech głównych kierunkach, a kryształy są drobne, dzięki czemu betony magnetytowe są odporne na wysoką temperaturę i jej zmiany. Ważną właściwością betonu z kruszywem magnetytowym jest dobre przewodzenie ciepła, co zmniejsza niebezpieczeństwo powstawania dużych gradientów temperatury i naprężeń termicznych.

Przykłady kompozycji betonów z kruszywem magnetytowym zestawione są w Tabeli 1.

Tabela 1. Przykłady trzech kompozycji betonów magnetytowych wg. badań w USA, Ablewicz i Dubrowski [6]

Składniki	1	2	3
	kg/m^3		
drobne kruszywo	1376	592	739
grube kruszywo	1762	2880	2346
cement portlandzki	389	281	392
woda	184	155	n/a
gęstość	3700	3900	3580

Działanie wiązki prędkich lub termicznych neutronów albo promieniowania gamma na osłony betonowe może powodować zmiany właściwości betonu, przede wszystkim przez modyfikację objętości kruszywa. Jest to spowodowane zmianą siatki krystalicznej minerałów, z których utworzone są ziarna kruszywa. Fluencja neutronów rzędu 10^{19}n/cm^2 oraz promieniowanie gamma rzędu 10^{10} są uważane za wartości krytyczne w odniesieniu do wytrzymałości betonu, Pomaro i in. [7].

Porównania właściwości osłonowych czterech betonów: ze zwykłym kruszywem, z kruszywem barytowym, serpentynitowym oraz z kruszywem, zawierającym żelazo w dwóch postaciach (26% magnetytu i 62% ścinków stalowych w stosunku do masy betonu) opublikowane są w pracy Pomaro i in. [7]. Gęstości tych betonów były różne, odpowiednio: 2,3; 3,35; 2,6 i 5,1 t/m^3. Zarówno obliczeniowe, jak i doświadczalne wyniki wskazały na najlepsze właściwości osłonowe betonu z kruszywem zawierającym żelazo, a w kolejności z barytem; co odpowiada gęstości badanych betonów.

W artykule Eissa i in. [8] zwrócono uwagę na wpływ promieni gamma na próbki betonu, wykonanego z kruszywa, będącego mieszaniną hematytu, magnetytu i limonitu. Wraz z powiększaniem dawki napromieniowania do 1000 Mrad obserwowano zmiany w mikrostrukturze i wodzie związanej w magnetycie.

Zdolność do odbijania i pochłaniania promieniowania gamma przez osłony betonowe wzrasta wraz z zawartością pyłów lotnych typu F, w których czynną rolę pełnią tlenki żelaza Fe_3O_4 (magnetyt), a zwłaszcza Fe_2O_3; silniejszy efekt wywołało zastąpienie pyłów przez te tlenki, zależność tę stwierdzili Jingyao Cao i Chung [9].

Badania przeprowadzone przez Mahdy i in. [10] dotyczyły betonów wysoko-wytrzymałych, w których wykorzystano kruszywo magnetytowe o największych ziarnach średnicy 15 mm, łączone z naturalnym piaskiem, a także z drobnym magnetytem. Badane betony magnetytowe zawierały znaczną ilość cementu, wynoszącą 500 kg/m^3 oraz miały niską wartość w/c = 0,24. Zależnie od składu i dodatków (m.in. pyłów krzemionkowych) uzyskano znaczny ciężar właściwy, dochodzący do ok. 3900 kg/m^3, przy wytrzymałości na ściskanie od 80 do 140 MPa po 190 dniach dojrzewania. Dodanie pyłów krzemionkowych pozwoliło uzyskać długotrwały choć powolny przyrost wytrzymałości po upływie normowych 28. dni, co jest istotne ze względu na długi okres między betonowaniem konstrukcji, a początkiem eksploatacji reaktora. Wykorzystanie takich betonów do osłon pozwoliło na znaczne zmniejszenie ich grubości przy zachowaniu wymaganej osłonności przed promieniami gamma. Szczególnie dodanie do mieszanek pyłów krzemionkowych (10% masy cementu) pozwoliło na zmniejszenie grubości ściany, przepuszczającej tylko 10% promieniowania (TVL *tenth-value layer*).

