

Dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek, Dr inż. Piotr Woyciechowski

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Politechnika Warszawska

Ocena podatności na karbonatyzację napowietrzonych betonów z dużą zawartością popiołu

Carbonation rate of air-entrained fly ash concretes

1. Wstęp

Betony napowietrzane stosowane są w konstrukcjach narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, najczęściej nieosłoniętych warstwami ochronnymi. Pionowe i poziome powierzchnie takich konstrukcji są podatne nie tylko na wchłanianie wody i destrukcyjne działanie mrozu, ale również na wnikanie dwutlenku węgla z atmosfery, powodującego karbonatyzację. Występowanie jednocześnie różnych czynników destrukcyjnych potęguje postęp procesów korozyjnych w betonie. Zachowanie wymagań normy PN-EN 206-1 określających skład betonu wynikający z kombinacji klas ekspozycji XF i XC zapewnia ochronę materiałową, ale pomimo tego w praktyce często następuje zniszczenie tego kompozytu. Dotyczy to przede wszystkim betonów z dużą zawartością popiołu, w przypadku których występują trudności technologiczne prawidłowego napowietrzenia mieszanek.

W praktyce, zarówno krajowej jak i zagranicznej, stosowane są przede wszystkim betony z zawartością popiołów nie przekraczającą 0,33 masy cementu, których trwałość nie budzi zastrzeżeń. Coraz częściej znajdują również zastosowanie betony o dużej zawartości popiołu¹ i małym współczynniku w/c. Betony te są bardziej przyjazne dla środowiska ze względu na zmniejszenie zawartości cementu (4). Zalety betonów o dużej zawartości popiołów zostały opisane przez Malhotrę i Mehtę (7). We wcześniejszych badaniach jeden z autorów (5) wykazał, że możliwe jest uzyskanie

¹ Betony te są nazywane przez autorów popiołowymi.

1. Introduction

Air-entrained concrete is used in structures exposed to cyclical freezing and thawing and which most often are not protected with additional layers. Vertical and horizontal surfaces of such structures are subject not only to water sorption and destructive frost attack, but also to the absorption of carbon dioxide from the atmosphere, resulting in carbonation. The simultaneous presence of other noxious ingredients intensifies the progress of the corrosion process in concrete. Satisfying the requirements specified for concrete, resulting from the combination of XF and XC exposition classes provides the protection for building materials. However, the examples of concrete structures corrosion are often observed. This is among others connected with the technological difficulties related to the proper air-entraining of high volume fly ash concrete mixtures, but also to the enhanced penetration of CO₂ into the porous structure of air-entrained concrete.

In practice, both in Poland and in other countries, concretes with medium fly ash content (up to 0.33 of cement mass) are used. Their durability, according to the PN EN 206-1 standard, is unquestionable. However, high volume fly ash concretes are used more and more frequently – they have low w/c ratio and high fly ash content, they are more environment friendly thanks to the reduction of the cement content (4). High Volume Fly Ash Concrete - HVFAC were defined by Malhotra and Mehta (7). As shown in the paper of one author (5), it is possible to obtain frost-resistant high volume fly ash concretes. However, proper quality and quantity of the

betonów o dużej zawartości popiołu, które są odporne na mróz. Wymaga to jednak właściwego doboru jakościowego i ilościowego składu mieszanki betonowej oraz odpowiedniego jej napowietrzenia. Zagadnienie karbonatyzacji betonu z popiołem lotnym jest dyskusyjne i różnie przedstawiane przez specjalistów, dominują jednak opinie o większej podatności na karbonatyzację betonu nawet z umiarkowaną zawartością popiołu, niezależnie od jego rodzaju (1, 3, 9, 11). Celem tej pracy jest ocena przebiegu karbonatyzacji betonów o różnym stopniu napowietrzenia, z różną zawartością krzemionkowego popiołu lotnego.

2. Metody badań i materiały

Prowadzone badania miały na celu wyjaśnienie dwóch zagadnień:

- wpływu zawartości popiołu lotnego stosowanego jako zamiennik części cementu (0,25 i 0,58% mas. sumy cementu i popiołu) w betonie napowietrzonym (stałe napowietrzenie około 6% według PN-EN 480-11:2008) na uszczelnienie jego mikrostruktury i podatność na karbonatyzację (składy A, B1, C w tablicy 1).
- wpływu na karbonatyzację różnego stopnia napowietrzenia mieszanki betonowej o stałej zawartości popiołu, wynoszącej 25%. Zawartość porów powietrznych w stwardniałym betonie oznaczona według PN-EN 480-11 wynosiła około 6%, 10%, 15% w seriach B1, B2, B3 (tablica 1).

Napowietrzenie betonu na poziomie 15% jest nieuzasadnione technologicznie i wpływa niekorzystnie na właściwości betonu, jednakże czasem można go spotkać w praktyce i z tego względu objęto badaniami beton z taką zawartością porów. Trudność w prawidłowym napowietrzeniu betonu z dodatkiem popiołu powoduje, że często mieszanka o tym samym składzie może wykazywać bardzo różny poziom napowietrzenia, niejednokrotnie znacznie przewyższający założoną wartość. Taką serię mieszanek przygotowano w laboratorium, uzyskując w kolejnych seriach, o zbliżonej zawartości powietrza badanej metodą ciśnieniową (5,2-6,5%), betony o znacznie zróżnicowanej zawartości porów powietrznych oznaczonych na zgładach według PN-EN 480-11 (6-15%). Przyczyny tego zróżnicowania można upatrywać między innymi w adsorbowaniu napowietrzającego środka powierzchniowo czynnego przez cząstki niespalonego węgla zawartego w popiele, co prowadzi do powstania w betonie obszarów o różnej zawartości powietrza (8).