3. Kompozycja i właściwości betonów magnetytowych

3.1. Założenia

Wykonanie osłon z betonów ciężkich wymaga specjalnej technologii przygotowania mieszanek, ponieważ dobra urabialność jest trudniej osiągalna niż w przypadku zwykłych betonów konstrukcyjnych i trzeba użyć więcej drobnej frakcji kruszywa i cementu. Jednak z uwagi na składniki o bardzo różnej gęstości, współczynnik *w/c* nie powinien być wyższy niż 0,5. Co więcej, ze względu na ciężkie kruszywo konieczne jest ograniczenie czasu mieszania i inne zabiegi, aby uniknąć segregacji przez opadanie ziaren tego kruszywa.

Liczne wyniki doświadczalne badania betonów osłonowych dostarczają w ostatnich latach cennych informacji, ale nie wszystkie publikowane rezultaty pomiarów są w pełni

zgodne. Zjawiska spowalniania i absorpcji neutronów o różnych prędkościach i energiach, a także wyzwalane przy tym wtórne promieniowanie gamma są na tyle skomplikowane, że rozwiązania muszą być poszukiwane w konkretnych przypadkach osłon. Stwarza to konieczność podjęcia prac w celu uzyskania odpowiednich kompozycji betonów osłonowych i szczególnie starannego ich projektowania, uwzględniając oprócz efektów osłony przed różnymi rodzajami promieniowania także wymagania technologiczne i rodzaje zastosowanych składników. Oznacza to potrzebę przeprowadzenia różnorodnych badań przy użyciu lokalnych kruszyw i spoiw, a także importowanych kruszyw specjalnych, ponieważ zwiększony koszt betonu może być przynajmniej częściowo równoważony przez wykorzystanie możliwości ograniczenia grubości osłon betonowych.

W Polsce ceny kruszyw specjalnych znacznie przekraczają ceny kruszyw dobrej jakości do zwykłych betonów konstrukcyjnych; np. baryt kosztuje ok. 620 zł/t, a magnetyt – 900 zł/t (netto).

3.2. Kruszywo magnetytowe

Badania kruszywa magnetytowego (Kiruna, Szwecja), mieszanki i betonu przeprowadzono w Laboratorium Hydrobudowy-1 w Warszawie. Gęstość kruszywa magnetytowego wynosiła 4,8 t/m^3, a twardość w skali Mohsa 5,5; pozostałe właściwości fizyczne i chemiczne są zestawione w tabelach 2 i 3 (wartości średnie). Na fotografii 1 przedstawiono zdjęcia dwóch frakcji kruszyw wykorzystanych w badaniach.