Karbonatyzacja betonów (tablica 1) była badana w warunkach przyspieszonych na próbkach o wymiarach 100x100x500 mm. Postęp procesu oceniano na świeżych przełamach próbek za pomocą fenoloftaleiny, a także tymolofenoloftaleiny po 56 i 112 dniach ekspozycji w warunkach normowych - stężenie CO₂ = 1%, t = 21°C, ww = około 60% (12, 13). Dodatkowo materiał próbek pobrany w różnych odległościach od powierzchni poddanej karbonatyzacji badano rentgenograficznie w celu oznaczenia zawartości portlandytu i kalcytu. Korzystano z bazy danych ICDD (The International Centre for *Diffraction* Data) i programu XRDU A – 2D Powder – XRD Analysis.

ingredients of the concrete mixture needs to be observed, including air-entrainment agent. The matter of carbonation of concrete incorporating fly ash is open to question and approached in many different ways by researchers. However, the prevailing opinion is that fly ash concretes with medium content of fly ash are more subjected to carbonation, regardless of their type (1, 3, 9, 11). The aim of this paper is to study the concrete carbonation with different level of air-entrainment and with different siliceous fly ash content.

2. Methods and materials

The study aimed to establish:

- the influence of the fly ash (0.25% and 0.58% by mass of the sum of cement and fly ash) used as a replacement of cement in air-entrained concrete (~6% according to the standard PN-EN 480-11:2008) on the tightening of its microstructure and rate of carbonation (composition A, B1, C in Table 1),
- the impact of different air entrainment level of hardened concrete (approximately 6, 10, 15% according to PN-EN 480-11) with constant fly ash content (p/cp=0.25) has been studied (series B1, B2, B3 in Table 1).

Air-entrainment as high as 15% is technologically unreasonable and has negative influence on concrete properties, however, the authors have found this value in field concrete and for this reason it was also included in the experiment program. Problems of air-entrainment of fly ash concrete results in different levels of air content in subsequent series of hardened concrete samples made of mixture of the same composition and constant admixture addition. These series of concrete mix were made in the laboratory and samples of concrete with different air pores content (according to PN EN 480-11) were obtained (6-15%) from mix batches with similar air content measured with pressure method (5.2 – 6.5%) These variations can be explained, among others, by sorption of air-entraining agent by the unburned carbon particles present in the ash, which leads to the formation of the concrete areas with different air content (8).

Concretes with different fly ash content (Table 1) have been tested on the samples of dimension 100 x 100 x 500 mm. These samples were cured 1 day in the moulds, 27 days in water and 14 days in laboratory conditions. Then the samples were placed in hermetic carbonation chamber in standard conditions: CO₂ 1%, temperature: 21°C, RH: 60% (12, 13). After 56 and 112 days, the depth of carbonation was examined using the *phenolphthalein* and *thymolphthalein* according to PN-EN13295:2005. Additionally, the material was taken from the tested samples at different depth and X-ray was used to determine the portlandite and calcite content, using the programme: XRDU A – 2D Powder – XRD Analysis Programme.

The total air content in concrete mix was tested with pressure method (PN-EN 12350-7). Air pores characteristics in hardened concrete was tested according to PN EN 480-11 with the use of

Całkowitą zawartość powietrza w mieszance betonowej badano metodą ciśnieniową wg PN EN 12350-7. Strukturę porów powietrznych w stwardniałym betonie wyznaczano wg PN EN 480-11:2008, za pomocą programu komputerowego do automatycznej analizy obrazu na zglądach z próbek betonowych.

Właściwości stwardniałego betonu: wytrzymałość na ściskanie, przepuszczalność wody badano na próbkach sześciennych o długości krawędzi 150 mm według norm z serii PN-EN 12390.

Betony wykonano z cementu CEM I i kruszywa naturalnego oraz popiołu lotnego krzemionkowego, stosując domieszki: upłynniając-

computer program to automatic analysis of the images of concrete polished section. Other concrete properties (compressive strength, water permeability) were tested on cubic specimens (150 mm) according to the standards of series PN EN 12390. Concrete was made of cement CEM I, natural aggregate, siliceous fly ash, superplasticizer and air-entraining agent (composition of concrete and some properties and properties of fly ash – tables 1 and 2).

3. Experimental results

3.1. Impact of fly ash content on the depth of

carbonation of the air-entrained concrete

The tests of carbonation of A, B1 and C concrete have shown that the addition of siliceous fly ash replacing part of cement with simultaneous increase of binder content (cp) and decreasing the ratio w/cp increase the resistance of concrete to carbonation. However, this effect takes place only in the case of concrete with low fly ash content. Carbonation depths, both after 56 and 112 days in carbonation chamber, measured using phenolphthalein (Fig. 1a) and thymolphthalein (Fig. 1b) show that, at constant air entrainment of tested concretes, the lowest rate of carbonation have these having p/cp = 0.25 (B1), and in the case of high-volume fly ash concrete (C) and without fly ash (A) the carbonation front lays almost 40% deeper. Comparing this relation with the results of the determinations of the depth of water penetration (Fig. 2) one can state that the low water permeability of concrete is not related with its good carbonation resistance. High volume fly ash concretes, whose water penetration depth is twice lower in comparison with concretes with medium fly ash content (p/cp = 0.25) have shown higher carbonation rate.

The X-ray patterns of the samples showing peaks of calcite

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH W kg/m³, ZAWARTOŚĆ POWIETRZA I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE.

CONCRETE MIX COMPOSITION IN kg/m³, AIR CONTENT AND COMPRESSIVE STRENGTH.

Składniki / Components	Oznaczenie serii próbek/Concrete series				
	A	B1	B2	B3	C
	p/cp = 0	p/cp = 0,25			p/cp = 0,58
Cement CEM I 42,5R	340	300			220
Popiół lotny krzemionkowy/siliceous fly ash	0	100			300
cp (popiół+cement) /(fly ash+cement)	340	400			520
Woda wodociągowa/tap water	153	153			153
Kruszywo naturalne/natural aggregate D _{max} = 16 mm	1944	1859			1689
Piasek wiślany/sand 0/2 mm (38%)	592	566			514
Żwir/gravel 2/8 mm	647	619			562
Żwir/gravel 8/16 mm	705	674			613
p/cp	0	0,25			0,58
w/c	0,45	0,51			0,70
w/s (s = c + k·p; k = 0,4 i p = 0,33c)	0,45	0,45			0,52
w/cp	0,45	0,38			0,29
Superplastyfikator/superplasticizer, % masy spoiwa/mass of binder	1,2	1,0			1,2
Domieszka napowietrzająca/air entertainment admixture, % masy spoiwa	0,15	0,2			0,24
Zawartość powietrza /air content, %	5,6	5,2	5,4	6,5	5,4
mieszanka betonowa/ concrete mix, p ¹	6	6	10	15	6
beton stwardniały/hardened concrete, A ²					
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach Ccompressive strength after 28days, MPa	40,5	36,0	34,0	31,5	43,0

Uwagi: ¹według PN-EN 12350-7, ² według PN-EN 480-11.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI KRZEMIONKOWEGO POPIOŁU LOTNEGO.

SILICEOUS FLY ASH PROPERTIES.

Popiół Fly ash	Właściwości krzemionkowego popiołu lotnego Siliceous fly ash properties					
	Straty prażenia Loss of ignition	CaO wolne CaO free	Miałkość Fineness	Wskaźnik aktywności pucolanowej,% Pozzolanic activity		Gęstość objętościowa Bulk density kg/m ³
				po 28d after28d	po 90d after90d	
EC Opole	1,41	0,08	33,0	79,2	95,4	2040

czą i napowietrzającą. Podstawowe dane o składnikach i składach są zawarte w tablicach 1 i 2.

3. Analiza wyników doświadczalnych

3.1. Wpływ zawartości popiołów na szybkość karbonatyzacji betonu napowietrzonego

Porównanie wyników badania karbonatyzacji betonów o stałym napowietrzeniu A, B1 i C wykazało, że zastosowanie popiołów jako zamiennika części cementu z jednoczesnym zwiększeniem sumarycznej zawartości spoiwa (cp) i zmniejszeniem stosunku w/cp, powoduje zwiększenie odporności na karbonatyzację. Efekt ten występuje jednak tylko w przypadku betonów z małą zawartością popiołu. Głębokość karbonatyzacji zarówno, po 56 jak i po 112 dniach w komorze karbonatyzacyjnej, wyznaczona fenoloftaleiną – zmiana barwy przy pH = 8,3 (rysunek 1a) i tymolofenoloftaleiną – pH = 9,6 (rysunek 1b), wykazują, że, przy stałym napowietrzeniu, najmniejszą szybkość karbonatyzacji mają betony o p/cp = 0,25 (B1), w których dodano 100 kg popiołu do 1 m³ betonu, zmniejszając zawartość cementu o 40 kg/m³. Natomiast w betonach bez popiołu (A) i o dużej jego zawartości (C) front karbonatyzacji przebiega na głębokości większej o blisko 40%. Porównując tę zależność z wynikami badań głębokości penetracji wody pod ciśnieniem (rysunek 2) można stwierdzić, że dobra wodoszczelność betonu nie jest wyznacznikiem jego dużej odporności na karbonatyzację. Betony z dużą zawartością popiołów, o dwukrotnie mniejszej głębokości wnikania wody niż betony z umiarkowaną zawartością popiołów (p/cp = 0,25), wykazały większą podatność na karbonatyzację.

Dyfraktogramy na rysunku 3, przedstawiają piki portlandytu i kalcytu, których powierzchnia posłużyła do oznaczenia zawartości tych faz, charakteryzujących stopień karbonatyzacji próbek. Intensywność tych pików w próbkach pobranych z różnych głębokości od powierzchni poddanej karbonatyzacji (rysunek 4) pozwala stwierdzić, że portlandyt nie występuje na powierzchni we wszystkich próbkach, co świadczy o znacznym zaawansowaniu karbonatyzacji betonu. Intensywność pików portlandytu rośnie z odległością od powierzchni betonu, a kalcytu – maleje. Wyniki te wykazują, że zawartość popiołu ma duży wpływ na szybkość karbonatyzacji.

W betonie bez popiołu portlandyt nie występuje jedynie blisko powierzchni (od 0 do 0,2 cm), a w przypadku betonu z największą zawartością popiołu – taki sam efekt występuje na głębokości 1 cm. Na zmniejszenie zawartości Ca(OH)₂ wraz ze wzrostem dodatku popiołu do betonu może prawdopodobnie mieć wpływ reakcja pucolanowa popiołu lotnego. Jednocześnie zmiany zawartości kalcytu, traktowane umownie jako wyznacznik karbonatyzacji, potwierdzają wpływ popiołu na ten proces. Największa zawartość kalcytu w betonie bez popiołu w odległości 1 i 2 cm od powierzchni może potwierdzać fakt, że beton zawierał znaczną ilość Ca(OH)₂, umożliwiającą powstanie tak dużej ilości kalcytu, nawet biorąc pod uwagę, że jego źródłem jest także karbonatyzacja innych faz, na przykład ettringitu i C-S-H (6). Świadczy to również

and portlandite which were used to determine the content of the these two phases in different depth of concrete are presented on Fig. 3. This analysis shows (Fig. 4) that the portlandite peak disappeared from the surface of all samples which proves the high degree of concrete carbonation. The intensity of portlandite peak is increasing and of calcite is decreasing with the distance from concrete samples surface. These results show that the fly ash content has an important influence on the carbonation rate.