frakcja 0-5,6 mm frakcja 2-16 mm

Fot. 1. Zdjęcia dwóch frakcji kruszy zastosowanych w badaniach

Tabela 2. Właściwości kruszywa magnetytowego (%) według norm

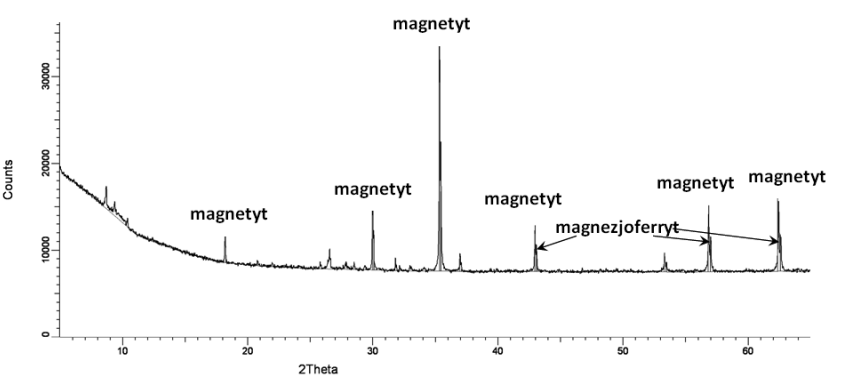
Rozmiar ziaren, mm	Nasiąkliwość i graniczna wartość wg PN-77/B-06714/18	Miażdżenie i graniczna wartość wg PN-78/B-06714/40	Mrozoodporność i graniczna wartość PN-78/B-06714/19
0–5,6	0,4 < 3,0	12,5 < 16,0	0,2 < 5,0
2–16	0,2 < 0,8	11,2 < 12,0	0,2 < 1,0

Tabela 3. Skład chemiczny badanego kruszywa magnetytowego (%), główne składniki

Fe_3O_4	SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	P	S
90,8	4,0	0,4	2,5	0,2	0,3	0,6	0,03

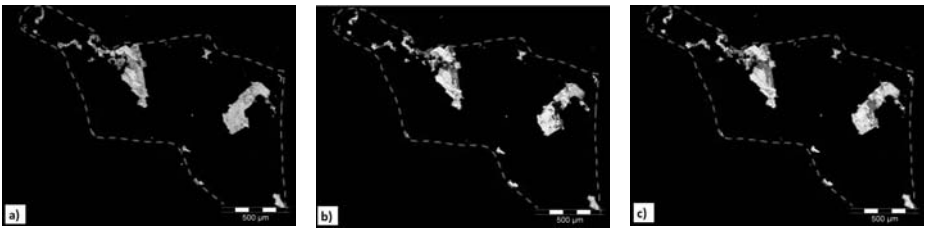
Kruszywo do badań dyfraktometrycznych (XRD) zostało wstępnie rozdrobnione i przesiane przez sito o boku oczka kwadratowego 1 mm, następnie dalej rozdrobnione, a w końcu utarte w moździerzu agatowym, tak aby próbka przeszła w całości przez sito 0,045 mm. Tak sproszkowane kruszywo było umieszczone w specjalnie przeznaczonej do tego celu kuwecie do badań w XRD. Badania XRD kruszywa magnetytowego wykonane zostały na dyfraktometrze Bruker D8 Discover, przy napięciu lampy wynoszącym 40 kV i natężeniu prądu 40 mA. Źródłem promieniowania rentgenowskiego była lampa miedziana (promieniowanie CuK o długości fali 0,1542 nm). Pomiary prowadzone były w trybie odbiciowym, stosując geometrię Bragg-Brentano ze szczeliną 0,6 mm i dwoma solerami 2,5°, po stronie pierwotnej i wtórnej. Zakres kątowy pomiarów 2q wynosił od 5 do 65 stopni, z krokiem 0,02 stopnia i czasem zliczania wynoszącym 1s na każdy krok. Analizę jakościową w oparciu o uzyskane profile rentgenowskie wykonano w programie ewaluacyjnym EVA v.3, wykorzystując udostępnioną przez producenta bazę danych.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań XRD kruszywa magnetytowego. Badane kruszywo zawierało magnetyt – tlenek żelaza (II) i żelaza (III) $Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4$ oraz niewielkie ilości magnezjoferrytu $Mg(Fe^{3+})_2O_4$. Magnezjoferyt składał się jedynie z trójtlenku żelaza (79,85% Fe_2O_3), resztę stanowił tlenek magnezu (20,15% MgO). Kruszywo wykorzystane do dalszych badań zawierało w większości żelazo, nie stwierdzono obecności innych minerałów, w tym niekorzystnych z uwagi na właściwości mieszanki betonowej i później stwardniałego betonu.