On the surface (0-0.2 cm) of concrete without fly ash no portlandite was found and in the case of concrete with the highest volume of fly ash the same result was found at the depth of 1 cm. The decrease of Ca(OH)₂ with the increase of fly ash content in concrete probably can be caused by pozzolanic reaction. Simultaneously the calcite content which can be treated as the carbonation indicator proofs the influence of fly ash on this process. The highest content of calcite in the concrete samples without fly ash in the distance of 1 and 2 cm from the surface may indicate that the concrete has high content of Ca(OH)₂, facilitating the formation of calcite, even taking into account that it can be also the product of carbonation of other phases, form example ettringite and C-S-H (6). On the other hand it may prove that the carbonation process is advanced and additionally intensified by the presence, in the concrete, of air pores resulting from the air-entrainment.

Formation of denser concrete microstructure, linked with fly ash addition, is confirmed by the difficult carbon dioxide penetration to the deeper layers of concrete. However, the diffusion rate of CO₂ in the pores is dependent not only of the porosity structure, but chiefly of the concentration gradient of CO₂. In the case of concrete without siliceous fly ash the quick reaction of Ca(OH)₂ with carbon dioxide near the samples surface decrease the concentration gradient in concrete and lowers the rate of CO₂ migration. When calcium hydroxide content is low, as is the case with HVFA

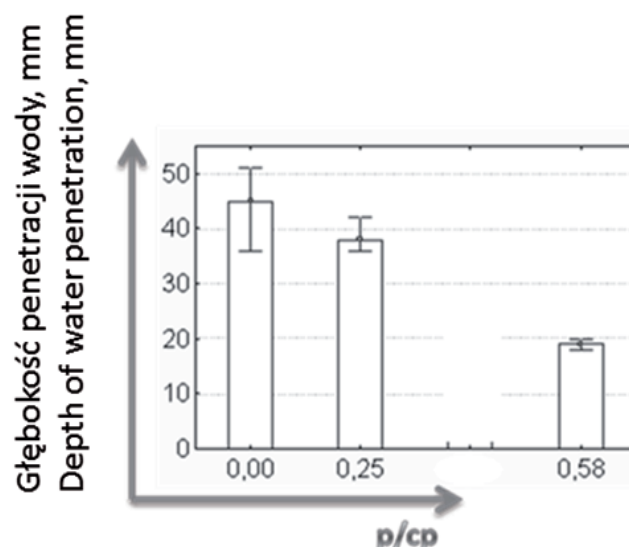
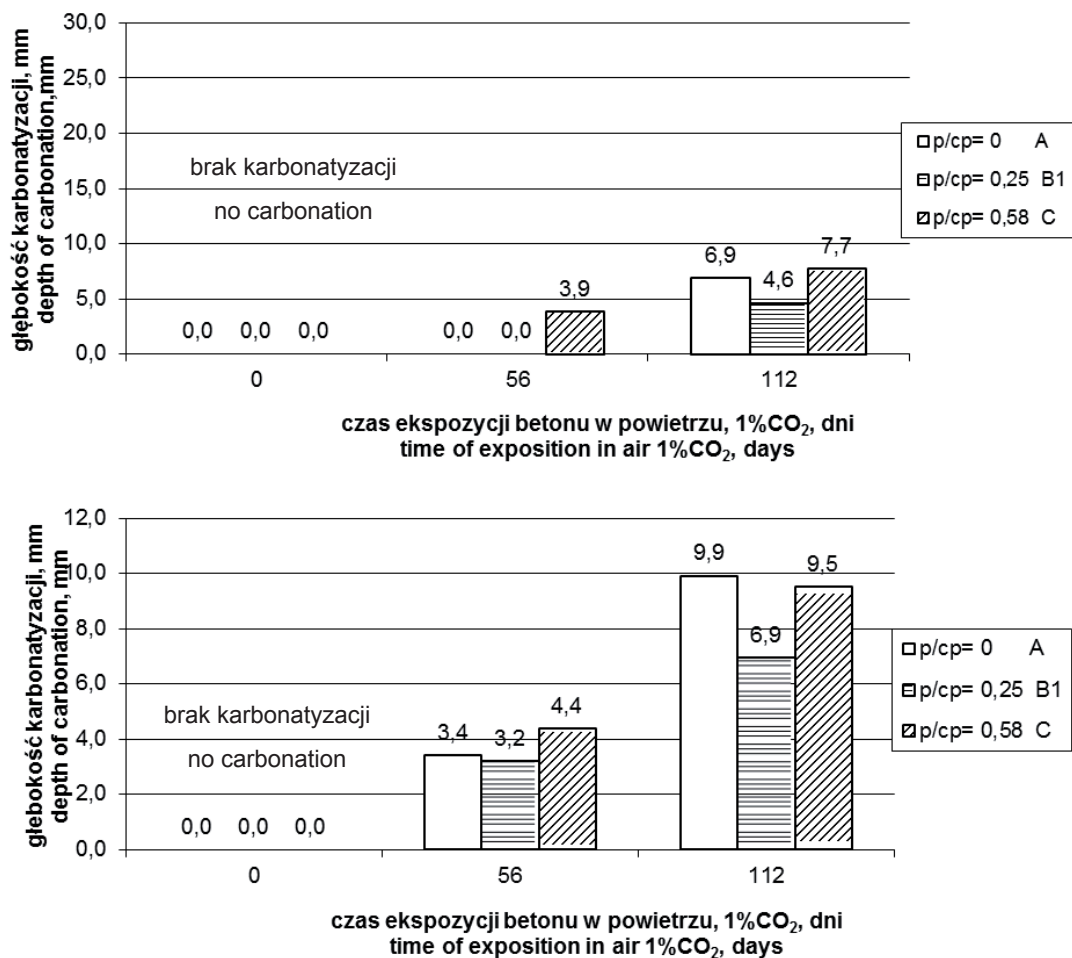