Rys. 1. Dyfraktogram kruszywa magnetytowego

Wykonano również z kruszywa magnetytowego cienkie szlify do analizy w świetle przechodzącym. Analizę cienkich szlifów przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Olympus BX 51 połączonego z kamerą cyfrową oraz oprogramowaniem do pomiarów. Mikroskop wyposażony był w lampę halogenową o mocy 100 Wat do obserwacji w świetle przechodzącym. Obserwacje przeprowadzono w świetle spolaryzowanym (skrzyżowane nikole i równoległe nikole).



Fot. 2. Mikrofotografie kruszywa magnetytowego frakcji 2-16 mm w świetle przechodzącym; a) równoległe nikole, b) skrzyżowane nikole, c) skrzyżowane nikole z płytką gipsową; przerywaną linią zaznaczono kontury ziarna kruszywa, pow. 40x

Na fot. 2 przedstawiono przykładowe mikrofotografie cienkich szlifów z kruszywa magnetytowego. Magnetyt w świetle przechodzącym jest nieprzejrzysty – czarny. Z tego powodu identyfikacja kruszywa na próbkach całego kruszywa jest bardziej wiarygodna (fot. 1) niż z użyciem konwencjonalnego mikroskopu petrograficznego, ponieważ magnetyt może być łatwo pomylony z ilmenitem. Na fot. 3 widać niewielkie wtrącenia biotytu i hornblendy (kolorowe obszary), jednak nie zostały one uwidocznione w badaniach XRD z uwagi na małą zawartość w kruszywie.

3.3. Mieszanki betonowe

Do badań przygotowano trzy mieszanki betonowe z kruszywem magnetytowym; informacje o proporcjach składników i oznaczonych właściwościach mieszanek zestawione są w tabeli 4. Frakcje kruszyw i ich ilości były tak dobrane, aby zapewnić uzyskanie szczelnego stosu okruchowego, jednak bez zastosowania piasku naturalnego. Dwie oddzielne frakcje 0–5,6 mm oraz 2–16 mm pozwoliły na poprawne dozowanie i wymieszanie podczas produkcji w wytwórni betonu.

Zaprojektowano skład mieszanek betonowych i wykonano próby laboratoryjne o objętości ok. 70 litrów. Potrzebna ilość zaczynu cementowego obliczona została z gęstości materiałów, tak aby otrzymać 1 m^3 betonu, (cement 119,1; magnetyt 711,5; woda 158; domieszki chemiczne 6,4; w sumie – 995 litrów, czyli około 1 m^3). Zawartość powietrza nie była mierzona z uwagi na fakt, że nie był to beton napowietrzany, zostanie jednak określona przez rozkład i zawartość porów – badanie w stwardniałym betonie jest bardziej miarodajne. Szczelność mieszanki określona zostanie przez badania betonu: wodoprzepuszczalność oraz porowatość mierzona metoda tomografii komputerowej.

Metodami normowymi określono konsystencję mieszanki betonowej przy użyciu stożka opadowego oraz gęstość objętościową mieszanki. Wykonano próbki sześcienne o boku 150 mm do badań wytrzymałości betonu, które były przechowywane w normowo określonych warunkach wysokiej wilgotności i stałej temperatury do chwili badania.

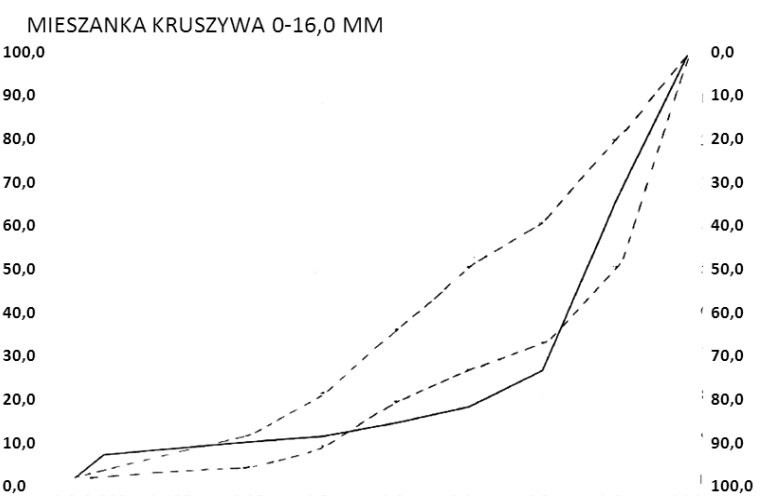
Zaprojektowane mieszanki zawierały jedynie kruszywo magnetytowe dwóch frakcji 0-5,6 mm i 2-16 mm, bez piasku naturalnego, a na rysunku 2 przedstawiono krzywą przesiewu tego kruszywa. Mieszanki różniły się wartością stosunku wodno-cementowego, który wynosił odpowiednio 0,4; 0,45 i 0,5. Z uwagi na przewidywane zastosowanie betonów w masywnych konstrukcjach ścian osłonowych, użyto cement CEM II/B-S, nie przekraczając ilości 450 kg/m^3 cementu, z uwagi na możliwość wystąpienia dwóch niekorzystnych skutków: wzrostu temperatury podczas hydratacji cementu i powiększenia skurczu; oba mogą spowodować powstanie rys i pogorszenie skuteczności osłony.

Tabela 4. Zestawienie składów i właściwości mieszanek z kruszywem magnetytowym

Składniki	M/0,50	M/0,45	M/0,40
cement CEM II/B-S 32,5R	361	362	370
magnetyt 0–5,6 mm	1173	1179	1205
magnetyt 2–16 mm	2155	2165	2214
domieszka upłynniająco-opóźniająca	2,52	2,53	2,59
domieszka superplastyfikująca	2,52	4,83	10,58
woda	177	158	143
w/c	0,50	0,45	0,40
Właściwości			
opad stożka [mm]	140	150	140
gęstość objętościowa [kg/m^3]	3871	3871	3945

Uzyskano mieszanki betonowe o gęstości powyżej 3800 kg/m^3, co znacznie przewyższa powszechnie przyjęta granicę 2600 kg/m^3, powyżej której betony zalicza się do ciężkich.

Systematyczna kontrola konsystencji i jednorodności mieszanki betonowej, zawierającej kruszywo ciężkie jest bardzo ważna z uwagi na wymagane późniejsze właściwości stwardniałego betonu. Jak podają Koton i Trybalski [11], do produkcji betonów ciężkich nie należy projektować ich składu na konsystencję bardziej ciekłą niż 120 mm mierzoną opadem stożka, zgodnie z PN-88/B-06250. Ograniczenie to podyktowane jest obawą, iż w miarę wzrostu ciekłości mieszanki, przy zastosowaniu kruszyw ciężkich wzrasta ryzyko rozsegregowania i sedymentacji ziaren kruszywa w mieszance.



Rys. 2. Krzywa przesiewu kruszywa magnetytowego zastosowanego w badaniach; krzywe graniczne oznaczono linią przerywaną

Układając mieszankę betonową należy dążyć do tego, aby cała partia dostarczonej mieszanki miała praktycznie jednakową konsystencję, zmieniającą się w bardzo ograniczonym zakresie. Jest to wymaganie decydujące o jakości mieszanki betonowej przy wypełnieniu deskowań czy form i zapewniające możliwość prawidłowego zagęszczenia. Duże różnice konsystencji pomiędzy poszczególnymi partiami mieszanki w jednej konstrukcji mogą doprowadzić do złego zagęszczenia i braku jednorodności, wskutek czego mogą powstać pustki powietrzne wewnątrz betonowanego elementu.