Fig. 2. Wpływ zawartości popiołu w betonie: p/cp na głębokość penetracji wody pod ciśnieniem; stałe napowietrzenie betonu ~6%.

Fig. 2. Influence of fly ash content in concrete: p/cp ratio of fly ash to its sum with cement on the depth of water penetration under pressure; constant air content in concrete equal ~6%.



Rys. 1. Wpływ zawartości popiołu lotnego w betonie na położenie frontu karbonatyzacji. (a-fenoloftaleina, b-tymolofenoloftaleina); p/cp – stosunek masy popiołu do sumy cementu i popiołu

Fig. 1. Impact of fly ash content on the depth of carbonation (a- phenolphthalein, b-thymolphthalein); p/cp-fly ash ratio to the sum of cement and fly ash

o zaawansowanym procesie karbonatyzacji, na który mogły również mieć wpływ pory powietrzne.

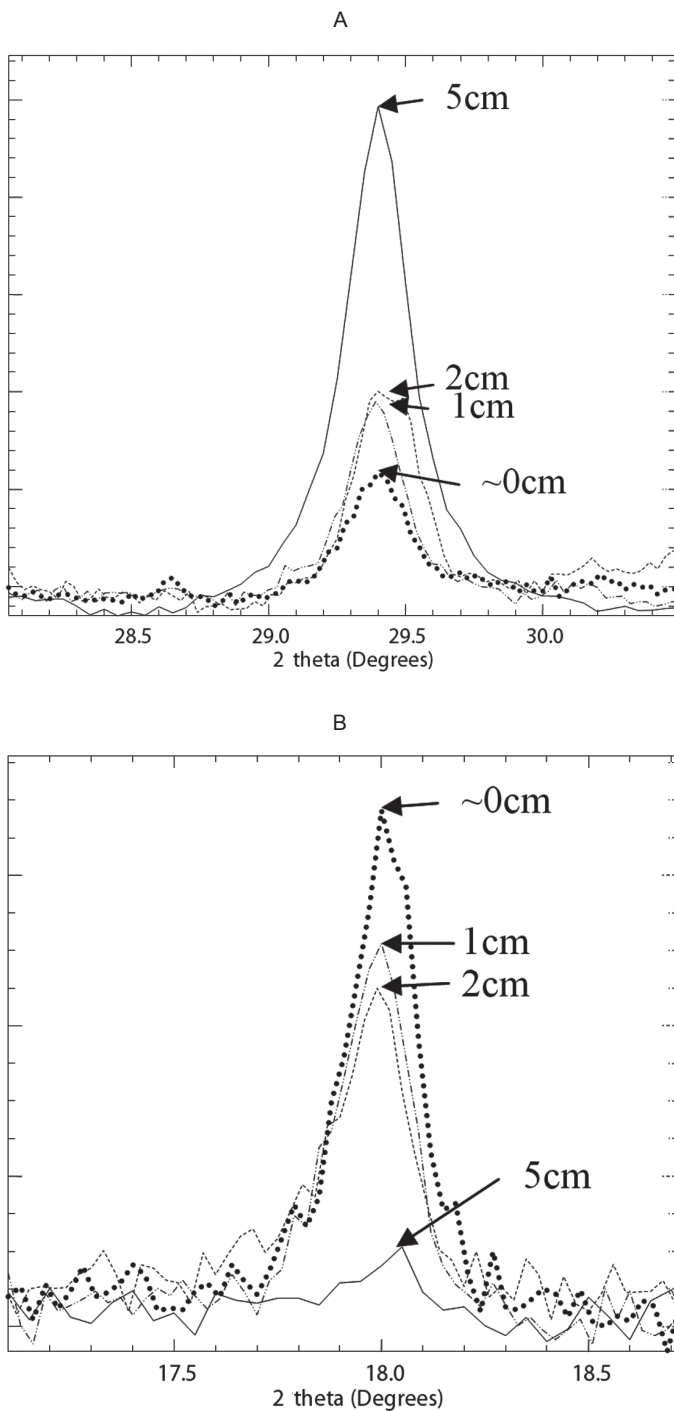
Uszczelnienie mikrostruktury betonu związane z dodatkiem popiołu lotnego, na co wskazuje zmniejszenie wnikania wody (rysunek 2), utrudnia wnikanie dwutlenku węgla do głębszych warstw betonu. Szybkość dyfuzji CO₂ w porach zależy jednak nie tylko od ich struktury ale przede wszystkim od różnicy stężeń CO₂. W przypadku betonu bez popiołu szybka reakcja Ca(OH)₂ z dwutlenkiem węgla blisko powierzchni próbek, zmniejsza gradient stężeń w betonie i spowalnia wnikanie CO₂. Jeśli natomiast wodorotlenku wapnia jest mało, jak to ma miejsce w przypadku betonów z dużą zawartością popiołu (mała ilość cementu przy dużej zawartości popiołu lotnego), a reakcja pucolanowa wiąże część Ca(OH)₂, dyfuzja dwutlenku węgla (a zatem i karbonatyzacja) może być szybsza, ale zawartość kalcytu jest zdecydowanie (nawet kilkakrotnie – rysunek 5.b) mniejsza niż w przypadku betonów bez popiołu. To przypuszczenie potwierdza uzyskana w badaniach większa grubość warstwy, która uległa karbonatyzacji w betonach z dużą zawartością popiołu.