W badaniach mieszanek betonowych z kruszywem magnetytowym sprawdzano zmiany konsystencji w czasie. Mieszankę M/0,45 o w/c = 0,45 przygotowano w mieszarce planetarnej i opad stożka mierzony po czasie 3, 15, 30 i 45 min wyniósł odpowiednio 150, 140, 120 i 70 mm. Okres zachowania urabialności mieszanki bez stosowania specjalnych domieszek wyniósł 30 min, przy czym nie zauważono objawów związanych z segregacją kruszywa czy też przedwczesnym wiązaniem cementu.

Przyjęto warunek, że ze względu na ciężkie kruszywo konieczne jest ograniczenie czasu mieszania w taki sposób, aby zapewnić mieszance odpowiednią konsystencję i urabialność potrzebną do wbudowania oraz inne zabiegi technologiczne, takie jak np. odpowiednio dobrany stos okruchowy aby uniknąć segregacji.

3.4. Betony z kruszywem magnetytowym

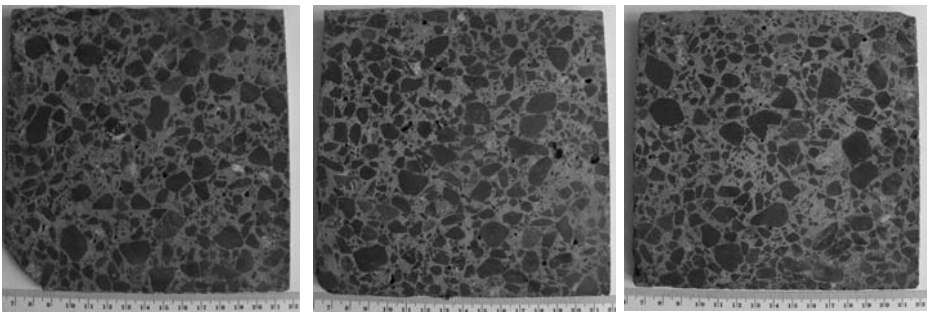
Po 2, 7, 16 i 28 dniach zbadano próbki z betonu magnetytowego. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie i ich gęstości betonu zestawione są w tabeli 5.

Do badań użyto maszynę wytrzymałościową klasy I typu DP-1600 i typu Dr MB-300, stosując normową metodę badania na ściskanie wg PN-88/B-06250 lub wg PN-EN 12390-3:2002. W każdym terminie badane były trzy próbki kostki o boku 150 mm. Po 28 dniach uzyskano wyniki gęstości betonu powyżej 3900 kg/m^3, co można uznać za zadowalające. Gęstość betonu stwardniałego jest wyższa z uwagi na częściową utratę wody zarobowej przez parowanie i reakcje chemiczne. Gęstość betonu, tak jak wytrzymałość na ściskanie, zwiększała się wraz ze zmniejszaniem *w/c*. Uzyskano f_c od 47 MPa w betonie o w/c=0,5 do 58 MPa w betonie o *w/c*=0,4.

Na fotografii 3 przedstawiono przykładowe przekroje badanych betonów po 28 dniach dojrzewania. Nie zauważono segregacji kruszywa ani niejednorodności w próbkach, z wyjątkiem betonu M/0,50, w którym wystąpił brak kruszywa grubego w warstwie przy powierzchni do 7 mm.

Tabela 5. Wytrzymałość na ściskanie i gęstość betonów z kruszywem magnetytowym

Wytrzymałość na ściskanie, [MPa] i gęstość w stanie naturalnym [kg/m^3]						
Wiek betonu	M/0,50		M/0,45		M/0,40	
po 2 dniach	18,9	3880	17,2	3893	26,1	3987
po 7 dniach	35,4	3951	38,9	3951	46,6	4029
po 16 dniach	43,6	3963	49,7	3944	54,0	4002
po 28 dniach	46,9	3908	54,0	3939	57,9	3984



w/c = 0,40 w/c = 0,45 w/c = 0,50

Rys. 5. Przekroje próbek betonowych z kruszywem magnetytowym

4. Wnioski

Przeprowadzono badania charakterystyki fizycznej oraz chemicznej kruszywa magnetytowego oraz wykonano mieszanki próbne z tym kruszywem. Wszystkie mieszanki betonowe charakteryzowały się gęstością powyżej 3800 kg/m^3, a betony – powyżej 3900 kg/m^3. Pomimo braku piasku naturalnego, nie stwierdzono trudności z mieszaniem składników, ani nie zauważono istotnej segregacji.