concrete (small amount of cement with high fly ash content) and the pozzolanic reaction bound some part of Ca(OH)₂, the carbon dioxide diffusion (and also the carbonation) can be faster, but the calcite is drastically lower (even several times – Fig. 5.b) than in concretes without fly ash. This assumption is confirmed by deeper position of carbonation front, in the case of concrete samples with high fly ash content.

3.2. The influence of the air entrainment degree of concrete on the carbonation process

In order to test the influence of the air-entrainment degree on the carbonation process, concretes of the same composition were produced (p/cp = 0.25), but with various pores content in the hardened concrete, equal about 6, 10 and 15%, measured according to PN-EN 480-11. The aim of these tests was to verify the influence of various air entrainment levels of the concrete mixture, resulting in various air pores content in the hardened concrete, on the carbonation process.

The results of the measurements of the carbonation front position using the phenolphthalein and thymolphthalein for concretes with various air pores content (Fig. 7.A and B) show the clear increase of carbonation rate with the level of air entrainment, in the case

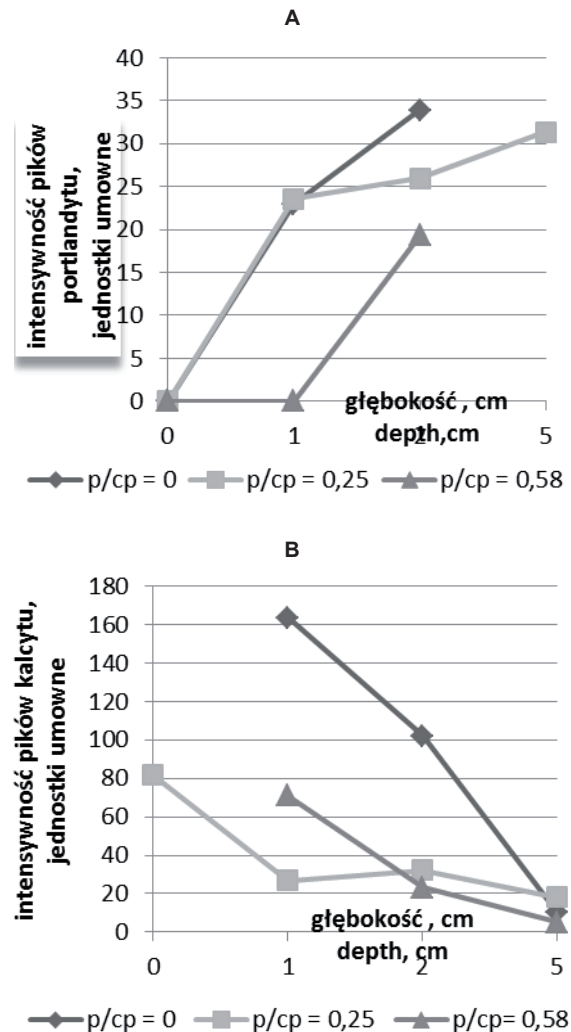


Rys. 3. Piki portlandytu A i kalcytu B na dyfraktogramach próbek o $p/c_p = 0,25$, pobranych na różnych głębokościach betonu.

Fig. 3. Peaks of portlandite and calcite on X-ray patterns of samples with $p/c_p = 0,25$, taken from different depths of concrete.

3.2. Wpływ stopnia napowietrzenia betonu na szybkość karbonatyzacji

W celu oceny wpływu stopnia napowietrzenia na szybkość procesu karbonatyzacji wykonano betony o tym samym składzie ($p/c_p = 0,25$), lecz z różną zawartością porów powietrznych w stwardniałym betonie, wynoszącą około 6%, 10% i 15%, według pomiarów zgodnych z PN-EN 480-11. Celem tych badań było ustalenie wpływu różnego stopnia napowietrzenia mieszanki betono-

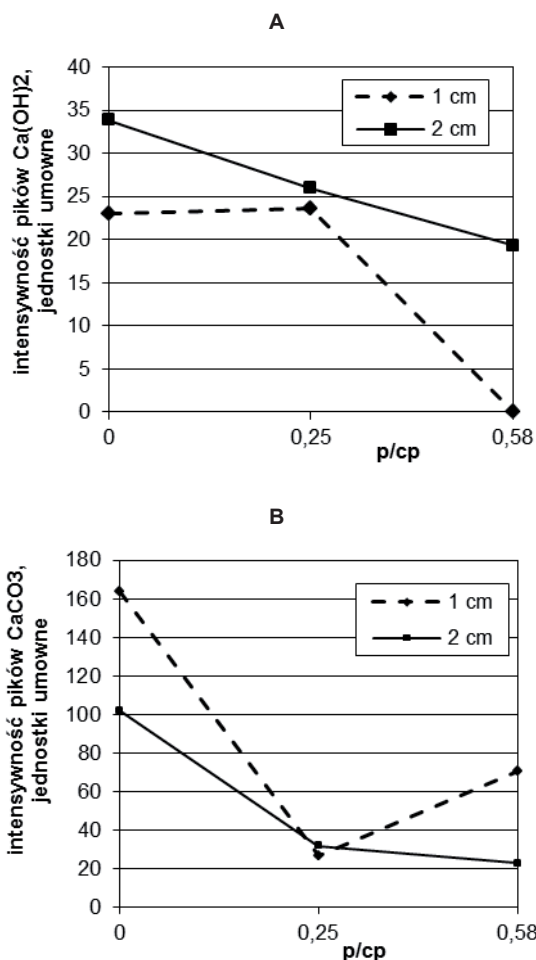


Rys. 4. Oszacowana zmiana zawartości: (A) portlandytu, (B) kalcytu w zależności od głębokości pobrania próbek betonu.

Fig. 4. Estimated change of content: (A) portlandite, (B) calcite in the samples taken from different depth of concrete.

of concrete with moderate fly ash content. Concrete with the air pores content of about 6% showed in each case the lowest thickness of carbonized layer. Whereas in concretes with higher air entrainment the carbonated layer thickness was clearly increasing with the content of air pores. In the thymolphthalein test the layer of carbonated concrete with 6% of air pores after 112 days in the carbonation chamber was about 7mm, whereas for the concrete with 10% porosity it was almost twice as much, over 13 mm, and for 15% concrete – three times higher, equal 24 mm.

The influence of air-entraining level on the carbonation process is unambiguous – the higher air pores content in concrete, the quicker its carbonation. This is a very important issue connected with the durability of structures made of air-entrained concretes. Especially its embraces the high-volume fly ash concretes, in which case it is often difficult to obtain a proper level of air-entrainment, which may require the use of high addition of the air-entraining agent, in which case it more difficult to provide the proper air pores structure.



Rys. 5. Zmiany intensywności refleksów portlandytu A i kalcytu B w próbkach pobranych z głębokości 1 cm i 2 cm w odniesieniu do względnej zawartości popiołu lotnego w betonie.

Fig. 5. Changes of peaks intensity of portlandite and calcite in the samples taken on 1 cm and 2 cm depth, in connection with relative fly ash content in concrete.

wej, a więc i różnej zawartości porów powietrznych w stwardniałym betonie, na karbonatyzację.

Wyniki oznaczeń położenia frontu karbonatyzacji za pomocą fenoloftaleiny i tymolofenoloftaleiny w przypadku betonów o różnej zawartości porów powietrznych (rysunek 6A i 6B) wskazują na wyraźny wzrost szybkości karbonatyzacji wraz ze zwiększeniem stopnia napowietrzenia betonu, z umiarkowaną zawartością popiołu lotnego. Beton o zawartości porów powietrznych około 6%, w każdym przypadku wykazywał najmniejszą grubość warstwy skarbonatyzowanej. Wraz ze wzrostem napowietrzenia grubość warstwy skarbonatyzowanej zwiększała się wyraźnie. Na podstawie oznaczeń za pomocą tymolofenoloftaleiny stwierdzono, że grubość warstwy, która uległa karbonatyzacji w betonie zawierającym 6% porów powietrznych, po 112 dniach, wynosiła około 7 mm, podczas gdy w przypadku betonu z 10% zawartością tych porów - dwukrotnie więcej, ponad 13 mm, a betonu, w którym zawartość porów wynosiła 15% - ponad trzykrotnie więcej, około 24 mm.

Wpływ stopnia napowietrzenia betonu na szybkość procesu karbonatyzacji jest jednoznaczny – im większa zawartość porów po-

4. Conclusions

On the basis of tests results the following conclusions can be drawn:

1. The air-entraining high volume fly ash concretes causes the acceleration of carbonation, which in turn increases with the rise of concrete porosity.
2. Replacing part of cement with fly ash and increasing total amount of powders allows the tightening of concrete, which reduces the rate of carbonation, but this effect is limited to concrete with low ash content (25% in presented study).
3. The rate of carbonation in high-volume fly ash concrete (58% of cement replacement) is higher in comparison with concretes containing moderate volume of fly ash.

The paper was written on the basis of results obtained in Research Project NN 506 257137 "Model of concrete carbonation".

Literatura / References

1. N. Bouzoubaa, B. Tamtsia, M. H. Zhang, R. L. Chevrier, A. Bilodeau, V. M. Malhotra, Carbonation of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash, Special Publication ACI, Vol. 234-19 (2006).
2. L. Czarnecki, P. Woyciechowski, Metody oceny przebiegu karbonatyzacji betonu, II Sympozjum Naukowo-Techniczne, Trwałość Betonu, 97-119, Kraków 2008.
3. L. Czarnecki, P. Woyciechowski, Model of concrete carbonation as limited process, Brittle Matrix Composites, 183-194 (2009).
4. W. Jackiewicz-Rek, Betony wysokopopiołowe, Materiały Budowlane 18-20 (2010).
5. W. Jackiewicz-Rek, Kształtowanie mrozoodporności betonów wysokopopiołowych, Rozprawa doktorska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2010.
6. W. Kurdowski, Chemia cementu i betonu, Polski Cement, PWN Kraków 2010.
7. V. M. Malhotra, P. K. Mehta, High performance high volume fly ash concrete, Ottawa, Canada 2005.
8. A. Neville, Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
9. M. D. A. Thomas, J. D. Matthews, C. A. Haynes, Carbonation of Fly Ash Concrete, Special Publication ACI, Vol. 192-33 (2000).
10. P. Woyciechowski, A. Chudan, W. Jackiewicz-Rek, Badania wysokopopiołowych mieszanek samozagęszczalnych i betonów, Inżynieria i Budownictwo, 2, 91-93 (2006).
11. Use of Fly Ash in Concrete, Reported by ACI Committee 232, American Concrete Institute 2003.
12. PN-EN 14630: 2007, Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczenie głębokości karbonatyzacji w stwardniałym betonie metodą fenoloftaleinową.
13. PN-EN 13295:2005, Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczenie odporności na karbonatyzację.