Wytrzymałość na ściskanie badana po 28 dniach dojrzewania betonów wynosiła od 47 MPa do 58MPa, co plasuje badane betony w klasie od C35/45 do C45/55.

Wstępne badania betonów magnetytowych i uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę jakości i przydatności kruszywa magnetytowego. Kierunki i zakres dalszych badań betonów magnetytowych i innych betonów specjalnych będą odnosiły się bezpośrednio do przyjętych projektów konstrukcji reaktorów atomowych, budowli pomocniczych i innych, w których takie betony będą wykorzystane.

Można również przewidywać, że wykonawcy zaproponują własne projekty betonów, jeżeli tylko będą w stanie wykazać ich odpowiednią jakość. W takim przypadku, wyniki badań właściwości betonów osłonowych będą mogły być wykorzystane przy kontroli i nadzorze prac firm wykonawczych.

Podziękowania

Praca była przygotowana w ramach projektu „Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej", PBSII/A2/15/2014.

Badania techniką WAXS (Wide-angle X-ray scattering) przeprowadzono wykorzystując infrastrukturę CePT finansowaną przez Unię Europejską - Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka na lata 2007-2013.

Literatura

[1] Alexander M., Mindess S. (2005) Aggregates in concrete. Taylor & Francis, 435 str.
[2] Hilsdorf H.K., Kropp J., Koch H.J. (1978) The effect of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. ACI SP 55-10,223-251
[3] Brandt A.M. (2013) Application of concrete as a material for anti-radiation shielding – a review, Cement Wapno Beton, 18, 2, 815-822.
[4] BrandtA.M. Jóźwiak-Niedźwiedzka D. (2013) On the influence of ionizing radiation on microstructure and properties of concrete shields - a review, Cement Wapno Beton, 18, 4, 1-22
[5] Ablewicz Z., Jóźwik B. (1978) Budownictwo w technice jądrowej, Arkady, Warszawa.
[6] Ablewicz Z., Dubrowski W.B. (1986) Osłony przed promieniowaniem jonizującym. Arkady, Warszawa, 300 str.
[7] Pomaro B., Salomoni V.A., Gramegna F., Prete G., Majorana C.E. (2010) Effects of high energy atomic collisions and material behaviour of concrete barriers in nuclear physics experiments. XVII Conf. Siracusa.
[8] Eissa N.A., Kany M.S.I., Mohamed A.S., Sallam A.A., EI Fouly M.H. (1998) Mossbauer spectroscopic study of gamma irradiation on the structural properties of hematite, magnetite and limonite concrete for nuclear reactor shielding. Hyperfine Interaction, vol. 112, issues 1-4, 205-211
[9] Jingyay Cao, Chung D.D.L. (2004) Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding. Cem.&Concr.Res., 34, 1889-1892
[10] Mahdy M., Speare P.R.S., Abdel-Reheem A.H. (2002) Shielding properties of heavyweight, high strength concrete. 2nd Mat.Spec.Conf. of the Canadian Soc. for Civ. Engrs., June 5-8, 1-10
[11] Koton A., Trybalski P., (2008) Beton barytowy jako osłona przed promieniowaniem radioaktywnym. Doświadczenia z budowy Wielkopolskiego Centrum Onkologii, Konf. "Dni Betonu", Stow. Prod.Cem., Wisła, 8-10 paźdz., 685-694