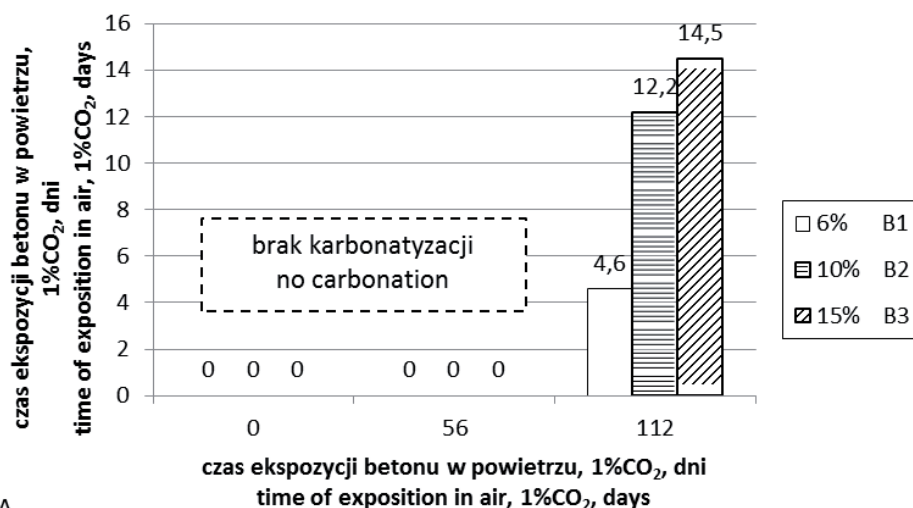
wietrznych w betonie tym szybciej przebiega jego karbonatyzacja. Jest to bardzo ważny problem związany z trwałością konstrukcji z betonu napowietrzonego. Szczególnie dotyczy on betonów popiołowych, w których trudno uzyskać odpowiedni poziom napowietrzenia, co może pociągać za sobą stosowanie większego dodatku domieszki napowietrzającej, a w tych warunkach trudniej jest zapewnić odpowiednią strukturę porów powietrznych (8).

4. Wnioski

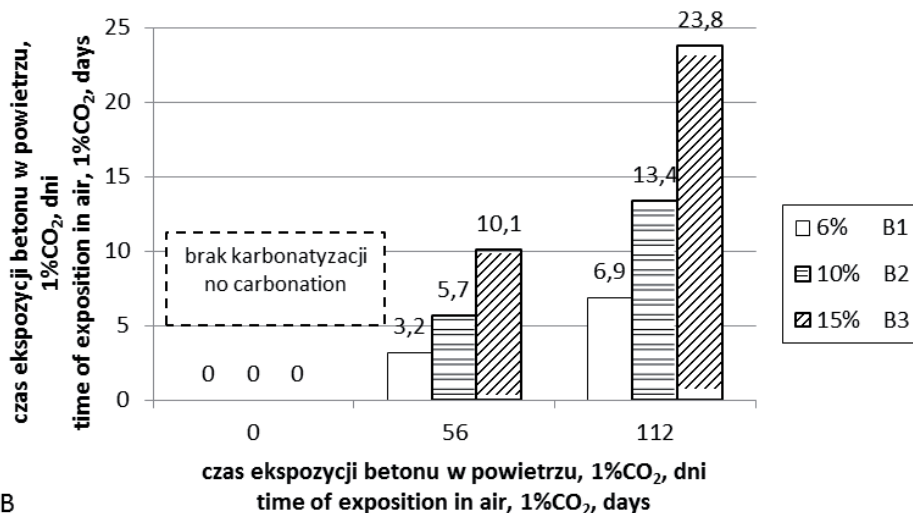
Uzyskane wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Napowietrzenie betonów popiołowych powoduje przyspieszenie karbonatyzacji, której przebieg rośnie wraz ze zwiększeniem zawartości porów powietrznych w betonie,
2. Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego, który zastępuje cement, powoduje zmniejszenie wnikania wody do betonu co świadczy o zwiększeniu jego szczelności, równocześnie ogranicza szybkość karbonatyzacji, lecz wpływ ten stwierdzono w przypadku betonów z małą zawartością popiołu, wynoszącą 25% masy spoiwa, gdyż tylko taką objętość badaniemi,
3. Karbonatyzacja przebiega szybciej w napowietrzonych betonach o dużej zawartości popiołu wynoszącej 300 kg/m³ [cementu 220 kg/m³] w porównaniu do betonów o podobnym stopniu napowietrzenia, ale z małą zawartością popiołu.

Artykuł przygotowano w ramach realizacji projektu badawczego nr N N506 257137 pt „Model przebiegu karbonatyzacji betonu”.



A



B

Rys. 6. Wpływ zawartości porów powietrznych w stwardniałym betonie z umiarkowaną zawartością popiołów na głębokość karbonatyzacji; $c/c_p = 0,25$, fenoloftaleina (A) i tymolofenoloftaleina (B).

Fig. 6. Impact of air pores content in hardened concrete with average fly ash addition on carbonation depth; $c/c_p = 0,25$, A – phenolphthalein, B – thymolphthalein.